

ORIGINAL ARTICLE

환경요인에 따른 청평호 식물플랑크톤 군집 및 우점종의 천이 특성

윤석제 · 김현년 · 임종권 · 김용진* · 백준수 · 이수웅 · 이은정 · 유순주

국립환경과학원 한강물환경연구소

Effect of Environmental Factors on Phytoplankton Communities and Dominant Species Succession in Lake Cheongpyeong

Seok Jea Youn, Hun Nyun Kim, Jong Kwon Im, Yong-Jin Kim*, Jun-Soo Baek,

Su-Woong Lee, Eun Jeong Lee, Soon Ju Yu

Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea

Abstract

Phytoplankton populations were examined at three sites in Lake Cheongpyeong, South Korea from March 2008 to December 2016, including measurement of phytoplankton communities and their dominant species, abundance and environmental factors. The annual average ranges of water temperature, dissolved oxygen and conductivity were 15.2-18.8°C, 10.3-12.2 mg/L, 86-140 μ S/cm, respectively, with similar values at all studied sites. The highest phytoplankton cell density was observed in spring and fall, and it subsequently decreased rapidly during heavy rainfall. Diatoms were dominant in spring (mainly *Stephanodiscus hantzschii*, *Asterionella formosa*) and fall (mainly *Aulacoseira granulata*), while greenalgae and cyanobacteria had high appearance in early-summer and summer, respectively, indicating that water temperature is the most important factor influencing their growth. *Stephanodiscus hantzschii* and *Asterionella formosa* frequently occurred at low water temperature (4.5-15.0°C and 5.4-21.6°C, respectively) while *Aulacoseira granulata* and *Anabaena* spp. were favored by high water temperature (8.6-28.4 and 14.9-26.2°C, respectively) and phosphorus. Additionally, *Fragilaria crotonensis* occurred at low nutrient conditions. *Rhodomonas* spp. frequently appeared year-round.

Key words : Diatoms, Dominant species, Lake Cheongpyeong, Phytoplankton

1. 서론

식물플랑크톤은 수중 생태계에서 먹이망의 기초가 되는 1차 생산자로서 동물플랑크톤의 섭식활동에 의해 조절되기도 하지만 환경요인에 따라 종이나 군집

의 크기가 변화된다(Seo et al., 2013; Chang et al., 2014). 수온은 식물플랑크톤 계절별 천이 구조에 영향을 미치며, 식물플랑크톤 군집의 변화는 영양염류의 농도와 깊은 관계가 있다(Toman, 1996; Habib et al., 1997; Jeong et al., 2010). 게다가 식물플랑크톤의 발생

Received 31 May, 2017; Revised 10 July, 2017;

Accepted 11 July, 2017

*Corresponding author: Yong-Jin Kim, Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Incheon 22689, Korea
Phone: +82-31-770-7273
E-mail: yjkim99@korea.kr

The Korean Environmental Sciences Society. 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, provided the original work is properly cited.

규모는 강수량, 유량, 체류시간 등과 같은 수리수문학 적 요인에 의해 영향을 받는다(Moss and Balls, 1989; Wu et al., 2011). 호수나 하천에서 생물학적 지표로서 식물플랑크톤은 환경에 따른 민감성(sensitivities)이나 저항성(tolerances)에 대해 각각의 속이나 종 수준 까지 연구가 되어 있다(Reynolds et al., 2002; Soylu and Gönülol, 2010). 이와 같이 식물플랑크톤은 수중 환경변화를 대변하는 지표로 활용가치가 높으며, 수 환경의 변화를 예측하는데 있어 식물플랑크톤의 발생 과 천이 양상을 이해하는 것은 매우 중요하다(Pennock and Sharp, 1994; Guo et al., 2010).

국내의 댐들은 대부분 흐르는 하천을 막아 건설되었으며, 넓어진 유역면적은 주변의 오염원 유입을 증가시키는 원인이 된다. 이로 인해 국내 대부분의 인공 호는 부영양화가 진행되고 있을 뿐만 아니라, 주변 유역의 인구의 증가 및 산업의 발달에 따른 산업 하수의 과다 유입은 부영양화를 촉진시키고 있다(Kim et al., 1997; Lee et al., 2002; Shin et al., 2003). 부영양화된 호수나 저수지는 식물플랑크톤의 증식을 촉진시키며(Shin et al., 1999), 높은 밀도의 식물플랑크톤에 의해 물색이 변화되고 이취미 등을 발생된다. 또한 정수장에서는 응집을 저해하거나 여과지 폐쇄를 일으킨다(Park and Jheong, 2003). Lee et al.(2002)의 부영양화 평가연구에 따르면 국내 주요 호수들은 다수가 부영양화 단계인 것으로 평가되었으며, 부영양성 식물플랑크톤이 우점종으로 출현하였다. 그러므로 수질관리 차원에서 식물플랑크톤의 발생을 제어 및 억제하는 것은 중요한 사안이며, 효과적인 수질관리를 위해서는 지속적인 식물플랑크톤의 모니터링 및 기초 조사가 필요하다.

북한강 수계에서 하류에 위치한 청평호는 수변에 수상 레저 활동이 활발히 일어나고 있으며, 펜션 및 음식점 증가 등에 의한 오염이 더욱 심화되고 있다. 북한강 상류 수계의 영양염류는 하류의 팔당호에 유입되며, 북한강 상류에서 발생한 유해남조류가 북한강 하류의 발생 원인으로 작용될 가능성이 제시되었다(Park and Jheong, 2003). 또한 강우기 등 특정 시기에 북한강 상류인 의암호에서 발생한 *Anabaena* spp.는 하류인 청평호와 팔당호에 유입되어 증식할 가능성이 보고되었다(Byun et al., 2014). 특히, 2011년 11월에

북한강 상류 호수인 의암호부터 하류인 팔당호까지 *Anabaena spiroides*(최대 11,325 cells/mL)가 이취미 물질인 geosmin을 발생하며 한 달 이상 출현이 지속되었다(You et al., 2013). 상수원인 팔당호에 대해서는 비교적 다양한 식물플랑크톤 관련 자료가 축적되어 있으나(Park et al., 2000; Park and Jheong, 2003; Uhm and Hwang, 2006), 팔당호 상류 호수인 청평호에 대한 조사는 특정 계절이나 여러 호수를 단기간만 조사하였을 뿐, 장기간 모니터링을 통한 자료를 토대로 한 식물플랑크톤 변동에 관한 연구가 매우 미비한 실정이다(Youn et al., 2010; Kim et al., 2012; Byun et al., 2014).

본 연구는 청평호에서 2008년부터 2016년까지 장기적인 모니터링을 통해 식물플랑크톤 군집과 우점종의 발생양상을 조사하였고, 이에 미치는 환경 요인과의 관계를 규명하는데 목적을 두었으며, 이를 통해 청평호의 통합적 관리를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사지점 및 조사기간

청평호는 1943년 수력발전용으로 북한강 수계하류에 축조된 소형 인공호로 수표면적 17.6 km², 유역면적이 9,921 km²로 수위 변동은 연간 큰 차이가 없다(Table 1). 청평호 상류는 소양호, 춘천호, 의암호 등이 연속적으로 위치하고 있으며, 이들 호수의 유입유량에 직접적인 영향을 받고 있다. 청평호로 유입되는 주요 유입천은 북한강 본류와 홍천강, 가평천 등이 있다. 청평호는 1969년에 국민관광지로 지정된 후 수상 레저시설 및 별장, 음식점, 가두리 양식장이 입지하여 오염을 가중시키고 있는 실정이다.

청평호의 수질 및 식물플랑크톤의 계절별 분포를 조사하기 위해 2008년 3월부터 2016년 12월까지(결빙기 제외) 매월 1회 조사를 실시하였으나, 2014년은 3월, 5~8월, 10월만 조사를 시행하였다. 조사 지점은 2008년부터 2013년까지 댐 앞 지점(Cheongpyeong Dam1; CPD1)과 남이섬 지점(CPD2)에서, 2014~2016년은 댐 앞 지점(CPD1)과 고성리 지점(CPD3)에서 조사하였다(Fig. 1).

Table 1. Hydraulic characteristics in Lake Cheongpyeong

Characteristics	
Completion date	July, 1943
Drainage basin area (km ²)	9,921
Surface area (km ²)	17.6
Max water volume (10 ⁶ m ³)	186
Inflow (10 ⁶ m ³ /year)	6,492
Outflow (10 ⁶ m ³ /year)	6,487
Average depth (m)	11
Hydraulic residence time (days)	10

2.2. 물리화학적 환경요인

조사대상 호수의 제원 및 방류수량은 국가수자원 관리 종합정보(www.wamis.go.kr), 강수량은 기상청(www.kma.go.kr)에서 제공하는 월 평균 자료를 이용하였다. 조사 시 수온과 용존산소(Dissolved Oxygen), 전기전도도(Conductivity)는 현장에서 다항목 수질측정기(YSI 6600, USA)를 사용하여 현장에서 측정하였으며, 투명도는 투명도판을 이용하여 측정하였다. 시료의 채수는 수심 0.5 m에서 van Dorn 채수기를 이용하여 채수하였다. 채수한 시료는 암 냉 보관하여 이동하였고, 시료 중 일부는 클로로필 *a*(Chlorophyll *a*), 생물화학적 산소요구량(Biochemical Oxygen Demand; BOD) 총질소(Total Nitrogen; TN), 용존성 총질소(Dissolved Total Nitrogen; DTN), 총인(Total Phosphorus; TP), 용존성 총인(Dissolved Total Phosphorus; DTP)

과 등을 수질오염공정시험기준(MOE, 2016)에 준하여 분석하였다.

2.3. 식물플랑크톤 분석

식물플랑크톤의 세포수 및 출현종을 조사하기 위하여 채수한 시료의 일부는 Lugol's solution으로 2%(v/v)가 되도록 첨가하여 고정하였다. 고정된 시료는 Sedgwick-Rafter counting chamber 안에 1 mL을 넣고 검경하였다. 식물플랑크톤의 생물량은 위상차 현미경(ECLIPSE Ni, Nikon, Japan)하에서 100~1,000배에서 관찰한 후 단위체적당 세포수로 산출하였다. 식물플랑크톤 중에 대한 동정은 한국담수조류도감(Chung, 1993), Hirose et al.(1997), John et al.(2002)를 참조하였다. 식물플랑크톤 군집은 구조류, 녹조류, 남조류로 구분하였으며, 그 외 식물플랑크톤

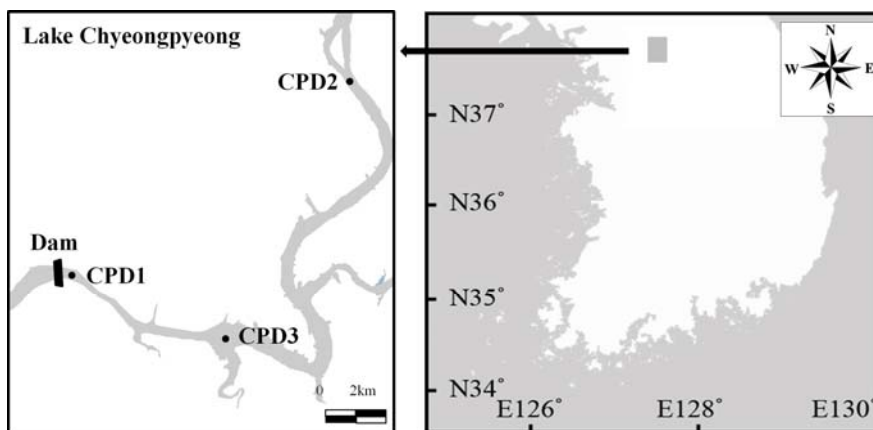


Fig. 1. A map showing the sampling site in the Lake Cheongpyeong.

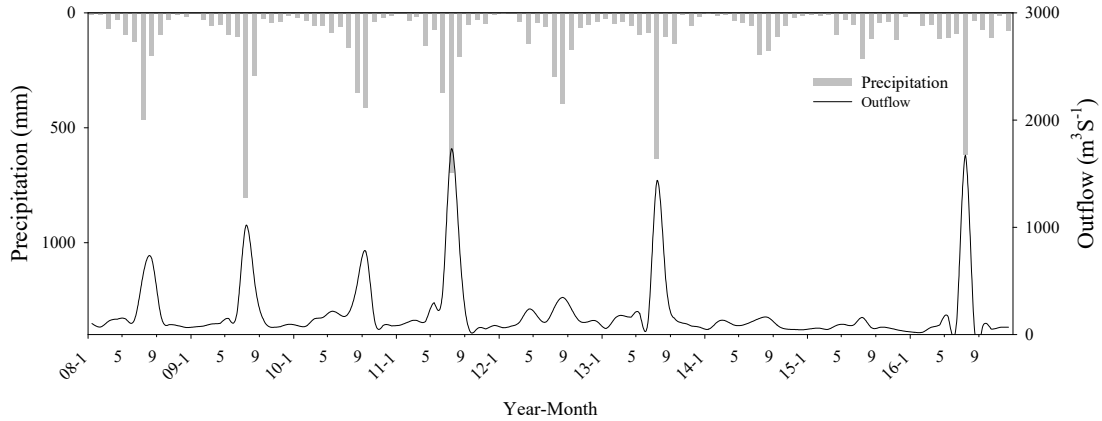


Fig. 2. Monthly variation of precipitation and outflow in Lake Cheongpyeong (2008-2016).

들은 기타조류로 묶어서 분류하였다.

식물플랑크톤 군집과 환경요인과의 상호관계를 알아보기 위해 식물플랑크톤 세포수와 환경요인을 이용하여 Pearson 상관분석(Pearson's correlation analysis)을 하였으며, 통계프로그램은 SPSS 12.0을 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 물리·화학 환경요인의 변화

청평호는 저류능력이 적어 저수위는 50 m 내외를 유지하였으며, 방류량은 강우에 따라 유입된 유량이 하루로 그대로 방류되기 때문에 계절적인 강수량의 변동과 유사하였다(Fig. 2). 조사기간 평균 연강수량은 1,222 mm이었고, 시기별 강수량은 봄과 가을, 겨울에는 강수량이 매우 적고 여름에 매우 높았다. 강수량은 홍수기인 6~9월에 집중됨으로써, 한해 누적강수량의 55~79%를 차지하였다. 연도별 강수량은 2011년에 1,640 mm으로 가장 많았고, 2014년에 704 mm로 가장 적었다. 특히 2014년과 2015년은 100 mm 이상의 일 강수량이 없는 것으로 기록되었으며, 연강수량이 800 mm이하로 다른 해에 매우 적었다(Fig. 2).

조사기간 동안 청평호의 연평균 수온은 15.2~18.8 °C의 범위로 조사되었다. 강우와 일사량의 감소는 수온의 감소를 유발하나 2015년은 연중 강우 빈도나 강수량이 적어 다른 해에 비해 2°C이상 높은 수온을 기

록하였다. 용존산소는 수온 변동과 반대 양상이었으며, 연도별 평균값은 10.3~12.2 mg/L의 범위였다(Table 2). 전기전도도는 연평균이 86~140 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위였다. 여름 강우가 있었던 2008년~2013년은 전기전도도가 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 이하로 대체로 낮았다. 강수량이 적었던 2014년과 2015년은 각각 112 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 과 125 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 다른 해에 비해 높았으며, 2016년도 강우이전에 높은 전기전도도를 나타내었다. 온대호수에서 전기전도도는 강수량과 음의 상관관계로 강우에 의해 희석되는 효과를 보이며(Delpla et al., 2009; Park and Shin, 2011), 대청호의 연구에서도 가뭄의 영향으로 전기전도도가 이전 해에 비해 높게 나타난 사례가 있다(An et al., 2001).

청평호에서 클로로필 *a*의 연평균 농도는 3.4~17.5 mg/m^3 이었고, 지점별 큰 차이는 보이지 않았다. BOD는 강우가 적었던 2014년과 2015년에 1.0 mg/L 이하로 다른 연도에 비해 낮은 농도를 보였다(Fig. 3). TP 연평균은 0.010~0.039 mg/L 의 범위였고 조사기간 평균은 0.021 mg/L 이었다. DTP는 조사기간 평균 농도 0.009 mg/L 이고 0.005~0.015 mg/L 으로 조사되었다. TN은 연평균의 농도변화가 1.465~2.105 mg/L 이었고, DTN은 1.393~1.870 mg/L 이었다. TP는 평균 농도가 0.021 mg/L 으로 중영양상태(mesotrophic)이나 TN의 평균 농도는 1.817 mg/L 으로 부영양상태(eutrophic)로 조사되었다(Forsberg and Ryding, 1980). 청평호의 강수량과 환경요인간의 상관관계 분석결과

Table 2. Annual changes of environmental factors in Lake Cheongpyeong at studied sites

Year	Site	W.T (°C)	DO (mg/L)	Transp. (m)	Cond. (µS/cm)
2008	CPD1	16.2	11.6	1.6	92
	CPD2	15.4	12.0	1.2	88
2009	CPD1	15.2	11.0	1.7	86
	CPD2	14.8	11.3	1.3	82
2010	CPD1	16.3	11.0	2.0	91
	CPD2	15.5	11.7	1.8	90
2011	CPD1	16.1	11.0	2.1	92
	CPD2	14.7	11.7	1.6	86
2012	CPD1	16.0	10.9	2.1	97
	CPD2	16.8	10.8	1.5	94
2013	CPD1	16.1	12.2	1.7	88
	CPD2	15.9	12.1	1.6	82
2014	CPD1	18.8	10.5	2.2	106
	CPD3	19.7	10.4	2.2	109
2015	CPD1	18.1	10.3	3.2	125
	CPD3	18.4	10.1	3.0	128
2016	CPD1	17.3	10.3	2.8	138
	CPD3	16.9	10.3	2.6	140

W.T; Water Temperature, Transp.; Transparency, Cond.; Conductivity

에서 수온은 강수량과 양의 상관관계를 나타냈으나 (Table 3), 몬순기후로 수온이 높은 여름철에 강수량이 많아졌을 뿐 계절적인 수온의 변동에 직접적인 영향은 없는 것으로 판단된다. 영양염류(TP, DTP, TN, DTN)는 강수량과 모두 유의한 수준에서 양의 상관관계를 보였으며, 여름철 강우에 의해 유입하천 유입량의 증가와 유역의 점오염원이 유입되어 영양염류가 증가했기 때문으로 판단된다.

3.2. 시기별 식물플랑크톤의 변동 및 천이

조사 기간 동안 청평호의 식물플랑크톤 세포수는 242~11,610 cells/mL이었으며, 평균 3,029 cells/mL이었다(Fig. 4). 시기별 식물플랑크톤의 변동은 봄철(3월~5월) 식물플랑크톤의 평균 세포수는 4,562 cells/mL으로 전체 세포수의 약 52%를 차지하여 봄철에 생물량이 집중되었다. 식물플랑크톤의 생물량은 수온, 영양염 등에 의해 좌우될 뿐만 아니라 일시적으로 집중

된 강우에 의해 생물량이 낮아진다(Lee et al., 2005). 청평호의 식물플랑크톤 총 세포수는 강수량과 음의 상관관계($r=-0.231$, $p<0.05$, $n=86$)이며, 여름철 강우는 영양염류 농도를 증가시켜 조류증식에 영향을 미칠 가능성을 지니고 있으나 강우로 인한 유량의 증가는 수체의 수온저하 및 빠른 유속을 유발하여 식물플랑크톤 증식을 저해하였다. 가을철은 강우 이후 유입된 영양염류와 수체가 안정되어 식물플랑크톤의 세포수가 회복되는 특징을 나타냈다. 이와 같은 특성으로 청평호의 식물플랑크톤의 발생양상은 봄과 초가을에 생물량이 높고 여름과 겨울에 낮은 출현양상을 보였다.

조사기간 동안 청평호에서 출현한 식물플랑크톤 분류군의 계절별 점유율은 규조류가 54.1~82.8%로 다른 분류군에 비해 가장 높았으며, 모든 계절에서 높은 점유율이 확인되었다. 녹조류는 4.2~11.9%로 낮았고, 남조류는 0.0~20.4%였으며, 기타조류는 12.2

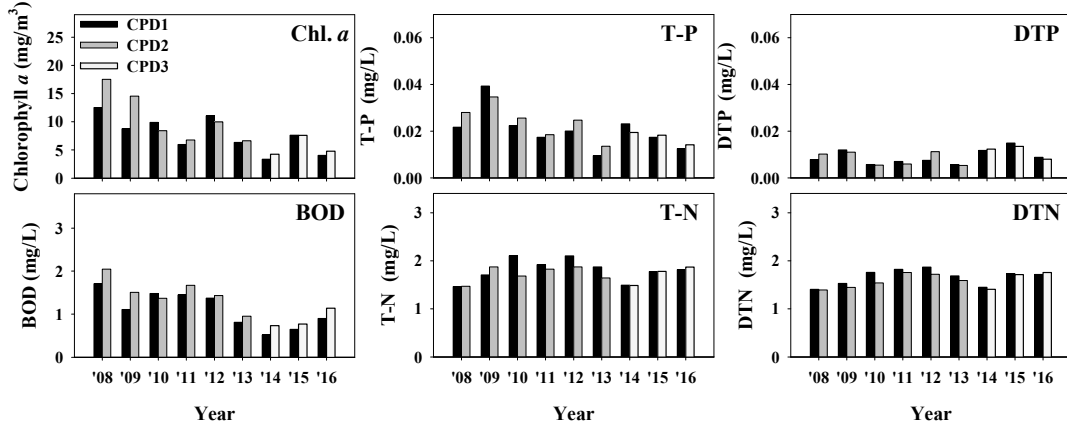


Fig. 3. Annual changes of water quality factors in Lake Cheongpyeong at studied sites.

~18.2%로 계절 간 큰 차이를 보이지 않았다(Fig. 5). 청평호에서 규조류는 연중 내내 많은 세포수를 보여 주요 우점 분류군으로 출현하였다. 규조류는 수온과 음의 상관관계($r=-0.263$, $p<0.01$, $n=171$)를 보였으며, 수온이 비교적 낮은 봄과 가을철에 많은 세포가 발생하였다(Fig. 4). 규조류의 봄철 높은 발생은 겨울에 얼어 있던 수체가 해빙되면서 수온과 광투과도의 증가로 인해 *Stephanodiscus* 등 냉수성 소형규조류가 빠르게 증식한 것이 원인으로 판단된다(Kim, 1996). 가을철 규조류의 증가는 강우 후 수체가 안정되고 상류에서 유입되어 증가된 영양염류의 영향을 받은 것으로 사료된다. 온대호수에서 녹조류는 규조류의 발생 이후 여름철에 증가하는 경향이 있다(Sze, 1998). 본 연구에서 녹조류는 수온과 양의 상관관계($r=0.218$, $p<0.01$, $n=171$)로 다른 시기에 비해 초여름과 가을에 많이 발생하였으나, 여름철 평균 세포수는 320 cells/mL로 우점을 할 정도의 세포수를 보이지는 않았다(Fig. 4, 5(a)). 남조류의 세포수는 수온과는 양의 상관관계로 수온이 증가한 여름철에 많았다. 남조류의

점유율 또한 여름철에 주로 높았으나, 이례적으로 *Anabaena* 등을 포함한 남조류가 2011년에는 수온이 15°C이하로 감소한 11월에도 최대 3,455 cells/mL (CPD2)으로 출현하였다. 기타조류는 일부 봄과 겨울에 높은 세포수를 보였으나 수온과 크게 관계없이 일정한 비율로 연중 내내 발생하였다.

3.3. 우점종의 시기별 천이 양상

청평호 세 지점에서 5%이상의 세포수를 보인 우점종은 *Asterionella formosa* (18%), *Fragilaria crotonensis* (14%), *Stephanodiscus hantzschii* (11%), *Aulacoseira granulata* (11%), *Rhodomonas* spp. (8%), *Anabaena* spp. (5%)였으며, 시기별로 다른 증식패턴과 발생량이 조사되었다. 우점종의 천이는 수온이 낮은 시기인 봄에 *S. hantzschii*을 시작으로 *A. formosa*, *F. crotonensis*로 규조류 간의 천이를 나타내었다. 남조류인 *Anabaena* spp.는 여름철에 주로 출현을 하였으며, 가을철에는 규조류인 *Aul. granulata*가 우점종이었다. 기타조류인 *Rhodomonas* spp.는 전

Table 3. Pearson correlation matrix between precipitation and environmental factors at site CPD1 in lake Cheongpyeong

Parameters	W.T (°C)	DO (mg/L)	Cond. (µS/cm)	TP (mg/L)	DTP (mg/L)	TN (mg/L)	DTN (mg/L)	Phyto. (cells/mL)
Precipitation	0.325**	-	-	0.297**	0.371**	0.251*	0.345**	-0.231*

* $p<0.05$, ** $p<0.01$, $n=86$, Phyto.: Total phytoplankton cell density

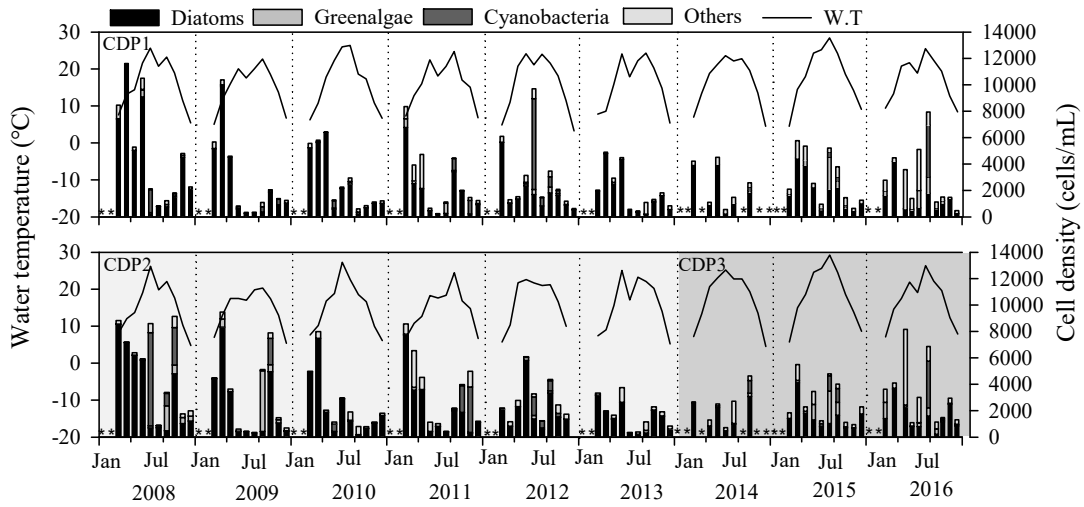


Fig. 4. Monthly variation of water temperature and phytoplankton communities in Lake Cheongpyeong from 2008 to 2016 (*: no sampling).

시기에 걸쳐 출현하였다(Fig. 6).

청평호의 우점종 중에서 *Stephanodiscus hantzschii*는 국내 부영양화된 수계에서 주로 많이 나타나며, 늦가을부터 이듬해 봄까지 반복적으로 높은 발생을 보인다(Cho et al., 1998; Youn et al., 2010). *S. hantzschii*는 수온이 낮은 시기부터 우점종으로 출현하여 봄(3월~4월)에 높은 발생을 보였으나, 수온이 높아진 여름과 가을에는 출현하지 않았다(Fig. 6). *S. hantzschii*의 배양실험결과, 최적 성장 수온은 10°C 이하였으며, 15°C, 20°C에서는 성장이 낮았다(Jung et al., 2011). 본 연구에서 *S. hantzschii*는 3.3~24.7°C의

수온에서 출현하였으나, 4.5~15.0°C의 낮은 수온범위에서 500 cells/mL 이상의 높은 세포수를 나타내었다(Fig. 7). 또한 수온이 10°C 이하였던 3월에 최대 5,000 cells/mL 이상으로 가장 많은 세포수를 기록하였다. *S. hantzschii*의 발생은 약 90%가 3~4월 사이에 나타나며, 수온이 증가하는 5월부터 감소하여 낮은 수온($r=-0.312, p<0.01, n=171$)을 선호하는 것으로 판단되었다(Table 4).

조사지점에서 *Asterionella formosa*는 수온이 낮은 3월부터 5월까지 많은 세포수를 보여 청평호에서 봄철 우점종으로 조사되었다. *A. formosa*는 온대기후의

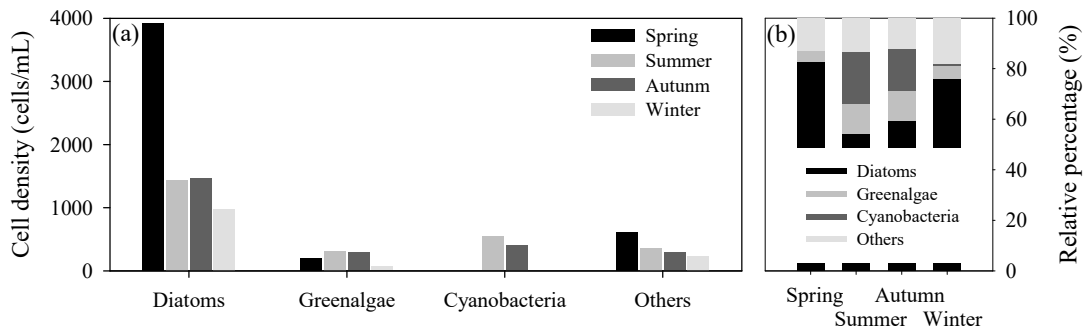


Fig. 5. Seasonal variation of (a) cell density and (b) relative abundance in Lake Cheongpyeong.

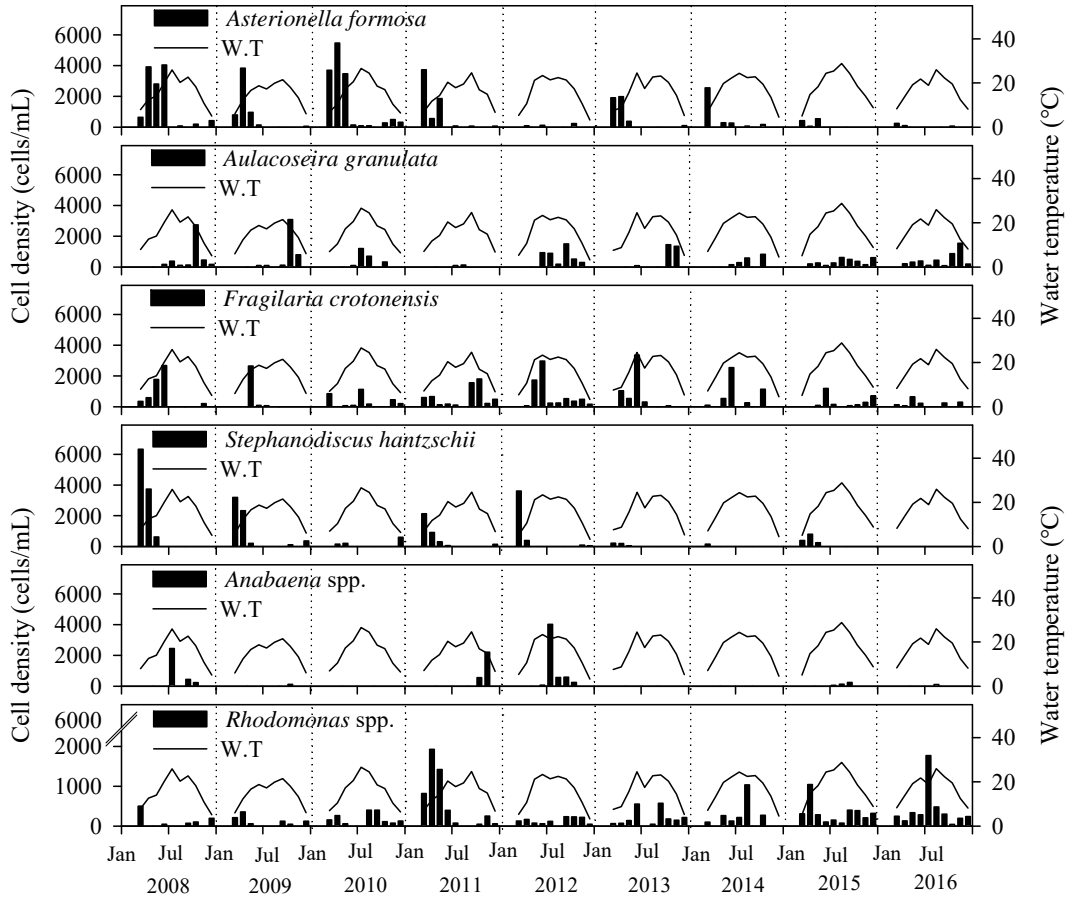


Fig. 6. Monthly variation of six dominant species with water temperature from 2008 to 2016.

호수에서 자주 출현하는 종으로 봄철에 생물량이 높고(Krivtsov et al., 2000; Reynolds et al., 2002), 수온 변화에 영향을 받는다(Suzuki and Takahashi, 1995). 특히 다른 조류에 비해 낮은 수온에 저항성을 지니므로 낮은 수온에서도 성장이 활발한 경향이 있다(Vaconcelos, 1991). Bertrand et al.(2003)의 연구에서 온대 수계 중 *A. formosa* 출현은 2.6~19°C의 수온 범위에서 주로 발생하는 것으로 보고되었으며, 국내의 경우에 수온이 낮은 겨울철과 봄철에 주로 우점하는 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2001; Kim, 2012). 본 연구에서는 수온과 음의 상관관계였으며(Table 4), 500 cells 이상의 세포수를 보인 수온 범위는 5.4~21.6°C로 조사되어 선행연구 결과와 유사한 범위를

나타내었다(Fig. 7). *A. formosa*의 감소는 수온의 증가 뿐만 아니라 규소 농도의 고갈 등에 의해 야기될 수 있다고 알려져 있다(Tilman and Kilham, 1976; Bertrand et al., 2003). 조사 기간 동안 *A. formosa*는 5월~6월 이후 급격한 세포수의 감소하였다(Fig. 6). 본 연구에서 규소 농도는 조사되지 않았으나, 봄철에 *S. hantzschii*나 *A. formosa*와 같은 규조류의 대발생은 수체 내의 규소를 급격히 고갈시켜(Krivtsov et al., 2000; Jung et al., 2009) 6월 이후 규소 농도에 민감성을 지닌 *Asterionella*의 감소를 유발한 것으로 판단된다.

*Asterionella*의 발생이 줄어든 후 *Fragilaria crotonensis*로 천이되는 양상이 확인되었다. *F.*

Table 4. Pearson correlation matrix between physico-chemical factors and dominant species at studied site in lake Cheongpyeong

Phytoplankton groups	W.T (°C)	DO (mg/L)	Cond. (µS/cm)	TP (mg/L)	DTP (mg/L)	TN (mg/L)	DTN (mg/L)
<i>A. formosa</i>	-0.312**	0.331**	-0.208**	-	-0.175*	-	-
<i>F. crotonensis</i>	0.182*	-	-	-0.176*	-0.193*	-0.156*	-0.165*
<i>S. hantzschii</i>	-0.371**	0.416**	-	-	-	-	-
<i>Aul. granulata</i>	0.199**	-0.218**	-	0.222**	-	-	-
<i>Rho. spp.</i>	-	-	0.206**	-	-	-	0.189*
<i>Anabaena spp.</i>	0.150**	-	-	0.268**	-	-	-

* p<0.05, ** p<0.01, n=171, A; *Asterionella*, F; *Fragilaria*, S; *Stephanodiscus*, Aul; *Aulacoseira*, Rho; *Rhodomonas*

*crotonensis*는 부영양화된 온대 기후의 호수에서 자주 출현하는 종으로 다른 규조류에 비해 비교적 침강률이 높기 때문에(Horn and Horn, 1993) 상층부에서 계속 머무르기 위해서는 수체의 혼합이 필요하며, 성장에 효율적인 광량을 얻기 위해 낮은 탁도가 요구된다(Hartig, 1987). 또한 Řimov 호수에서 *F. crotonensis*는 7월에 높은 발생을 보이고 여름 장마 이후 유입된 영양염에 의해 두 번째 증식을 보이며, 높은 Si:P 비에 의해 발생이 증가된다고 조사되었다(Znachor et al., 2008). 본 연구에서 *F. crotonensis*는 *A. formosa*와 4월부터 혼재하여 출현하다가 청수현상으로 물이 맑아져 투명도가 증가한 5월과 6월에 최대 4,200 cells/mL (2013년)로 발생이 높았다(Fig. 6). 여름에 거의 출현하지 않다가 강우기 이후 수체가 안정되고 성층이 약해진 가을(9월~10월)에도 일부 증식하였다. *F. crotonensis*는 증식하기 위해 인보다는 높은 질소 농도가 요구된다고 보고되었으나(Saros et al., 2005) 본 연구에서는 인과 질소 모두와 음의 상관관계로 나타내고 *Stephanodiscus*와 *Asterionella*가 발생하여 영양염을 소비한 이후 높은 출현을 보여 다른 우점종에 비해 낮은 영양염을 선호하는 것으로 판단되었다(Table 4).

*Aulacoseira granulata*는 부영양화 수계에서 지표종으로 활용되며 수온이 낮은 시기보다 높은 시기에 출현을 더 많았으며(Tsakada et al., 2006; Wang et al., 2009), 국내에서도 한강이나 낙동강 수계 등의 하천이나 호소에서 가을에 출현하는 것으로 알려져 있다(Kim, 1998; Youn et al., 2010; Son, 2013). 본 연구에

서 *Aul. granulata*는 500 cells 이상의 세포수를 보인 수온 범위는 8.6~28.4°C로 조사되었으며, 수온이 높은 시기에 주로 출현하여 강우기 직후인 9월과 10월에 많이 발생하고 12월까지 지속적으로 발생하였다(Fig. 6). *Aul. granulata*는 TP와 유의한 양의 상관관계가 확인되었으며, 500 cells/mL 이상 세포수를 보인 TP의 농도는 최소 0.004 mg/L에서 최대 0.089 mg/L으로 조사되어 *Aul. granulata*가 다른 종보다 높은 농도를 선호하는 것으로 판단되었다(Fig. 7, Table 4). Wang et al.(2009)에 의하면 수온이 높은 시기(봄이나 가을)에 이 규조류가 우점하는 원인은 첫째로 이 시기에 주로 빛의 세기(light intensity)가 강해서 활발한 광합성을 할 수 있기 때문이며, 둘째는 강우 시 유입된 영양염류에 의해 높은 발생이 일어날 수 있는 것으로 보고되어 본 연구결과를 뒷받침해 주었다.

*Anabaena*는 14~23°C에서 발아되어 수온이 15°C 이상 증가하면 발생이 높아지며, 일부 종은 anatoxin과 같은 독소를 생산할 수 있다(Tsujimura and Okubo, 2003; Becker et al., 2010). 본 연구에서 *Anabaena spp.*는 20°C 이상 수온이 상승된 여름(6월~8월)에 주로 출현하였으며, 500 cells/mL 이상의 세포수를 보인 수온 범위는 14.9~26.2°C로 조사되었다. 그러나 2011년은 수온이 낮아진 11월과 12월에도 많은 세포수를 보이며 출현하였다(Fig. 6). 청평호의 하류 호수인 팔당호에서도 2004년에 여름이 아닌 수온이 낮은 늦가을(11월)에 *Anabaena*가 1,000 cells/mL 이상의 발생이 있었으며(Park et al., 2005), 2011년 11~12월 저온수기(4~15°C)에 *Anabaena*의 증식은 다른 연도에

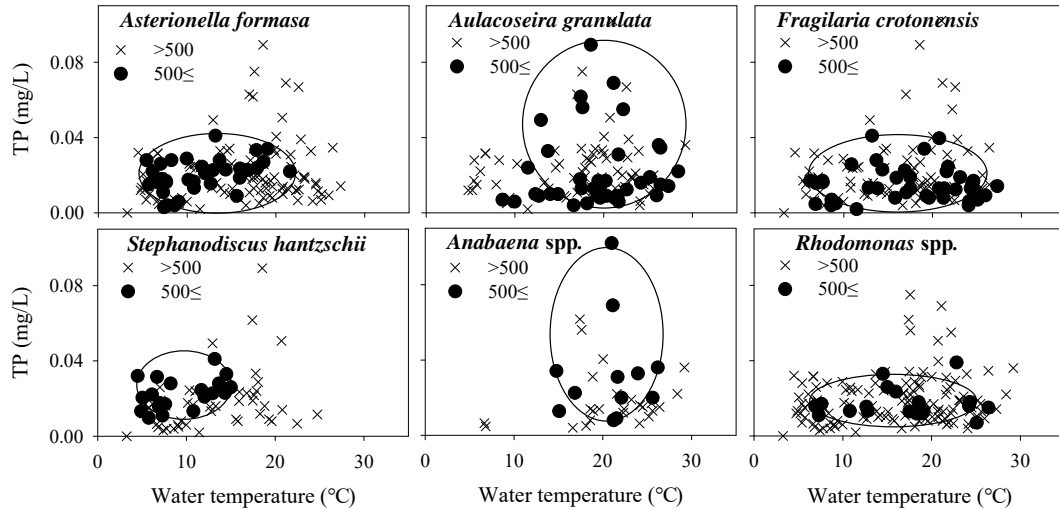


Fig. 7. Relationship between water temperature and TP concentration of six dominant species in Lake Cheongpyeong.

비해 높은 수온, 체류시간 증가 등과 같은 수환경 변화가 영향을 미친 것으로 판단된다(You et al., 2013). *Anabaena*는 고수온을 선호할 뿐만 아니라 N/P 비가 낮으면 발생이 증가하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 500 cells/mL 이상 세포수를 보인 *Anabaena*는 0.008~0.102 mg/L의 TP농도 범위에서 출현하였으며(Fig. 7), TP와 양의 상관관계로 높은 TP농도에서 많이 발생하여 높은 수온과 적절한 농도의 인이 주어 진다면 언제든지 증식할 가능성을 나타내었다.

은편모조류는 겨울동안 얼음 밑이나 연이는 봄에 수적인 증가가 일어나며(Stewart and Wetzel, 1986), 은편모조류 중 *Rhodomonas*는 담수 호수에서 때때로 수온이 낮은 봄에 높은 발생을 나타낸다(Graham et al., 2009). 본 연구에서 은편모조류인 *Rhodomonas* spp.는 전 시기에 걸쳐 고르게 출현하였으며, *Rhodomonas*의 출현 수온 범위는 3.3~29.2°C이었다(Fig. 7). 그러나 주로 봄에 세포수가 많았으며, 2011년 4월과 5월에는 1,000 cells/mL 이상의 많은 발생을 보였다(Fig. 6). *Rhodomonas*는 국내 임하호에서도 2월에 우점종으로 출현한 적이 있으며, 낮은 수온과 적은 광량에서도 증식이 가능하다고 보고되었다(Hammer et al., 2002; Lee et al., 2002). 이번 연구에서 *Rhodomonas*의 봄철 높은 발생은 배양 실험이나 다른 환경요인의 연관성

을 조사하여 추가적인 연구가 필요하다고 판단되어진다.

4. 결론

본 연구에서는 2008년부터 2016년까지 북한강 수계의 청평호에서 9년간 식물플랑크톤의 군집의 변동과 우점종의 천이를 조사하였고, 호수의 수리수문학적 요인과 이화학적 요인이 식물플랑크톤 군집 및 우점종에 미치는 영향을 평가하였다.

1) 청평호에서 연도별 누적 강수량은 704~1,640 mm으로 2011년에 가장 많았다. 강수량은 전체 강수량의 55% 이상이 여름철에 집중되었다. 평균 수온 범위는 15.2~18.8°C, 용존산소는 10.3~12.2 mg/L였다. 전기전도도는 86~140 μ S/cm로 조사되었으며, 강수량이 적었던 2014년과 2015년은 전기전도도가 다른 해에 비해 높았다.

2) 청평호의 TP는 평균 0.021 mg/L으로 중영양상태를, TN는 평균 1.817 mg/L으로 부영양상태로 조사되었다. 청평호의 영양염류는 강수량과 양의 상관관계로 강우에 의해 외부로부터 유입되어 증가한 것으로 판단되었다.

3) 식물플랑크톤 생물량은 봄과 가을에 높은 출현양상이 조사되었다. 분류군별 발생량은 수온에 영향

을 크게 받았으며, 규조류는 봄과 가을에 최대로 발생하였다. 녹조류는 규조류 발생 이후 초여름에 주로 출현하였다. 남조류는 높은 수온을 선호하였으며, 기타 조류는 연중 내내 출현하는 특성을 나타냈다.

4) 청평호의 우점종 발생 특징은 *Stephanodiscus hantzschii*와 *Asterionella formosa*는 수온이 낮은 봄에서 주로 출현하였다. *Fragilaria crotonensis*는 낮은 영양염을 선호하였으며, *Aulacoseira granulata*와 *Anabaena* spp.는 수온 및 TP와 양의 상관관계로 보여 높은 수온과 인의 영향을 받는 것으로 예상된다. *Rhodomonas* spp.는 전 시기에 걸쳐 출현하였으며, 봄에 가장 많은 세포수가 조사되었다.

REFERENCES

- An, K. G., Seo, J., Park, S. S., 2001, Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological conditions near the intake tower of Taechung reservoir, Korean J. Ecol. Environ., 34(4), 327-336.
- Becker, V., Ihara, P., Yunes, J. S., Huszar, V. L. M., 2010, Occurrence of anatoxin-a(s) during a bloom of *Anabaena crassa* in a water-supply reservoir in southern Brazil, J. Appl. Phycol., 22(3), 235-241.
- Bertrand, C., Fayolle, S., Franquet, E., Cazaubon, A., 2003, Responses of the planktonic diatom *Asterionella formosa* Hassall to abiotic environmental factors in a reservoir complex (south-eastern France), Hydrobiologia, 501(1), 45-58.
- Byun, J. H., Cho, I. H., Hwang, S. J., Park, M. H., Byeon, M. S., Kim, B. H., 2014, Relationship between a dense bloom of cyanobacterium *Anabaena* spp. and rainfalls in the North Han River system of South Korea, Korean J. Ecol. Environ., 47(2), 116-126.
- Chang, C. W., Shiah, F. K., Wu, J. T., Miki, T., Hsieh, C. H., 2014, The role of food availability and phytoplankton community dynamics in the seasonal succession of zooplankton community in a subtropical reservoir, Limnologia, 46, 131-138.
- Cho, K. J., Shin, J. K., Kwak, S. K., Lee, O. H., 1998, Diatom genus *Stephanodiscus* as eutrophication indicator for water quality assessment, Korean J. Ecol. Environ., 31(3), 204-210.
- Chung, J., 1993, Illustration of the freshwater algae of Korea, Academy Publishing Company, Seoul, Korea.
- Delpla, I., Jung, A. V., Baures, E., Clement, M., Thomas, O., 2009, Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production, Environ. Int., 35(8), 1225-1233.
- Forsberg, C., Ryding, S. O., 1980, Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes, Arch. Hydrobiol., 89, 189-207.
- Graham, L. E., Graham, J. M., Wilcox, L. W., 2009, *Algae*, 2nd edition, Benjamin Cumming, New York, 19-169.
- Guo, Q., Ma, K., Yang, L., Cai, Q., He, K., 2010, A Comparative study of the impact of species composition on a freshwater phytoplankton community using two contrasting biotic indices, Ecol. Indic., 10(2), 296-302.
- Habib, O. A., Tippet, R., Murphy, K. J., 1997, Seasonal changes in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in loch lomond, Scotland, Hydrobiologia, 350(1), 63-79.
- Hammer, A., Schumann, R., Schubert, H., 2002, Light and temperature acclimation of *Rhodomonas salina* (Cryptophyceae): Photosynthetic performance, Aquat. Microb. Ecol., 29(3), 287-296.
- Hartig, J. H., 1987, Factors contributing to development of *Fragilaria crotonensis* Kitton Pulses in Pigeon Bay waters of western lake Erie, J. Great Lakes Res., 13(1), 65-77.
- Hirose, H. M., Akiyama, T., Imahori, K., Kasaki, H., Kumano, S., Kobayashi, H., Tajahashi, E., Tsumura, T., Hirano, M., Yamagishi, T., 1977, Illustrations of the Japanese freshwater algae, Uchidarokakuho Publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan.
- Horn, H., Horn, W., 1993, Sedimentary losses in the reservoir Saldenbach : Flux and sinking velocities of dominant phytoplankton species, Int. Rev. Hydrobiol., 78(1), 39-57.
- Jeong, E. J., Na, J. E., Kim, G. M., Shim, S. S., Lee, H. Y., 2010, Water temperature and community of phytoplankton in Youngsan River, Korea, Korea J. Environ. Biol., 28(2), 56-63.
- John, D. M., Whitton, B. A., Brook, A. J., 2002, The freshwater algal flora of the British Isles, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jung, S. W., Joo, H. M., Kim, Y. O., Lee, J. H., Han, M. S., 2011, Effects of temperature and nutrient depletion

- and reintroduction on growth of *Stephanodiscus hantzschii* (Bacillariophyceae): Implications for the blooming mechanism, *J. Freshwater Ecol.*, 26(1), 115-121.
- Jung, S. W., Kwon, O. Y., Lee, J. H., Han, M. S., 2009, Effects of water temperature and silicate on the winter blooming diatom *Stephanodiscus hantzschii* (Bacillariophyceae) growing in eutrophic conditions in the lower Han River, South Korea, *J. Freshwater Ecol.*, 24(2), 219-226.
- Kim, B. C., Park, J. H., Hae, W. M., Lim, B. J., Hwang, G. S., Choi, K. S., Choi, J. S., 2001, The limnological survey of major lakes in Korea (4) : Lake Juam, *Korean J. Ecol. Environ.*, 30(1), 30-44.
- Kim, B. C., Park, J. H., Hwang, G. S., Choi, K. S., 1997, Eutrophication of large freshwater ecosystems in Korea, *Korean J. Ecol. Environ.*, 30(suppl.), 512-517.
- Kim, H. S., 2012, The dynamic of phytoplankton community in Unmun dam, *Korean J. Ecol. Environ.*, 45(2), 232-241.
- Kim, Y. J., 1996, Ecological study of phytoplankton community and trophic states using indicators in lake Paltang, *Korean J. Ecol. Environ.*, 29(4), 323-345.
- Kim, Y. J., 1998, Ecological characteristics of phytoplankton community in lake Paltang dam, *Korean J. Ecol. Environ.*, 31(3), 225-234.
- Kim, Y. J., Kim, M. K., Lee, S. D., 2012, Identification of autumn phytoplankton in the lakes of Han River system, *JWR*, 14(3), 429-438.
- Krivtsov, V., Bellinger, E. G., Sigee, D. C., 2000, Changes in the elemental composition of *Asterionella formosa* during the diatom spring bloom, *J. Plankton Res.*, 22(1), 169-184.
- Lee, J. H., Park, J. G., Kim, E. J., 2002, Trophic states and phytoplankton compositions of dam lakes in Korea, *Algae*, 17(4), 275-281.
- Lee, Y. J., Jung, J. M., Shin, P. S., Joo, G. J., 2005, Daily variation of phytoplankton and water quality in the lower Nakdong River, *Algae*, 20(1), 133-140.
- Ministry of Environment (MOE), 2016, Standard method for the examination of water pollution, Ministry of Environment.
- Moss, B., Balls, H., 1989, Phytoplankton distribution in a floodplain lake and river and river system, II, seasonal changes in the phytoplankton communities and their control by hydrology and nutrient availability, *J. Plankton Res.*, 11(4), 839-867.
- Park, H. K., Jheong, W. H., 2003, Long-term change of algal growth in lake Paldang, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 19(6), 673-684.
- Park, H. K., Jheong, W. H., Kwon, O. S., Ryu, J. K., 2000, Seasonal succession of toxic cyanobacteria and microcystins concentration in Paldang reservoir, *Algae*, 15(1), 29-35.
- Park, H. K., Lee, H. J., Kim, E. K., Jung, D. I., 2005, Characteristics of algal abundance and statistical analysis of environmental factors in lake Paldang, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 21(6), 2005.
- Park, S. M., Shin, Y. K., 2011, The impact of monsoon rainfall on the water quality in the upstream watershed of southern Han River, *J. Ecol. Environ.*, 44(4), 373-384.
- Pennock, J. R., Sharp, J. H., 1994, Temporal alternation between light and nutrient-limitation of phytoplankton production in a coastal plain estuary, *Mar. Ecol.-Prog. Ser.*, 111(3), 275-288.
- Reynolds, C. S., Huszar, V., Kruk, C., Naselli-Flores, L., Melo, S., 2002, Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton, *J. Plankton Res.*, 24(5), 417-428.
- Saros, E., Michel, T. J., Interlandi, S. J., Wolfe, A. P., 2005, Resource requirements of *Asterionella formosa* and *Fragilaria crotonensis* in oligotrophic alpine lakes: Implications for recent phytoplankton community reorganizations, *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 62(7), 1681-1689.
- Seo, D. I., Nam, G. S., Lee, S. H., Lee, E. H., Kim, M., Choi, J. Y., Kim, J. H., Chang, K. H., 2013, Plankton community in weir section of the Nakdong river and its relation with selected environmental factors, *Korea J. Environ. Biol.*, 31(4), 362-369.
- Shin, J. K., Cho, K. J., Oh, I. H., 1999, Dynamics of water environmental factors and phytoplankton in Taechong reservoir, *Korea J. Environ. Biol.*, 31(4), 362-369.
- Shin, J. K., Hwang, S. J., Kang, C. K., Kim, H. S., 2003, Limnological characteristics of the river-type Paltang reservoir, Korea: Hydrological and environmental factors, *Korean J. Ecol. Environ.*, 17(4), 529-541.
- Son, H. J., 2013, The analysis of phytoplankton community structure in the middle-lower part of the

- Nakdong river, J. of Kor. Soc. Environ. Eng., 35(6), 430-435.
- Soylu, E. N., Gönülol, A., 2010, Functional classification and composition of phytoplankton in Liman lake, Turk. J. Fish. Aquat. Sc., 10(1), 53-60.
- Stewart, A. J., Wetzel, R. G., 1986, Cryptophytes and other microflagellates as couplers in planktonic community dynamics, Arch. Hydrobiol., 106(1), 1-19.
- Suzuki, Y., Takahashi, M., 1995, Growth responses of several diatom species isolated from various environments to temperature, J. Phycol., 31(6), 880-888.
- Sze, P., 1998, A Biology of the algae, 3rd edition, Mcgraw-Hill College, New York, USA.
- Tilman, D., Kilham, S. S., 1976, Phosphate and silicate growth and uptake kinetics of the diatoms *Asterionella formosa* and *Cyclotella meneghiniana* in batch and semicontinuous culture, J. Phycol., 12(4), 375-383.
- Toman, M. J., 1996, Physico-chemical characteristics and seasonal changes of phytoplankton communities in a river reservoir, Lakes Reserv. Res. and Manage., 2(1-2), 71-76.
- Tsujimura, S., Okubo, T., 2003, Development of *Anabaena* blooms in a small reservoir with dense sediment akinete population, with special reference to temperature and irradiance, J. Plankton Res., 25(9), 1059-1067.
- Tsukada, H., Tsujimura, S., Nakahara, H., 2006, Seasonal succession of phytoplankton in lake Yogo over 2 years: Effect of artificial manipulation, Limnology, 7(1), 3-14.
- Uhm, S. H., Hwang, S. J., 2006, Grazing relationship between phytoplankton and zooplankton in lake Paldang ecosystem, Korean J. Ecol. Environ., 39(3), 390-401.
- Vasconcelos, V. M., 1991, Species composition and dynamics of the phytoplankton in a recently commissioned reservoir (Azibo-Portugal), Arch. Hydrobiol., 121(1), 67-78.
- Wang, C., Li, X., Lai, Z., Tan, X., Pang, S., Yang, W., 2009, Seasonal variations of *Aulacoseira granulata* population abundance in the Pearl river estuary, Estuar. Coast. Shelf S., 85(4), 585-592.
- Wu, N., Schmalz, B., Fohrer, N., 2011, Distribution of phytoplankton in a German Lowland river in relation to environmental factors, J. Plankton Res., 33(5), 807-820.
- You, K. A., Byeon, M. S., Youn, S. J., Hwang, S. J., Rhew, D. H., 2013, Growth characteristics of blue-green algae(*Anabaena spiroides*) causing tastes and odors in the North-Han river, Korea, Korean J. Ecol. Environ., 46(1), 135-144.
- Youn, S. J., Park, H. K., Shin, K., 2010, Dynamics of phytoplankton communities of major dam reservoirs in Han river system, J. Korean Soc. Water Environ., 26(2), 317-325.
- Znavor, P., Zapomělová, E., Řeháková, K., Nedoma, J., Šimek, K., 2008, The effect of extreme rainfall on summer succession and vertical distribution of phytoplankton in a lacustrine part of a eutrophic reservoir, Aquat. Sci., 70(1), 77-86.