

주암호 유해남조류 출현양상과 환경요인 변화

정현수, 손미선, 류희성, 박창희, 이루리¹, 조미선, 임채홍, 박종환, 김경현*

국립환경과학원 영산강물환경연구소, ¹국립환경과학원 금강물환경연구소

Variation of cyanobacteria occurrence pattern and environmental factors in Lake Juam

Hyeonsu Chung, Misun Son, Hui-Seong Ryu, Chang Hee Park, Rury Lee¹, Misun Cho, Chaehong Lim, Jonghwan Park and Kyunghyun Kim*

Yeongsan River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Gwangju 61011, Republic of Korea

¹Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Okcheon 29027, Republic of Korea

*Corresponding author

Kyunghyun Kim

Tel. 062-970-3901

E-mail. matthias@korea.kr

Received: 7 October 2019

Revised: 28 November 2019

Revision accepted: 2 December 2019

Abstract: The study analyzed the relationship between harmful cyanobacteria and physicochemical factors in Lake Juam from 2005 to 2018. The research locations were designated St. 1 (Juam-Dam) and St. 2 (Sinpyong). Harmful cyanobacteria was found in four genera (*Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Oscillatoria* sp.). The average standing crops of harmful cyanobacteria in both locations were 2,575 cells mL⁻¹ and 2,557 cells mL⁻¹ from 2005 to 2011. Since 2012, there has been a significant decrease that the measurements were 42 cells mL⁻¹ and 82 cells mL⁻¹ from 2012 to 2018. To analyze the reason for the decrease in harmful cyanobacteria, Pearson's correlation and t-tests were performed on data collected during the summer period (June–September). Pearson's correlation showed a significantly positive correlation with total nitrogen (TN), outflow, and storage and a negative correlation with electrical conductivity. T-tests were conducted in two different periods and showed decreases in total nitrogen, electrical conductivity, and residence time. The average rainfall was decreased from 263.3 mm (2005–2011) to 219.9 mm (2012–2018) and total nitrogen was decreased from 0.912 mg L⁻¹ (2005–2011) to 0.811 mg L⁻¹ (2012–2018) and the same variability was seen in TP (total phosphorus). Therefore, it seems that the low-rainfall decreased the nutrients (TN) and variability in the TP, resulting in a decrease in harmful cyanobacteria in Lake Juam.

Keywords: harmful-cyanobacteria, decrease, pearson correlation, t-test

서 론

하절기 동안, 담수생태계에서 식물플랑크톤의 구성은 일반적으로 남조류에 의해 우점되며, 이러한 현상을 밝히

기 위한 많은 연구가 전 세계적으로 수행되어 왔다(Paerl *et al.* 2014; Harke *et al.* 2016). 선행연구를 통하여, CO₂ 농도 (van de Waal *et al.* 2011) 및 N/P ratio (Oh and Rhee 1991), 수온 (Lomas and Gilbert 1999) 등과 같은 화학적 요인과

호소의 형상 (Park *et al.* 2013; Lee *et al.* 2016), 물의 운동 (Murrell and Lores 2004; Reynolds 2006; Havens 2008) 등과 같은 수리학적 요인이 남조류의 천이와 관련이 있음이 밝혀졌다 (Yamamoto and Nakahara 2009).

남조류는 다른 생물군에 비하여, 동일 분류군 내 종 특이성이 높은 생물군이다. 이는 진핵생물인 다른 조류에 비하여 원핵생물로만 구성되어 있어 유전자 변이의 발생률이 높기 때문이다 (Cires and Ballot 2016). 특히 남조류에 대한 생리생태학적 연구는 *Microcystis*와 같은 특정 분류군을 대상으로 주로 수행되어 있기 때문에, 현장에서 이루어지는 전체 남조류의 천이 현상을 설명하는 것은 한계가 있다 (Yamamoto and Nakahara 2009).

주암호는 광주 및 전남권의 약 40%를 차지하는 주요 상수원일 뿐만 아니라, 광양제철소 등 인근 대규모 산업 단지에도 용수를 공급하고 있는 주요 수원지이다 (Jang *et al.* 2004). 주암호는 수역 내 뚜렷한 오염원이 없어 비교적 양호한 수질을 유지하고 있음에도 불구하고, 남조류의 발생 양상이 장기간에 걸쳐 뚜렷한 변화를 보이고 있다. 그러나, 주암호에 대한 연구는 주로 단기간의 수질 및 식물 플랑크톤의 변화 (Song *et al.* 2013; Cho *et al.* 2017; Cho and Lee 2018) 혹은 어류 군집 구성 (Kim *et al.* 2015) 등이 일부 보고되었을 뿐, 10년 이상의 장기간에 걸친 남조류 출현

양상에 대한 연구는 전무한 실정이다.

종 특이성을 가지는 남조류의 발생과 천이, 감소 현상에 대한 이해는 다양한 서식환경에서 남조류에 의한 녹조현상을 관리하기 위해 필수적이다 (Ma *et al.* 2015; Ryu *et al.* 2016). 본 연구는 지난 14년간 주암호에서 출현한 남조류의 천이 양상을 분석하고, 이 과정에서 영향을 미친 주요 환경요인과의 관계를 규명하였다. 특히 2012년 이후 유해 남조류 (Harmful-cyanobacteria) 출현량 급감의 원인을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 조사 지점 및 시기

주암호는 수량이 부족한 광주, 전남지역의 생활용수와 공업용수를 공급하기 위해 1992년도에 조성된 인공호로서 (YRERC 2005), 1,010km²의 유역 면적 및 4.5억톤 규모의 총 저수량을 보유하고 있다. 주암호로 유입하는 지천은 울어천, 동북천, 송광천 등 31개 지천이 있으며, 31개 지천 중 주암호로 직접 유입하는 지류는 동북천 등 18개의 하천이다 (YRERC 2007). 현장 조사는 관리 수위 내 남조류의 발생 양상을 확인하기 위하여, 댐 앞 지점 (St. 1)과 신평교

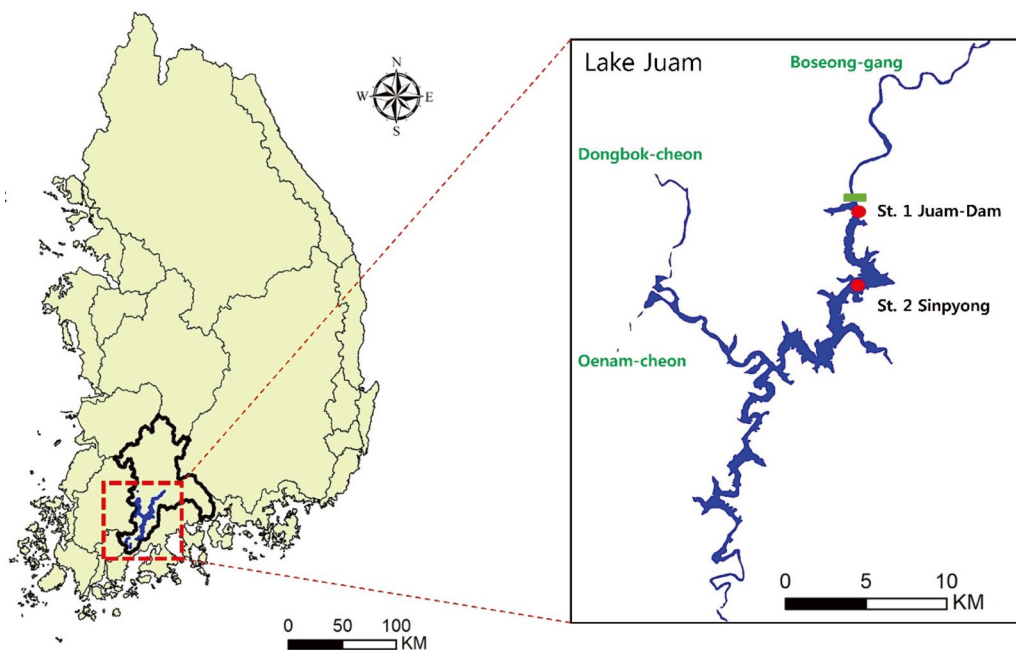


Fig. 1. Location of Lake Juam and the sampling sites in Lake Juam.

지점 (St. 2)을 대상으로 실시하였다. 조사 시기는 2005년부터 2011년도까지는 4~11월 주 1회 ($n=241$), 2012년도에는 4월부터 12월까지 주 1회 ($n=39$), 2013년도부터 2018년도까지 주 1회 ($n=312$) 실시하였다(Fig. 1).

2. 이화학적 분석

현장측정항목인 수온, pH, DO, 전기전도도는 현장측정장비 (SURVEYOR 4, Hydrolab, USA)를 사용하여 현장에서 측정하였고, 현장에서 채수된 시료는 4°C 냉장보관 후에 연구실로 이송하여 일반수질항목 (BOD, COD, TOC, TN, NH₃-N, NO₃-N, TP, PO₄-P, SS, Chl-*a*) 분석을 수질오염공정시험방법에 따라 실시하였다. 기후적 요인은 기상청 (KMA 2019)에서 제공하는 강우량, 평균 기온, 일조시간 항목의 자료를 활용하였다. 2005년부터 2012년까지는 주암 관측소 자료를 활용하였으며, 2013년 이후부터는 폐쇄된 주암관측소에서 제일 가까운 순천관측소 자료를 활용하였다. 일사량 항목은 광주광역시 관측소 자료를 활용하였다. 총 유입량, 총 방류량, 저수량 등과 같은 수리수문학적 요인은 한국수자원공사 (K-water 2019) 자료를 활용하였다.

3. 식물플랑크톤 분석

식물플랑크톤 시료는 Lugol's solution으로 최종 농도 5%가 되도록 현장에서 고정하고 실험실로 운반하였다. 운반 후 24시간 이상 정치하여 광학현미경 (Eclipse Ni, Nikon, Japan)을 이용하여 100~400배의 배율에서 검경을 실시하였다. 정량 분석은 Sedwick-Rafter chamber를 사용하여 mL당 세포수를 계수하였다 (MOE 2011). 출현종의 동정은 식물플랑크톤 도감 (Massaru 1977; Chung 1993; Krammer and Lange-Bertalot 2007)을 이용하였으며, 분류 체계는 Simonsen (1979)의 분류체계에 따라 분류하였다.

4. 통계학적 분석

통계분석은 남조류 집중 출현 시기인 여름 (6~9월) 기간을 대상으로 SPSS (ver. 12.0) 소프트웨어를 사용하여 Pearson 상관분석 및 독립적 *t*-검정을 실시하였다. 독립적 *t*-검정을 위하여, 연도별 남조류의 평균 출현 개체수를 기준으로 전반기 (1st, 2005~2011년), 후반기 (2nd, 2012~2018년)를 구분하였다.

결과 및 고찰

1. 이화학적 환경 요인의 변화

장기간에 걸쳐 조사된 주암호의 현장 측정 항목을 확인한 결과, 수온은 3.6~25.0°C의 범위로 보였다 (Fig. 2). 수온의 증감 패턴은 기온이 낮은 겨울 (1~2월)에서 기온이 높은 여름 (6~9월)으로 진행될수록 점차 증가되었다가 다시 감소하는 온대 지역에 분포하는 호수의 특성을 나타냈다 (Noh *et al.* 2014). pH는 6.1~8.5의 범위 (평균 pH 7.0)를 보였으며, 선행연구 (Song *et al.* 2013)의 범위 (평균 pH 7.3)와도 유사하였다 (Fig. 2). 용존 산소는 2.7~12.8 mg L⁻¹의 범위로 조사 기간 평균 7.5 mg L⁻¹로 나타났으며 (Fig. 2), 용존 산소는 수온과 반비례하는 경향을 보였다. 이러한 특성은 국내 대형호소에서 나타나는 일반적인 수온 및 용존산소의 변화 양상과 일치하였다 (Jeong *et al.* 2010). 국내 대형 상수원 호수와 비교할 때, 주암호의 유기물 오염도는 매우 양호한 것으로 나타났다 (Oh *et al.* 2015). 특히 영산강 수계 내 분포하는 장성호, 담양호, 광주호, 나주호 등 주요 호소의 유기물 오염도 (호소별 평균 BOD 0.61~2.73 mg L⁻¹; COD 2.47~6.30 mg L⁻¹)와 비교해서도 비교적 양호한 것으로 나타났다. 주암호의 생물화학적 산소요구량 (BOD)과 화학적 산소요구량 (COD)은 조사 기간 동안 평균 0.8 mg L⁻¹과 2.9 mg L⁻¹로 각각 나타났으며, 선행연구 결과를 검토하였을 때, 선행연구 (YRERC 2007)가 시작된 1996년 이후 유기물 오염도의 큰 변화가 없었던 것으로 나타났다 (Fig. 2). 주암호의 전기전도도는 전반기 (63 $\mu\text{mhos cm}^{-1}$)에 비하여 후반기 (77 $\mu\text{mhos cm}^{-1}$)로 약 22.2%로 다소 증가하였다 (Fig. 2).

영양염 항목 중 TN과 TP는 각각 조사기간 평균 0.804 (0.485~1.905) mg L⁻¹와 0.013 (0.004~0.054) mg L⁻¹로 조사되었으며, 국내 대형 상수원 호수와 비교할 때, 주암호의 영양염 오염도는 비교적 양호한 것으로 나타났다 (Ma *et al.* 2015; Park *et al.* 2015) (Fig. 2). TN/TP ratio (weight)는 식물플랑크톤 성장의 간접 지표로 활용되고 있으며 (Smith 1983; Lee 2010), 일반적으로 남조류는 TN/TP ratio가 15 이하의 범위를 선호한다고 알려져 있다 (Rita 2007; Xia *et al.* 2011). 그러나 주암호는 연중 60 이상의 비율을 유지함에도 불구하고, 연도별로 출현량의 큰 차이를 보였다 (Fig. 3). 이를 통해 TN/TP ratio보다 다른 환경 인자에 의해 주암호 내에서 유해남조류 발생이 조절되고 있음을 간접적

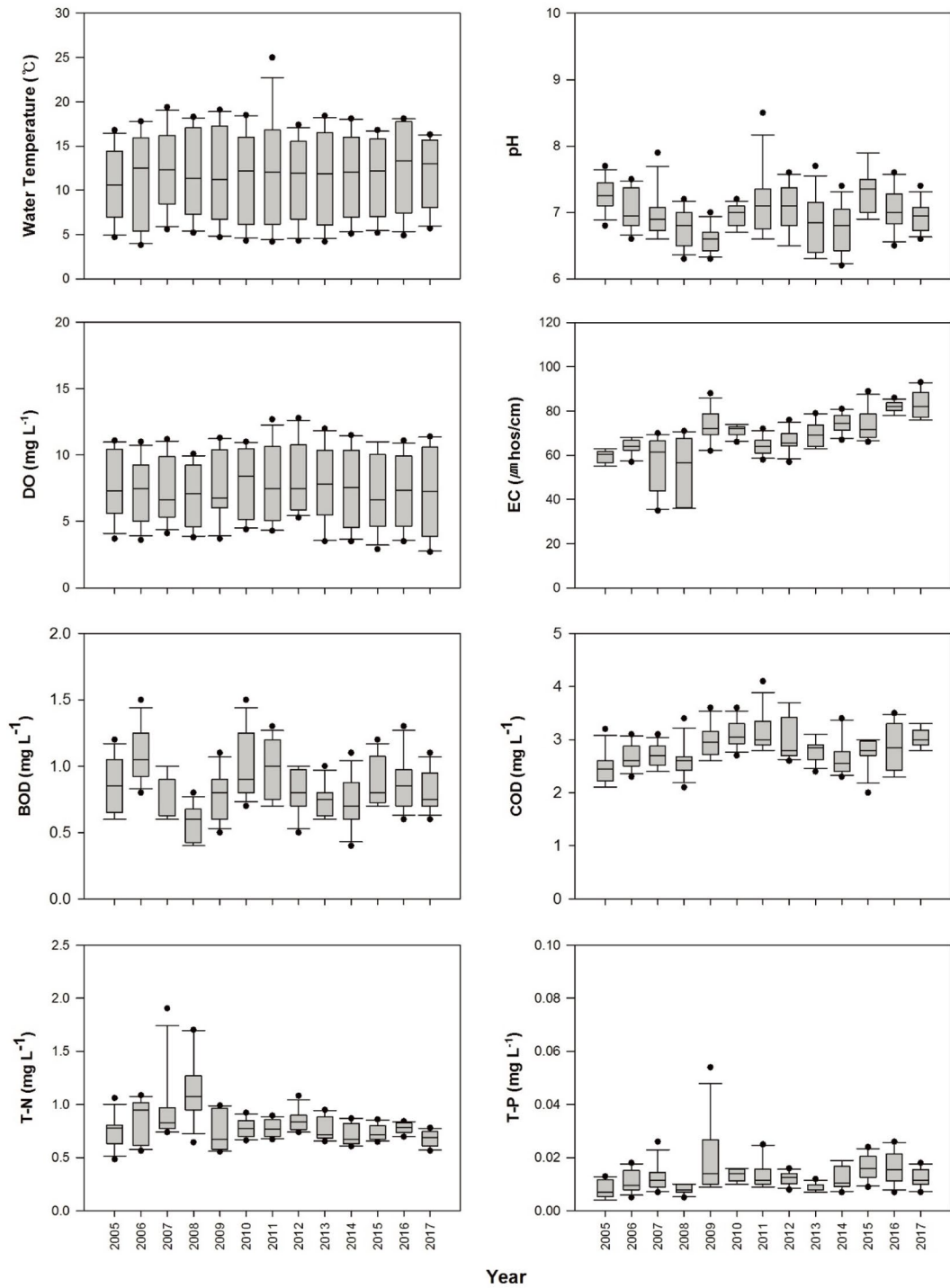


Fig. 2. Annual variation in physicochemical factors (water temperature, pH, DO, EC, BOD, COD, TN, TP) in Lake Juam.

으로 유추할 수 있었다.

수리수문학적 요인을 살펴보면, 주암호의 총 유입량과 방류량은 각각 $5.5\sim 30.41\text{ m}^3\text{ sec}^{-1}$ 와 $10.2\sim 28.0\text{ m}^3\text{ sec}^{-1}$ 의

범위를 보였다 (Fig. 3). 일반적으로 유입량의 증가는 체류 시간을 감소시켜 남조류의 증식을 방해하는 인자이다 (Park et al. 2005; Ryu et al. 2016). 주암호의 하절기 수리수

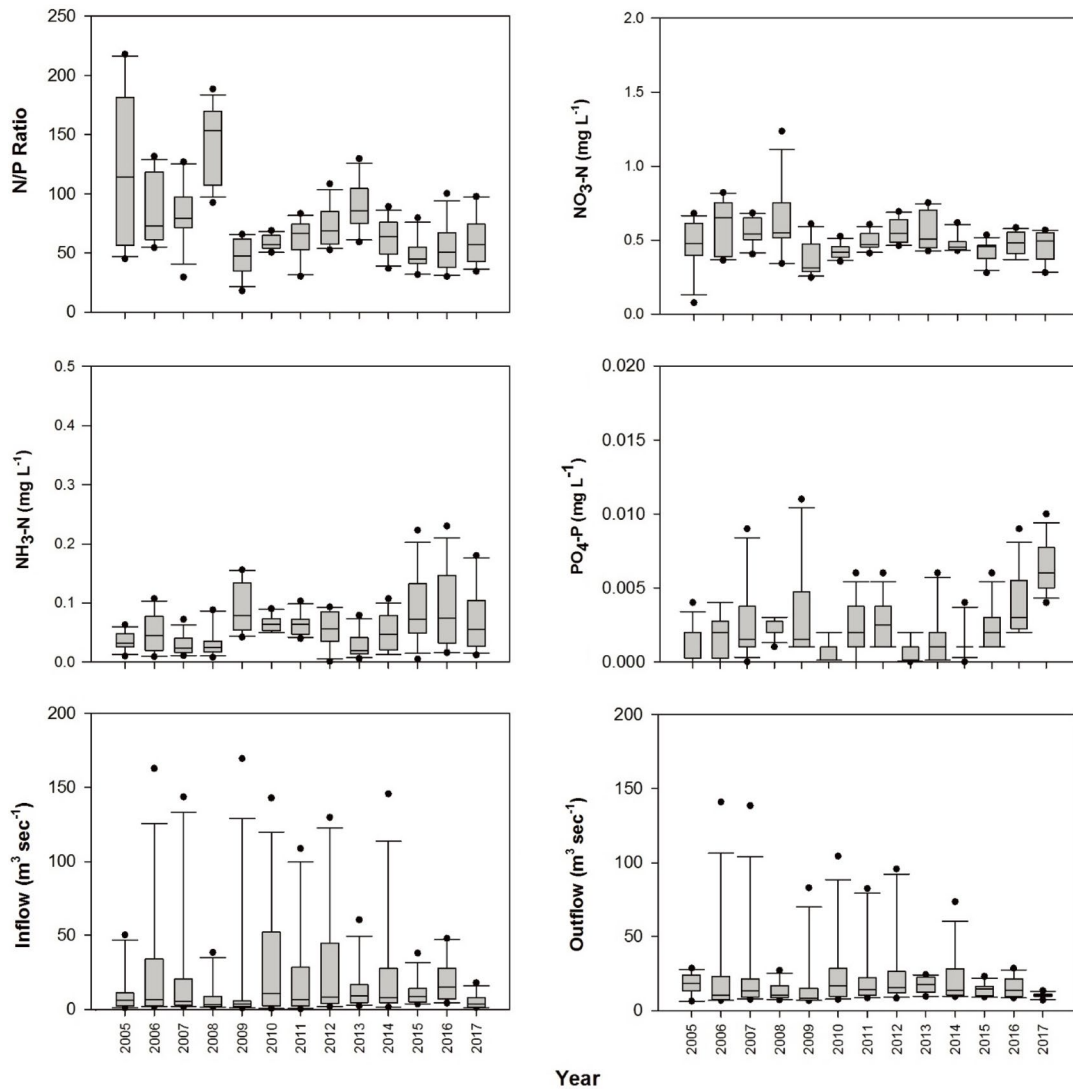


Fig. 3. Annual variation in physicochemical factors (N/P ratio, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$) and hydrological factors (inflow, outflow) in Lake Juam.

문학적 체류시간은 5.0~6.0 days로 추정되었다. 이는 국내의 보고된 유해남조류의 doubling time (개체군의 크기가 두 배가 되는데 소모되는 시간; *Microcystis* > 2.8 days)을 감안할 때, 남조류의 성장을 제한하기에 어려울 것으로 판단된다(Wilson *et al.* 2006).

일사량은 4,736.3~5,670.7 MJ m^2 의 범위로 평균 5,172.2 MJ m^2 를 보였다(Fig. 4A). 일사량은 겨울과 봄철을 지나면서 점점 증가하였고, 강우가 집중되는 여름에 감소하는 패턴을 확인하였다. 전반기와 후반기의 일사량은 각각 5,155.4 MJ m^2 , 5,189.0 MJ m^2 으로 큰 차이는 보이지 않았

다. 강우량은 우리나라처럼 계절적으로 편중된 지역에서는 수생태계 수질변화 혹은 생태계의 기능에 매우 중요한 영향을 미칠 수 있는 인자이다(Faithful and Griffiths 2000; Shin *et al.* 2003). 강우량은 883.4~1,967.0mm의 범위로 평균 1,528.9 mm로 나타났다(Fig. 4B). 강우량이 집중되는 여름(6~9월)에는 전체 강우량의 약 63.2%를 차지하는 최고 집중강우기를 보였으며, 이는 6월부터 9월까지 40% 이상 높은 강우량을 나타내는 전형적인 우리나라 몬순 기후의 특성을 확인하였다(An *et al.* 2001; Noh *et al.* 2014). 전반기와 하반기 강우량은 전반기 1,554.9 mm, 하반기 1,502.9

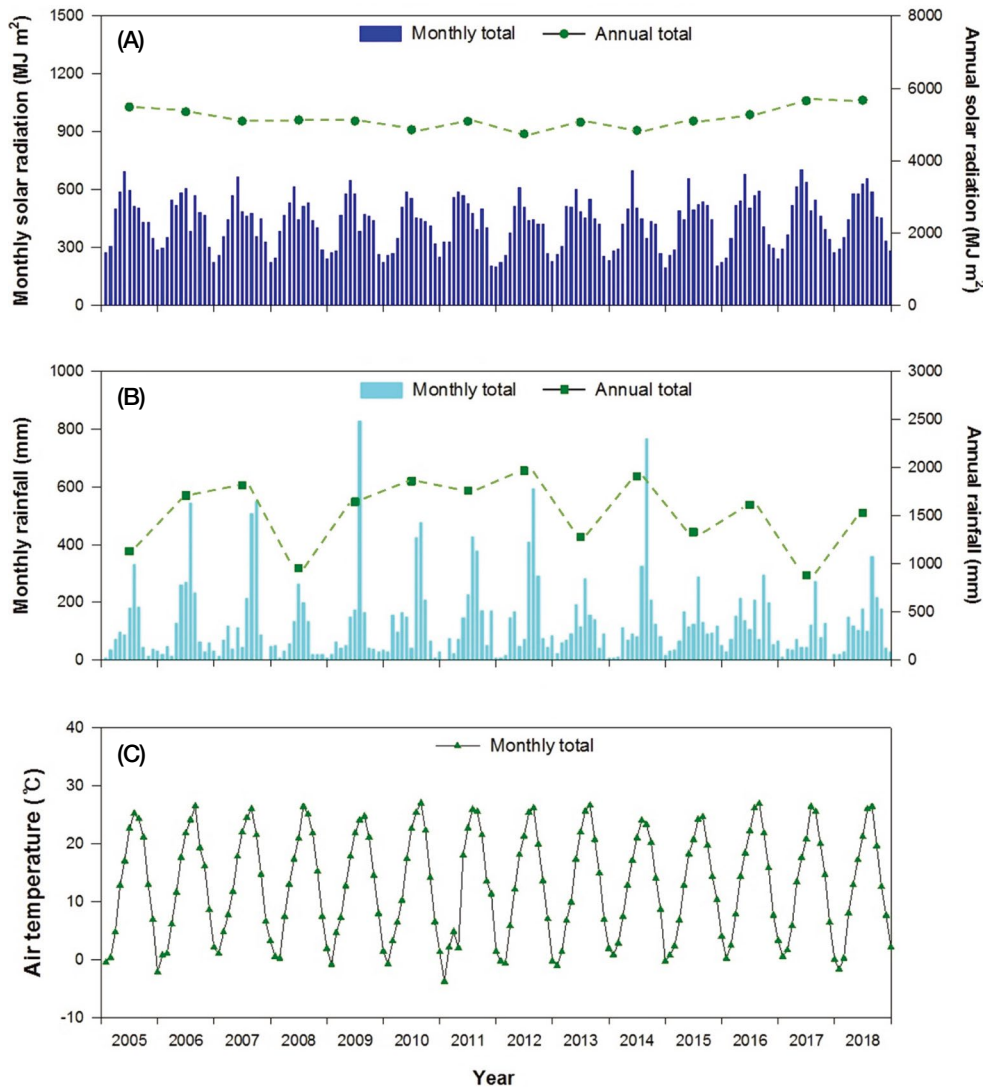


Fig. 4. Temporal variation in climate factors in Lake Juam.

mm로 감소하였고, 강우량이 집중된 여름 시기(6~9월)에는 전반기 263.3 mm, 후반기 219.9 mm로 측정되어 연 강수량에 비해 다소 감소하는 패턴을 확인하였다. 월평균 기온은 12.1~13.9°C의 범위로 평균 12.9°C이었으며(Fig. 4C), 전반기, 후반기 모두 12.9°C로 차이를 보이지 않았다. 평균 기온은 봄부터 점점 증가하다가 여름철에 최대치를 보이고 가을과 겨울철에는 감소하는 다소 일정한 패턴을 보였다.

2012년 이후 남조류 출현량 급감의 원인을 파악하고자, 유해남조류의 출현 개체수가 높았던 전반기(2008년~2011년의 6~9월)와 급감하였던 후반기(2012년~2018년

6~9월)를 구분하여 환경 요인의 변화를 분석하였다. 현장 측정항목 중 전기전도도는 전반기($65 \mu\text{mhos cm}^{-1}$)에 비하여 후반기($77 \mu\text{mhos cm}^{-1}$)에 약 18.3%가 증가하여 나타났다. 수온, 수소이온농도(pH)는 큰 차이를 보이지 않았다. 한편 BOD, COD, SS 등 유기물 항목은 조사 기간 동안 전반기와 후반기의 증감 비율이 10%를 초과하지 않았다. 영양염 항목 중 인 계열 항목인 TP와 $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 전반기와 후반기가 큰 차이를 보이지 않았으나, 질소 계열 항목은 뚜렷한 차이를 보였다. TN은 전반기(0.912 mg L^{-1})에 비하여 후반기(0.811 mg L^{-1})에 11.1%가 감소하였으며, $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 $\text{NH}_3\text{-N}$ 역시 전반기에 비하여 후반기에 감소하였다.

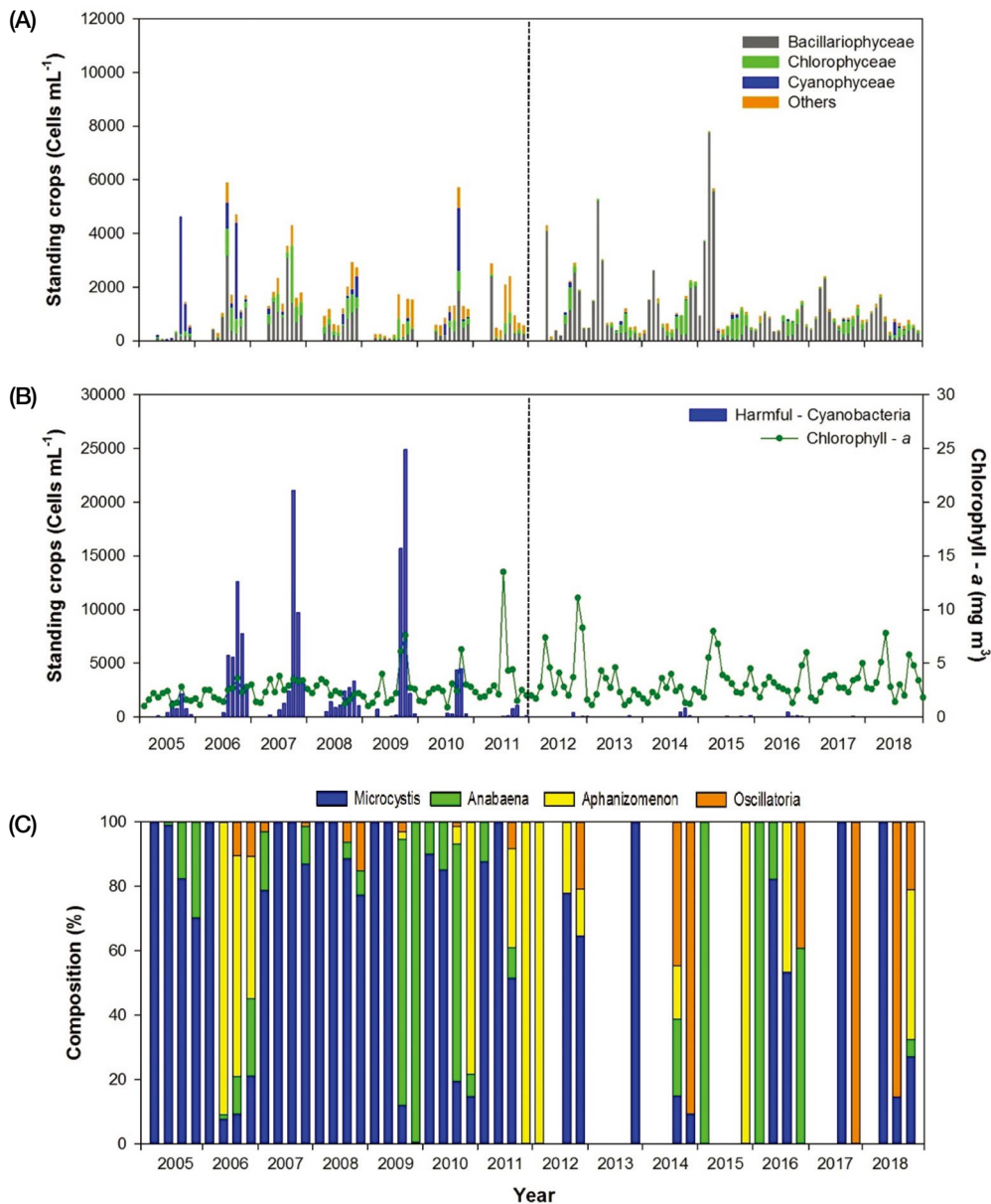


Fig. 5. Temporal variation of the standing crops, chlorophyll-a and harmful-cyanobacteria abundance in Juam Dam.

2. 식물플랑크톤의 출현 양상

식물플랑크톤의 출현 양상은 유해남조류 (Harmful-cyanobacteria)와 유해남조류를 제외한 식물플랑크톤을 구분하여 제시하였다. St. 1 (주암댐)에서 출현한 식물플랑크톤 현존량은 69~7,810 cells mL⁻¹ 범위로 전체 조사 기간 평균 1,359 cells mL⁻¹이었다(Fig. 5A). 전반기와 후반기의 평균 식물플랑크톤 현존량은 전반기(1,484 cells mL⁻¹)

에 비하여 후반기(1,271 cells mL⁻¹)에 다소 감소하였다. St. 1 (주암댐) 유해남조류 현존량은 10~24,891 cells mL⁻¹의 범위로 출현하였으며(Fig. 5B), 2012년 이후 평균 현존량(42 cells mL⁻¹)은 전반기(2,575 cells mL⁻¹)에 비하여 약 60배 이상 감소한 것으로 확인되었다. St. 1 (주암댐)에서의 남조류 상대밀도는 *Microcystis* sp. (56.1%), *Anabaena* sp. (16.6%), *Aphanizomenon* sp. (17.0%)와 *Oscillatoria* sp. (10.3%)로 나타났으며, 73.2%의 구성비로 *Microcystis*

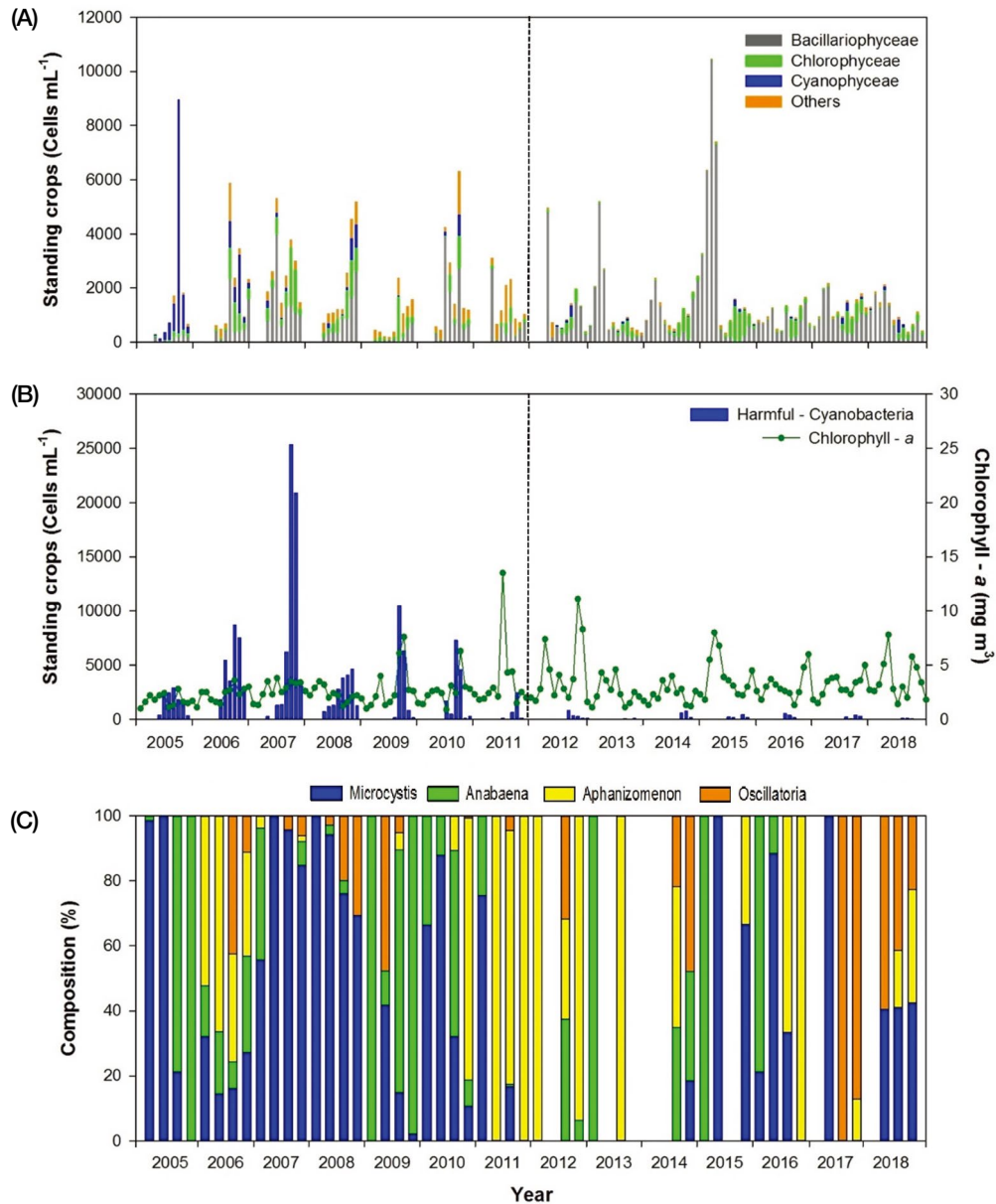


Fig. 6. Temporal variation in the standing crops, chlorophyll-a and harmful-cyanobacteria abundance in Sinpyong.

sp.와 *Aphanizomenon* sp.가 주요 유해남조류로 확인되었다 (Fig. 5C). St. 2 (신평)에서 출현한 식물플랑크톤 현존량은 $153\sim 10,480$ cells mL^{-1} 의 범위로 조사 기간 평균 $1,668$ cells mL^{-1} 로 확인되었다 (Fig. 6A). 2012년을 기준으로 전반기와 후반기의 평균 식물플랑크톤 현존량은 각각 $1,925$ cells mL^{-1} 와 $1,490$ cells mL^{-1} 로 나타났다. 2012년 이후 1~4월 규조류 우점률 증가는 Pennales목의 *Asterionella formosa*가 높은 세포밀도를 보였기 때문이다. 이는 총인의 비교적 농

도가 낮고 TN이 감소하였던 호소에서 *Asterionella formosa*의 세포수가 증가하였다는 Sivarajah (2016)의 연구와 일치한다. St. 2 (신평) 유해남조류 현존량은 $13\sim 26,043$ cells mL^{-1} 의 범위로 출현하였다 (Fig. 6B). 평균 현존량은 전반기 ($2,557$ cells mL^{-1}), 후반기 (82 cells mL^{-1})에 비해 약 30배의 큰 현존량 차이를 보여, 두 지점 모두 유해남조류가 감소하였다. St. 2 (신평)에서의 남조류 상대밀도는 *Microcystis* sp. (39.3%), *Anabaena* sp. (23.5%), *Aphanizomenon* sp. (25.0%)

와 *Oscillatoria* sp. (12.2%)로 조사되어, *Microcystis* sp.와 *Aphanizomenon* sp.이 64.3%로 높은 출현율을 보였다(Fig. 6C). 유해남조류의 출현 패턴은 두 지점 모두 대부분 구형 남조류인 *Microcystis* sp.가 먼저 출현하여 *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp.와 *Aphanizomenon* sp. 등의 사상체형 유해남조류와 함께 공존하거나 우점하는 양상을 보였다. 이는 선행 연구와 유사한 유해남조류 출현 양상을 나타냈다(Park 2005). 조류의 생물량 및 생산력을 간접적으로 확인할 수 있는 클로로필-*a*는 1.8~4.4 mg m³의 범위로 평균 2.9 mg m³이며, 클로로필-*a*와 유해남조류 현존량 증감패턴은 서로 일치하지 않았다(Figs. 5B, 6B). 이는 극소형의 개체들이 많은 환경(Han *et al.* 2002), 세포의 크기에 따른 클로로필-*a*의 함유량의 차이(Odata *et al.* 1993)로 판단된다. 추가적으로 미세수된 극소형 플랑크톤도 영향을 줄 것으로 판단된다(Larsson and Hagstrom 1982; Lee *et al.* 2008).

3. 통계분석 결과

유해남조류 현존량과 기후적, 이화학적, 수리수문 요

인 간의 상관성을 파악하고자 남조류가 상대적으로 많이 출현하는 여름 시기(6~9월)를 대상으로 상관분석을 실시하였다(Table 1). 주암댐에서 출현한 유해남조류는 저수량(0.370; $p < 0.01$), TN(0.327; $p < 0.05$), 클로로필-*a*(0.317; $p < 0.05$), 방류량($r = 0.314$, $p < 0.05$)과 양의 상관관계를 나타냈고, 전기전도도(-0.427; $p < 0.01$)와는 음의 상관관계를 나타냈다. 신평은 방류량(0.499; $p < 0.01$), 저수량(0.425; $p < 0.01$), TN(0.348; $p < 0.01$), 유입량(0.324; $p < 0.05$)과 양의 상관관계를 나타냈고, 전기전도도(-0.506; $p < 0.01$), 일사량(-0.310; $p < 0.05$)과는 음의 상관관계를 나타냈다. 주암호 두 지점에서 출현한 유해남조류는 TN, 방류량, 저수량과 양의 상관관계를 보였고, 전기전도도와는 음의 상관관계를 보였다. 유해남조류의 현존량 감소의 원인규명을 위하여 여름(6~9월) 기간을 대상으로 독립적 *t*-검정을 실시하였다(Table 2). 분석 결과 TN, EC, 체류시간의 통계적으로 유의미한 차이를 확인하였다. TN은 전반기에 비해 후반기에 감소하였으며, 전기전도도와 체류시간은 증가하였다. 또한 유의확률은 다소 떨어지지만, TP의 경우 평균 차이는 없으나 표준편차가

Table 1. Pearson's correlation coefficients between standing crops (harmful cyanobacteria) and environmental factors in Lake Juam

Period	Site	WT	Chl- <i>a</i>	TN	TP	EC	NO ₃ -N	NH ₃ -N	PO ₄ -P	Solar radiation	Inflow	Outflow	Storage
Summer (Jun.-Sep.)	(A)	0.293*	0.317*	0.327*	0.229	-0.427**	0.187	0.034	0.234	-0.265*	0.134	0.314*	0.370**
	(B)	0.247	0.113	0.348**	0.009	-0.506**	0.256	-0.143	0.080	-0.310*	0.324*	0.499**	0.425**

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$. (A): Juam-dam, (B): Sinpyong, WT: Water Temperature, Chl-*a*: Chlorophyll-*a*, TN: Total Nitrogen, TP: Total Phosphorus, EC: Electrical Conductivity.

Table 2. T-test results for environmental factors by period

Period (Month)	Parameter	1st	2nd	<i>p</i> -value*
		Mean ± SD	Mean ± SD	
Summer (Jun-Sep)	WT (°C)	16.1 ± 3.1	16.3 ± 2.0	0.739
	Chl- <i>a</i> (mg m ³)	3.3 ± 2.6	2.7 ± 1.1	0.029
	TN (mg L ⁻¹)	0.912 ± 0.148	0.811 ± 0.127	0.008
	TP (mg L ⁻¹)	0.015 ± 0.011	0.015 ± 0.005	0.962
	EC (µmhos cm ⁻¹)	65.1 ± 7.5	77.0 ± 8.7	0.000
	NO ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.566 ± 0.13	0.544 ± 0.101	0.480
	NH ₃ -N (mg L ⁻¹)	0.042 ± 0.025	0.041 ± 0.028	0.833
	PO ₄ -P (mg L ⁻¹)	0.003 ± 0.003	0.003 ± 0.002	0.385
	Rainfall (mm)	263.3 ± 193.8	219.9 ± 164.8	0.370
	Solar radiation (MJ m ²)	482.5 ± 64.2	504.0 ± 47.2	0.232
	Inflow (m ³ sec ⁻¹)	50.9 ± 52.2	34.0 ± 37.5	0.171
	Outflow (m ³ sec ⁻¹)	40.0 ± 37.1	24.2 ± 22.1	0.060
	Storage (10 ⁶ m ³)	227.0 ± 74.5	219.5 ± 78.6	0.714
	Residence time (hr)	118.9 ± 44.3	144.5 ± 31.6	0.016

1st: from 2005 to 2011, 2nd: from 2012 to 2018. WT: Water Temperature, Chl-*a*: Chlorophyll-*a*, DO: Dissolve Oxygen, TN: Total Nitrogen, TP: Total Phosphorus, EC: Electrical Conductivity.

비교적 큰 차이를 보여, 전반기에는 TP의 변동성이 후반기보다 큼을 알 수 있었다. 통계분석 결과를 살펴보면 전반기 시기에 비해 강우량은 감소하였으며, 이로 인해 TN의 감소, TP의 변동성 유발되었다. 따라서 주암호 유해남조류 간접적인 감소 원인은 강우량의 감소로 인한 영양염의 감소(TN) 및 변동성의 감소(TP)의 결과로 사료된다.

적 요

본 연구는 2005년부터 2018년까지 14년간 주암호에서 출현한 남조류의 천이 양상을 분석하여, 남조류에 영향을 미친 주요 환경요인과의 관계를 파악하고자 연구를 수행하였다. 특히 2012년 이후 유해남조류(Harmful algae) 출현량 급감의 원인을 파악하고자 하였다. 조사기간 동안 두 지점의 유해남조류 현존량은 주암댐: $10\sim 24,891$ cells mL⁻¹, 신평: $13\sim 26,043$ cells mL⁻¹의 범위로 출현하였다. 전반기 시기 두 지점의 평균 현존량은 각각 $2,575$ cells mL⁻¹, $2,557$ cells mL⁻¹로, 이는 후반기 시기 평균 현존량(42 cells mL⁻¹, 82 cells mL⁻¹)에 비해 약 60배, 30배의 큰 세포수 차이를 보였다. 남조류가 상대적으로 많이 출현하는 여름 시기(6~9월)를 대상으로 상관분석을 실시한 결과, 유해남조류는 TN, 방류량, 저수량과 양의 상관관계를 보였고, 전기전도도와는 음의 상관관계를 보였다. *t*-검정 결과 TN, EC, 체류시간의 유의미한 차이를 확인하였다. 특히 TN은 $0.566\sim 1.292$ mg L⁻¹의 범위로 평균 0.862 mg L⁻¹로 보였다. 전반기, 후반기 평균 TN은 전반기 0.912 mg L⁻¹, 후반기 0.811 mg L⁻¹로 감소하였다. 또한 유의확률은 다소 떨어지지만, TP의 경우 평균 차이는 없으나 표준편차가 비교적 큰 차이를 보여 변동성이 큼을 알 수 있었다. 강우량이 집중된 여름(6~9월) 시기의 전반기와 후반기 강우량 감소하는 패턴이 원인인 것으로 판단된다(전반기 263.3 mm, 후반기 219.9 mm). 즉, 전반기에 비해 강우량은 감소하였으며, 이로 인해 TP의 변동성이 감소되었다고 판단된다. TP의 변동성의 감소로 인해 전반기에 남조류의 luxury consumption이 가능하여 남조류의 성장률이 높았을 것으로 추측된다. 따라서 주암호 유해남조류 감소 원인은 강우량의 감소로 인한 영양염의 감소(TN) 및 변동성의 감소(TP)의 결과로 사료된다.

사 사

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NEIR-2019-03-01-013).

REFERENCES

- An KG, JW Seo and SS Park. 2001. Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological conditions near the intake tower of Taechung reservoir. Korean J. Limnol. 34:327-336.
- Cho HJ, JE Na, MH Jung and HY Lee. 2017. Relationship between phytoplankton community and water quality in Lakes in Jeonnam using SOM. Korean J. Limnol. 50:148-156.
- Cho KA and HY Lee. 2018. Typhoon induces changes of the phytoplankton at Bok-gyo bridge area in Juam Lake. Korean J. Ecol. Environ. 51:253-258.
- Chung J. 1993. Illustration of the Freshwater Algae of Korea. Academy Publishing Company. Seoul. p. 496.
- Cires S and A Ballot. 2016. A review of the phylogeny, ecology and toxin production of bloom-forming *Aphanizomenon* spp. and related species within the Nostrocales (Cyanobacteria). Harmful Algae 52:21-43.
- Faithful JW and DJ Griffiths. 2000. Turbid flow through a tropical reservoir (Lake Dalrymple, Queensland, Australia): Responses to summer storm event. Lake Reserv. Manag. 5:231-247.
- Han MS, HR Lee, SS Hong, YO Kim, K Lee, YK Choi, SH Kim and KI Yoo. 2002. Ecological studies on Togyo Reservoir in Chulwon, Korea. V. Seasonal changes of size-fractionated standing crops and chlorophyll-a of phytoplankton in Kyung-gan stream of Paldang river-reservoir systems and Togyo reservoir, Korea. Korean J. Environ. Biol. 20:91-99.
- Harke MJ, MM Steffen, CH Gobler, TG Otten, SW Wilhelm, SA Wood and HW Paerl. 2016. A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, *Microcystis* spp. Harmful Algae 54:4-20.
- Havens KE. 2008. Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems. pp. 675-732. In Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research (Hundell KH, ed.). Springer, New York.
- Jang YH, JP Cheong, HJ Cho, SH Lee, SM Lee and NI Chang. 2004. Characteristic of atmospheric dry deposition of nitrogen-containing compounds and the spatial identification of potential pollution sources at Juam reservoir. pp. 585-588. In Proceedings of KSEE. Kyung-sung University. Busan, Korea.

- Jeong EJ, JE Na, GM Kim, SS Shim and HY Lee. 2010. Water temperature and community of phytoplankton in Youngsan River, Korea. Korean J. Environ. Biol. 28:56-63.
- K-water. 2019. Water Information. Korean Water Resources Corporation. Daejeon, Korea. <http://water.or.kr/>.
- Kim SJ, HJ Song, TJ Park, MY Hwang, HS Cho, KD Song, HJ Lee and YS Kim. 2015. Survey on Lake environments in the Yeongsan and Seomjin river basins - based on 10 lakes such as Hadong and Sangsa. J. Korean Soc. Water Environ. 31:665-679.
- KMA. 2019. Korea Weather Information (KMI). Korea Meteorological Administration. Seoul. <http://www.kma.go.kr/>.
- Krammer K and H Lange-bertalot. 2007. Süßwasserflora von Mitteleuropa, Band 2/1: Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaeae (Ettl H, J Gerloff, H Heying and D Mollenhauer, eds.). Elsevier Book Co., Germany.
- Lasson U and A Hagatrom. 1982. Fractionated phytoplankton primary production in Baltic eutrophication gradient. Mar. Biol. 67:57-70.
- Lee OM, MS Yoo, BI Lee and AS Lim. 2008. The distribution and standing crop of phytoplankton at the estuaries of Galgok stream and Incheon river in Jeollanam-do. Algae 23:257-268.
- Lee SH. 2010. Effect of nutrient concentration and stoichiometry on the phytoplankton growth and phosphorus uptake. MS thesis, Konkuk University, Seoul. pp. 4-6.
- Lee SJ, BC Lim, GH Lee, WG Jeong, BN Hur and IR Hur. 2016. Long term monitoring for the control of cyanobacterial blooms in Lake Uiam. J. Korean Soc. Environ. Anal. 19:109-118.
- Lomas MW and Gilbert PM. 1999. Temperature regulation of nitrate uptake: A novel hypothesis about nitrate uptake and reduction in cool-water diatom. Limnol. Oceanogr. 44:556-572.
- Ma H, Y Wu, N Gan, L Zheng, T Li and L Song. 2015. Growth inhibitory effect of microcystis on *Aphanizomenon flos-aquae* isolated from cyanobacteria bloom in Lake Dianchi, China. Harmful Algae 42:43-51.
- Ma XC, BS Lim, SU Heo and MA Kwak. 2015. Variation of water quality around the Chudong intake tower in Daechung reservoir. J. Korean Soc. Water Environ. 31:637-643.
- Masaru A, I Teru, I Kozo, K Hideo, K Shigeru, K Hiromu, T Eigi, T Kohei, H Minoru and Y Takaaki. 1997. Illustration of the Japanese Fresh-water Algae. Uchidarokakuho Publishing Company, Japan.
- MOE. 2011. Standard Method for the Examination of Water Pollution. Ministry of Environment. Sejong, Korea.
- MOE. 2019. Water Environment Information system (WEIS). Ministry of Environment. Sejong, Korea. <http://water.nier.go.kr/waterMeasurement/selectWater.do>.
- Murnell MC and EM Loeres. 2004. Phytoplankton and zooplankton seasonal dynamics in a subtropical estuary: importance of cyanobacteria. J. Plankton Res. 26:371-382.
- Noh SY, HK Park, HL Choi and JA Lee. 2014. Effect of climate change for cyanobacteria growth pattern in Chudong station of Lake Daechung. J. Korean Soc. Water Environ. 30:377-385.
- Odate T, M Yanada, H Mizuta and Y Maita. 1993. Phytoplankton carbon biomass estimated from the size-fractionated chlorophyll alpha concentration and cell density in the Northern Coastal Waters from Spring bloom to summer. Bull. Plankton Soc. 39:127-144.
- Oh EH, HS Lim, GW Ahn, HH Lee, JS Park and SI Yang. 2015. The characteristic of TOC, COD/BOD on Youngsan River Basin. J. Korean Soc. Water Environ. 18:38-48.
- Oh HM and GY Rhee. 1991. A comparative study of microalgae isolated from flooded rice paddies: light-limited growth C fixation, growth efficiency and relative N and P requirement. J. Appl. Phycol. 3:211-220.
- Paerl HW, WS Gardner, MJ McCarthy, BL Peierls and SW Wilhelm. 2014. Algal blooms: Noteworthy nitrogen. Science 346:175.
- Park HK, HJ Lee, EK Kim and DI Jung. 2005. Characteristics of algal abundance and statistical analysis of environmental factors in Lake Paldang. J. Korean Soc. Water Environ. 21:584-594.
- Park MH, BJ Lim, WB Seo, CH Park, KH Kim and SJ Hwang. 2015. Akinete germination and algal growth potential test of cyanobacterium *Anabaena circinalis* on different water in Lake Paldang. Korean J. Ecol Environ. 48:287-295.
- Park SW, HW Lee, YS Lee and SS Park. 2013. A hydrodynamic modeling study to analyze the water plum and mixing pattern of the Lake Uiam. Korean J. Limnol. 46:488-498.
- Reynolds CS. 2006. The Ecology of Phytoplankton. Cambridge University press. New York. p. 535.
- Rita B, CS Domingues and G Helena. 2007. Impact of reservoir filling on phytoplankton succession and cyanobacteria blooms in a temperate estuary. Estuar. Coast. Shelf Sci. 74:31-43.
- Ryu HS, HK Park, HJ Lee, RY Shin and SU Cheon. 2016. Occurrence and succession pattern of cyanobacteria in the upper region of the Nakdong river: factors influencing Aphanizomenon bloom. J. Korean Soc. Water Environ. 32:52-59.
- Shun JK, SJ Hwang, CK Kang and HS Kim. 2003. Limnological characteristics of the river-type Paldang reservoir, Korea: hydrological and environmental factors. Korean J. Limnol. 36:242-256.
- Simonsen R. 1979. The diatom system: ideas on phylogeny.

- Bacillaria 2:9–71.
- Sivarajah B, KM Ruhland, AL Labaj, AM Paterson and JP Snik. 2016. Why is the relative abundance of *Asterionella formosa* increasing in a Boreal Shield lake as nutrient level decline? *J. Paleolimnol.* 55:357–367.
- Smith VH. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue algae in lake phytoplankton. *Science* 221:669–671.
- Song HJ, KS Hwang, JH Park, HY Lee, JS Kim, HW Kim, DO Lim, SH Lee and BJ Lim. 2013. Water quality variation and biotic community characteristics in Juam lake. *Korean J. Environ Biol.* 31:37–44.
- Van de Waal DB, JMH Verspagen, JF Finke, V Vournazou, AK Immers, WEA Kardinaal, L Tonk, S Becker, E van Donk, PM Visser and J Huisman. 2011. Reversal in competitive dominance of a toxic versus non-toxic cyanobacterium in response to rising CO₂. *ISME J.* 5:1438–1450.
- Wilson AE, WA Wilson and ME Hay. 2006. Intraspecific variation in growth and morphology of the bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa*. *Appl. Environ. Microbiol.* 72:7386–7389.
- Xia L, L Xiaohua and C Yuwei. 2011. The effects of temperature and nutrient ratios on *Microcystis* blooms in Lake Taihu, China: An 11-year investigation. *Harmful Algae* 10:337–343.
- Yamamoto Y and H Nakahara. 2009. Life cycle of Cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae*. *Taiwania* 54:113–117.
- YRERC. 2005. Report on Implementing the Algae Alert System 2005. Yeongsan River Environment Research Center. Gwangju, Korea.
- YRERC. 2007. Report on Implementing the Algae Alert System 2007. Yeongsan River Environment Research Center. Gwangju, Korea.
- YRERC. 2007. A Study on Non-point Source Management of Upstream's Sub-watershed of Lake Juam. Yeongsan River Environment Research Center. Gwangju, Korea.