

## 동계 보령호에서 수위 강하와 연계된 유해 남조류 *Aphanizomenon* sp.의 재입 잠재성

신재기\* · 전경혜<sup>1</sup> · 김영성<sup>2</sup> · 김미경<sup>3</sup> · 김난영<sup>1</sup> · 황순진<sup>1,\*</sup>

한국수자원공사 낙동강남부권관리단, <sup>1</sup>건국대학교 환경보건과학과,  
<sup>2</sup>한국수자원공사 K-water 융합연구원, <sup>3</sup>경기연구원 생태환경연구실

**Recruitment Potential of Cyanobacterial Harmful Algae (Genus *Aphanizomenon*) in the Winter Season in Boryeong Reservoir, Korea: Link to Water-level Drawdown.** Shin, Jae-Ki\* (0000-0002-5380-5078), Gyeonghye Jeon<sup>1</sup> (0000-0003-4230-366x), Youngsung Kim<sup>2</sup> (0000-0001-5422-1915), Mi-Kyung Kim<sup>3</sup> (0000-0003-3370-0591), Nan-Young Kim<sup>1</sup> (0000-0001-5949-2095) and Soon-Jin Hwang<sup>1,\*</sup> (0000-0001-7083-5036) (Office for Southern Region Management of the Nakdong River, Korea Water Resources Corporation (K-water), Busan 49300, Republic of Korea; <sup>1</sup>Department of Environmental Health Science, Konkuk University, Seoul 05029, Republic of Korea; <sup>2</sup>K-water Convergence Institute, Korea Water Resources Corporation (K-water), Daejeon 34045, Republic of Korea; <sup>3</sup>Department of Ecology and Environment, Gyeonggi Research Institute, Suwon 16207, Republic of Korea)

**Abstract** Cyanobacteria *Aphanizomenon* population is widely distributed in the world, and well known as harmful algae by producing toxins and off-flavor materials, thus belonging to one of the taxa that became more interested in the field of limnology. In this study, the frequency, intensity, and duration of *Aphanizomenon* occurrence were increased with the abnormal drawdown of water level in the winter in Boryeong Reservoir, and the spatial and temporal characteristics of them are compared with each other in the perspective of hydro-meteorology (1998 to 2017) and limnology (2010 to 2017). In Korea, *Aphanizomenon* flourished mainly in high temperature, and the appearance in the low temperature was rare in total five times. The harmful cyanobacteria *Aphanizomenon* was observed in the low temperature (December to February) in Boryeong Reservoir from 2014, and then reached a maximum value of 2,160 cells mL<sup>-1</sup> in January 2017. In addition, the period exceeding 1,000 cells mL<sup>-1</sup> at this time was more than 3 months. This was simultaneously associated with abnormal water level fluctuation in the low temperature (< 10°C). The large drawdown of water level in the winter season has the potential to promote or amplify the germination and development of harmful algae. Also, subsequent water quality and ecological impacts (e.g., algal toxins and off-flavor substances) need to be considered carefully.

**Key words:** algae alert system, *Aphanizomenon*, cyanobacterial harmful algae, drawdown, low-temperature, recruitment, sediment, water-level fluctuation

Manuscript received 15 May 2017, revised 28 June 2017,  
revision accepted 1 July 2017

\* Corresponding author: Tel: +82-10-3870-6121, Fax: +82-51-529-3168,  
E-mail: shinjaeki@gmail.com  
Tel: +82-2-450-3748, Fax: +82-2-456-5062,  
E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

## 서 론

보령호는 1998년 10월에 댐을 준공하여 담수한 후 연령  
이 20년 된 저수지로서 국내의 주요 수자원 기반시설 중

© 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.

하나에 속한다(MOLIT, 2012). 수질은 담수과정 초기(1~3년)에 일시적으로 악화되었고, 이후 다목적 수원지로서 지대한 역할을 해왔다. 그러나 최근에 이상기후의 직·간접적 잠재 영향으로 인해 과거(1998년~2014년) 평균 강수량(1,245 mm)보다 훨씬 밀도는 강우사상(예, 장마기)을 연달아 겪으면서 계절적으로 저수 기능이 불안정하여 저온기에 각종 용수공급의 위기 수준까지 다다른 극심한 가뭄현상을 반복하는 실정에 있다(KMA, 2016). 그 결과, 온대 몬순기후대에 위치한 대다수 저수지는 그 특성상 고수위(normal high water level, NHWL; 예, 보령호 EL. 74 m)를 유지해야 하는 동계에 저수위(low water level, LWL; EL. 50 m) 수준 이하로 강하되어 기존과 달리 비정형의 수문학적 구조를 빈번하게 직면하고 있다(K-water, 2015, 2016; Shin *et al.*, 2016).

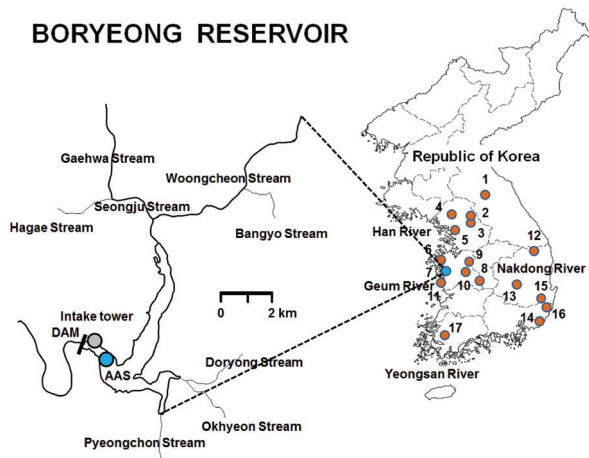
저수지의 수문학적 요인은 유·출입 유량과 수위를 중심으로 구성된다(Thornton *et al.*, 1990; Ashby, 2009; Shin *et al.*, 2016). 이 중에서 유입량은 강우의 패턴(빈도 또는 강도)에 의존되나, 유출량은 수문-여수로, 발전 방류 또는 취수를 통해 인위적으로 조절되어 그 증감 관계는 수위로서 쉽게 확인할 수 있다(Thornton *et al.*, 1990; Wetzel, 2001; Ashby, 2009). 수위변동(water-level fluctuation, WLF)은 광, 기후 및 유동 등과 관련되어 다양한 형태로 생태학적 과정·패턴에 영향을 주게 되며(Bunn *et al.*, 2006; DESNH, 2010), 각종 생물들의 서식공간인 수생태계에서 그 영향은 긍정(+)적 또는 부정(-)적인 면을 상시적으로 나타내게 된다(Lin and Evans, 1981; Wantzen *et al.*, 2008). WLF에 관한 연구는 유수(하천·강)에서 범람원에 대해 홍수 펄스로서 많이 수행되었으나(Kondolf and Wilcock, 1996; Watts *et al.*, 2009), 정수(저수지)환경에서 이에 대한 자세한 정보는 많지 않아서 내재된 속성 영향을 알기가 좀처럼 쉽지 않다(Ashby, 2009; Shin and Hwang, 2017).

1997년 이후, 우리나라는 매년 여름철을 중심으로 녹조현상의 직·간접적 피해 영향을 최소화하기 위해 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률(제21조, 수질오염경보제)에 근거하여 국내의 주요 상수원 저수지(팔당호 외 21개)와 친수활동 및 취수원 하천(한강(하류), 낙동강(중·하류))에서 조류(예보) 경보제(algal alert system, AAS)를 운영하고 있으며(MOE, 1999), 보령호는 2010년부터 댐(취수탑) 부근 1개 지점을 대상으로 하고 있다. 4월~11월 동안에 발생 현황 및 실태를 주간 모니터링으로 파악하는 것이고, 다수의 남조류 중 독소 및 이취미를 생산하는 4속 분류군을 유해조류(bloom-forming harmful cyanobacteria, CyanoHABs)로서 지정해 놓고 있으며, 그중에 *Aphanizomenon*속 개체군이 포함된다(MOE, 2011).

일반적으로, 녹조현상(green-tide)의 원인조류는 비교적 고수온기에 번성하고, 온도가 떨어지면서 약세 또는 쇠퇴하는 특성을 보인다(Rashash *et al.*, 1996; Pearl, 2014; Paerl *et al.*, 2016; Shin *et al.*, 2016; Watson *et al.*, 2016). 그러나 2011년 11월~2012년 1월 동계에 북한강(의암~팔당호)수역에서 이취물질에 의한 '겨울녹조' 파동을 겪은 바 있어, 저수온기에 유해조류 *Aphanizomenon*의 밀도가 증가하는 양상에 대해 생태학적 특성을 탐구하고 고찰할 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. *Aphanizomenon*은 남조류강(Class Cyanophyceae) 연쇄체목(Order Nostocales) 염주말과(Family Nostocaceae)에 속하는 남조류(blue-green algae, cyanobacteria)의 한 분류군이다(Komarek and Komarkova, 2006; NIBR, 2015). 이들은 주로 고위도(아한대) 지역에서 비교적 잦은 빈도로 대발생하였는데(Yamamoto, 2009a), 최근 들어 부영양 담수생태계에서 출현하는 빈도가 증가하고 있다(Pollinger *et al.*, 1998; Tsujimura *et al.*, 2001; Yamamoto and Nakahara, 2005, 2006). 국내의 하천과 저수지에서도 광역적으로 분포하고 있으며(Fig. 1, Table 3참고), 낙동강에서 여름철~가을철 초기에 발생하는 녹조현상의 주요 원인종 중 하나로 지목되어지고 있다(Park *et al.*, 2015). 또한, 유해독소(anatoxin-a, cylindrospermopsins 및 saxitoxins)와 이취물질(geosmin)을 생산하여 수질에 후속되는 악영향을 광범위하게 미칠 수 있는 것으로 잘 알려져 있으며(Mahmood *et al.*, 1986; Falconer, 1993; Rapala *et al.*, 1993; Ferreira *et al.*, 2001; Graham *et al.*, 2008, 2012), 조체에 함유된 지질 중 약 50%(총 건중량의 5~9%)가 불포화 지방산으로 구성되어 있어 식물자원이어서 가치도 높게 평가되고 있다(Kushak *et al.*, 2000).

*Aphanizomenon*에 관한 선행 연구는 국외에서 분류, 생리생태 및 분자생물학 분야를 통해 오래 전부터 광범위하게 수행되어 종 또는 개체군 수준의 전문적 정보가 매우 풍부하게 제시되고 있으며(Appendix 1), 특이한 생활사뿐만 아니라 저수위 때 재입(recruitment) 전략에 관한 것도 다수 보고되었다(Hansson *et al.*, 1994; Yamamoto, 2009a; Yamamoto and Nakahara, 2009; Cires *et al.*, 2013). *Aphanizomenon*속은 전 세계에서 전형적인 기준 종(*A. flos-aquae*), *A. gracile*, *A. volzii* 및 *Cuspidothrix*속 계열 중심으로 총 22종이 분류되었고(Appendix 1), 이 중에서 최근에 재분류된 *Anabaena* (2종)와 *Cuspidothrix* (5종)속을 제외하면 15종 정도를 포함하고 있다(Komarek, 1984; Gugger *et al.*, 2002; Laamamen *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Rajaniemi *et al.*, 2005a, b; Komarek and Komarkova, 2006)(Appendix 1).

형태학적 특징은 외형에서 잘 드러나듯이 사상체(tric-



**Fig. 1.** Map showing the monitoring station of algal alert system in Boryeong Reservoir and the sampling stations of genus *Aphanizomenon* population occurred in various inland waters of the four large rivers basin, Korea from 1971 to 2017. Numerics indicate as follows: 1, Euiam Reservoir; 2, Paldang Reservoir; 3, Gyeongan Stream; 4, Seokchon Reservoir; 5, Woncheon-Suwon-Hwangguji Streams; 6, Singu Reservoir; 7, Boryeong Reservoir; 8, Yongdam Reservoir; 9, Daecheong Reservoir; 10, Songchon Water Treatment Plant; 11, Geum River Estuary; 12, Andong Reservoir; 13, Nakdong River; 14, Hoidong Reservoir (Mulgeum); 15, Deokdong Reservoir; 16, Hoiya Reservoir and 17, Yeongsan River.

home, 수십~수백  $\mu\text{m}$ )의 묽음으로 되어 있고, 대부분 영양세포 (vegetative cell)로 구성되어 있으며 (Komarek and Komarkova, 2006), 세포 간에 간헐적으로 이형세포 (heterocyst)와 휴면(무성)포자 (akinetete, resting-spore)를 만들어 열악한 성장환경 조건에도 생명력을 유지(최소 >18년)할 수 있는 독특한 생활사를 영위하고 있다 (Yamamoto, 2009b; Yamamoto and Nakahara, 2009) (Appendix 1). 성장(속도)은 수환경 요인 중 수온과 pH에 의한 영향이 커서 >15°C (하한 <11°C) 또는 pH >9.0 (하한 <7.1)에서 매우 높으며, 광(일사)량에 덜 민감하고 암 (dark) 상태에서 발아되지 않는 생리적 특성을 가지고 있다 (Yamamoto and Nakahara, 2005, 2009).

*Aphanizomenon*을 포함한 남조류의 분류는 통상적으로 사상체의 폭, 세포크기, 분열·배열형태, 색소 및 기낭 (gas vesicle) 유무 등 형태학 및 광합성적 특징에 기본을 두고 있다 (Komarek and Anagnostidis, 1986, 1989). 반면에, 실내 배양조건에 따른 환경 변화로 인해 동정 결과에서 차이 (>50%)가 있을 수 있다 (Komarek and Anagnostidis, 1989; Zapomelova *et al.*, 2008). 예를 들어, 기낭은 성장 조건 또는 상이한 환경에 따라 다양성을 가지며, 배양 중 소실되기

도 한다 (Rudi *et al.*, 1997). 최근 들어, 이러한 형태학적 분류체계의 한계를 극복하고자 유전자 염기 구성비율과 서열 결정 등에 의한 분자생물학적 접근이 활발하게 진행되고 있다 (Laamamen *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; Rajaniemi *et al.*, 2005a, b; Komarek and Komarkova, 2006; Ryu *et al.*, 2017).

국내에서 *Aphanizomenon*에 관한 연구는 육수·생태학적 측면에서 식물플랑크톤 군집구조와 녹조현상 원인생물 조사의 일환으로 분포와 생태에 대한 내용이 대다수를 차지하였다 (Cho and Ra, 1971; Kim *et al.*, 1998; Lee, 2001, 2003, 2005, 2014a; Han *et al.*, 2002; Kim and Hwang, 2004; Kim *et al.*, 2004, 2005b; Yih *et al.*, 2005a, b; Park *et al.*, 2005, 2006b, 2015; Choi *et al.*, 2007; Jung, 2007; GRBMC, 2012; Son *et al.*, 2013; Noh *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2014; Jeong, 2016; Ryu *et al.*, 2016). 그 외 독소 (Jung *et al.*, 2003; Park *et al.*, 2006a; Park *et al.*, 2011), 이취물질 (Bae *et al.*, 2001; Kim, 2014; Lee, 2014b; Kim *et al.*, 2015), 분자생물학적 분석 (Ko *et al.*, 2004, 2011; Kim *et al.*, 2006; Oh, 2007; Park *et al.*, 2013; Ryu *et al.*, 2017), 중 보존 (Park, 2006) 및 현존량 산정 방법론 (You *et al.*, 2014)이 있었으며, 퇴적층 (bottom sediment)의 휴면포자 분포 및 발아·성장 특성 (Kim *et al.*, 2005a, 2016)에 관한 것이었다. *Aphanizomenon*에 대해 특화된 것은 소수에 불과하였고 (Kim *et al.*, 2005a; Ryu *et al.*, 2016, 2017), 수문·생태학적 관점과 저수온기의 동태학적 연구는 전혀 없었다.

본 연구의 목적은 국내에서 지정하고 있는 CyanoHABs 중 최근에 해를 거듭할수록 관찰 빈도와 세포수가 증가하고 있을 뿐만 아니라 저온기 (겨울철)에도 다량 출현하여 그 중요성이 부각되고 있는 *Aphanizomenon*속 개체군의 분포 및 생태학적 특성 (예, 재입)을 비교 고찰하는 것이었다. 그 결과, 저수지와 하천 (보 pool)에서 전개되고 있는 *Aphanizomenon*의 시공간적 동태에 대한 수문·육수학적 이해를 돕는 데 유용한 기초자료로서 제공하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사지 개황

보령호 (Boryeong Reservoir)는 충남 서북부 지역에 위치 (36°17'29.17"N, 126°40'12.46"E)해 있으며, 1992년 6월부터 1998년 10월까지 댐 건설 공사로서 만들어진 인공 저수지이다 (Fig. 1). 저수지의 유역면적은 159.3 km<sup>2</sup>이며, 이 중에 산림이 128.3 km<sup>2</sup> (80.1%), 농경지는 16.1 km<sup>2</sup> (10.1



**Table 1.** General geographic and limnological features of Boryeong Reservoir. Average records from 1998 to 2016.

Attribute	Boryeong Reservoir
River system	Seongju Stream (Woongcheon Stream)
Elevation (EL.m)	79.0
Watershed area (km <sup>2</sup> )	163.6
Reservoir area (km <sup>2</sup> )	5.8
Dam hight (m)	50.0
Dam length (m)	291.0
Dam type	Central core earth-rockfill dam
Yearly average rainfall (mm)	1,245.0
Flood water level (EL.m, FWL)	75.0
Normal high water level (EL.m, NHWL)	74.0
Restricted water level (EL.m, RWL)	64.0
Low water level (EL.m, LWL)	50.0
Total impoundment (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	116.9
Available impoundment (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	108.7
Flood control quantity (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	10.0
Hydropower generation (GWh yr <sup>-1</sup> )	5.8
Year of construction	October 1998

%), 주거지는 4.3 km<sup>2</sup> (2.7%)이고, 도로를 포함한 기타 면적은 10.6 km<sup>2</sup> (5.5%)를 차지하고 있다(Table 1) (K-water, 2015). 저수면적은 6.4 km<sup>2</sup>로서 유역면적/저수면적의 비는 약 24.9이다(Table 1). 총 저수량과 유효저수량은 각각 116.9 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>, 108.7 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>로서 홍수조절, 수력발전 및 각종 용수(생활, 농·공업 및 하천유지) 공급 등 다목적으로 이용되고 있다(K-water, 2015). 또한, 충남 서북부지역(보령, 서산, 당진시, 서천, 청양, 홍성, 예산, 태안군 및 태안 화력발전소)의 유일한 대규모 수원으로서 수자원 확보와 활용 면에서 사회·경제적 정책 기능을 지원하고 있다.

보령호로 유입되는 주요 하천(소유역 면적)은 상류부터 웅천천(58.0 km<sup>2</sup>), 개화·성주천(44.1 km<sup>2</sup>), 대농천(14.3 km<sup>2</sup>), 도흥천(12.5 km<sup>2</sup>), 옥현천(5.0 km<sup>2</sup>) 및 평촌천(3.6 km<sup>2</sup>) 이 해당하며(Fig. 1), 여름철(6월~9월) 이외 기간(예, 갈수기)에 유량이 그리 풍부한 편은 아니고, 시기에 따라 건천에 가까운 형태를 보이는 곳도 빈번하게 관찰할 수 있었다. 저수지의 형태는 하천 유입부와 댐 부근의 만곡부를 제외하고 본류를 중심으로 저수 길이에 비해 폭이 좁고, 수심은 하류의 댐 부근에서 가장 깊은 구조를 갖고 있다. 그리고 최근 2~3년 동안 동계~춘계에 유례없는 이상 갈수(물 빈곤)의 위기 상황을 겪을 정도로 최악의 저수위 상태가 반복되면서 이를 대체 감당하기 위해 2016년 2월 22일에 금강(백제보 하류 지점)~보령호(상류 하천)를 잇는 인공 도수로(L=21.9 km)를 뚫어 건설하였으며, 일 통수량은 115 × 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>로서 저수지의 수위 상황을 고려하여 비상

시에만 송수하고 있다(<http://www.molit.go.kr>).

## 2. 강우·수문 및 조류경보제 자료 분석

1998년 1월부터 2017년 2월까지 강수량과 수문(유입량, 방류량, 취수량 및 수위)자료는 기상청(<http://www.kma.go.kr>)과 국가수자원관리종합정보시스템(<http://www.wamis.go.kr>)에서, 그리고 2010년 1월부터 2017년 2월까지 조류경보제 운영결과는 환경부 금강유역환경청(수계관리위원회)으로부터 각각 제공받았다. 참고로, AAS의 경보 발령기준 항목은 2015년까지 CyanoHABs의 세포수 합과 Chlorophyll-*a* (Chl-*a*) 농도를 사용하였으나, 2016년부터 단순 축소화하여 CyanoHABs의 세포수(합)만 사용하고 있으며, 현장 조사도 변법(표층 채수 → 상·중·하층 혼합 채수)으로 하고 있다(MOE, 2015). 수집한 기초자료는 각 요인별 결측 또는 이상치를 검토하였고, 확인된 자료를 가지고 최종적으로 분석하였다. 수문자료 중 유량은 유입량과 방류량으로 구분하였고, 방류량은 수문(watergate)-여수로(spillway)와 발전(hydropower) 방류 및 취수량으로 나누었다.

## 3. 현장 조사 및 통계 분석

기상·수문요인의 변동에 따른 보령호의 지리·지형적 현황 및 그 특성을 파악하고자 2013년 1월부터 2016년 2월까지 매월 1회씩 현장조사를 수행하였다. 장마기간(6월 25일~9월 24일) 전·후와 집중호우가 있는 직후에는 주 단위로 관찰하였다. 조사지점은 조류경보제(algae alert system, AAS) 운영지점의 1개이었다(Fig. 1). 저수지의 수문사상에 따른 지형 및 형태학적 변동을 직접 관찰하였고, 매번 상류에서 하류로 이동하면서 파악하였으며, 주요 내용을 자세하게 기록하였다. 특히, 2013년 7월 초에 댐 수문 개방 후 여수로 방류 시기는 저수지의 물 흐름을 일 모니터링하여 수체의 유동성을 직접 육안으로 확인하였다. 자료의 시공간적 차이 분석을 위해 ANOVA의 사후분석법(host-hoc Tukey's HSD test)을 이용하였고, 요인별 상관분석은 Spearman's Rank 분석법으로 수행하였다. 통계분석은 SYSTAT<sup>®</sup> 8.0 프로그램(SPSS, 1998)을 이용하였으며, 유의성은 p<0.05로 확인하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 강우·수문학적 요인의 일 변동

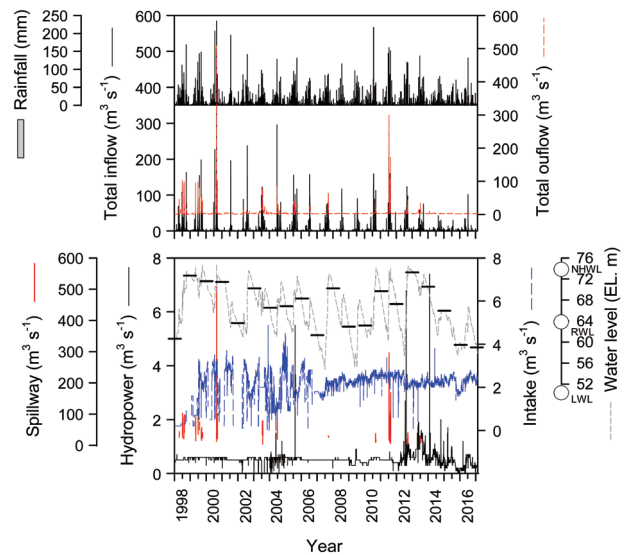
보령호에서 1998년 1월부터 2017년 2월까지 관측된 강

**Table 2.** Descriptive statistics of rainfall and hydrological factors associated with water quantity in the watershed of Boryeong Reservoir from January 1998 to February 2017. The values indicate mean, standard deviation, minimum and maximum, respectively. Results of the Tukey's test is represented by a, b, c, when years with different letters are statistically different from each other ( $a > b > c$ ) and years that share letter are statistically similar.

Factors/Years	1998~2014	2015	2016~17	p
Daily rainfall (mm)	12.4 ± 22.7 <sup>b</sup> (0.1/235.0)	8.8 ± 12.4 <sup>a</sup> (0.3/70.4)	10.0 ± 17.4 <sup>a</sup> (0.3/132.0)	.000
Inflow (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )				
– Total inflow	5.7 ± 18.1 <sup>b</sup> (0.1/363.1)	2.1 ± 2.9 <sup>a</sup> (0.1/30.2)	2.7 ± 7.0 <sup>a,b</sup> (0.1/101.9)	.000
Outflow (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )				
– Total outflow	4.3 ± 11.6 <sup>b</sup> (0.5/511.1)	2.7 ± 0.6 <sup>a</sup> (1.5/3.9)	2.7 ± 0.5 <sup>a</sup> (1.8/3.6)	.000
– Hydropower generation discharge	0.6 ± 0.2 <sup>c</sup> (0.1/7.4)	0.4 ± 0.2 <sup>b</sup> (0.1/1.7)	0.3 ± 0.2 <sup>a</sup> (0.1/1.2)	.000
– Watergate spillway discharge	52.1 ± 62.1 (2.7/507.2)	–	–	–
– Water supply	2.1 ± 0.7 <sup>a</sup> (0.1/4.9)	2.2 ± 0.3 <sup>b</sup> (1.4/2.7)	2.3 ± 0.2 <sup>b</sup> (1.7/2.8)	.000
– Others	1.3 ± 3.9 <sup>b</sup> (0.1/35.4)	0.2 ± 0.1 <sup>a</sup> (0.1/0.3)	0.2 ± 0.1 <sup>a</sup> (0.1/0.3)	.000
Water level (EL.m)	66.9 ± 4.4 <sup>b</sup> (54.8/74.9)	62.1 ± 2.7 <sup>a</sup> (57.4/66.1)	61.6 ± 2.4 <sup>a</sup> (57.9/66.8)	.000

수량, 유입량, 방류량(여수로, 발전, 취수) 및 수위를 나타낸 것은 Fig. 2 및 Table 2와 같다. 무강수일을 제외한 연간 강수일의 범위는 80~184일이었고, 평균값은 113일이었다(Table 2). 평균 강수일보다 적었던 해는 1998년~2002년, 2006년~2009년, 2011년~2013년 및 2016년으로서 2013년~2015년 사이에 다소 증가하였다(Fig. 2). 연도별 총 강수량의 범위(평균값)는 871.0~1,912.9 mm (1,371.0 mm) 이었고(Table 2), <1,000 mm이었던 해는 2001년과 2008년이었다(Fig. 2). 그리고 연중 6월~9월에 강수량의 범위는 362.2~1,547.6 mm이었고, 평균값은 908.9 mm이었다. 이것은 연간 강수량( $r=0.927, p<0.01$ )의 35.5~84.5% 범위(평균값 64.7%)에 해당하였다. >50 mm (R50)는 총 강수량(TRA) ( $r=0.834, p<0.01$ )과 6월~9월 강수량(R6-9) ( $r=0.810, p<0.01$ )에, >100 mm (R100)는 여수로 방류량(SPI) ( $r=0.837, p<0.01$ )에 유의한 양의 상관성을 나타냈으며, TRA는 TOI(총 유입량) ( $r=0.939, p<0.01$ )에 밀접한 관련성을 보였다(Appendix 2).

연도별 총 유입량의 범위(평균값)는 589.5~2,872.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (1,561.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)로서 그 차이가 매우 컸다(Fig. 2, Table 2). 평균값을 초과한 풍수년은 1998년~2000년, 2003년~2006년 및 2011년이 포함되었고, 2001년~2008년, 2014년, 2015년 및 2016년은 <1,000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>를 보여 상대적으로 수자원이 빈약한 갈수년에 해당하였다. 총 방류량은 974.7~2,882.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 범위이었고, 평균값은 1,511.7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>이었다



**Fig. 2.** Daily fluctuations of rainfall, total inflow, total outflow, detailed outflow components (spillway, hydropower and intake) and water level in Boryeong Reservoir basin from January 1998 to February 2017. Horizontal bars on the water level indicate the state in January every year.

(Fig. 2, Table 2). 방류 패턴은 유입( $r=0.843, p<0.01$ ) 양상과 달리 수문 방류( $r=0.799, p<0.01$ ) 시기를 제외하고 일정하게 조절되는 특성이 현저하였다( $p>0.05$ ).

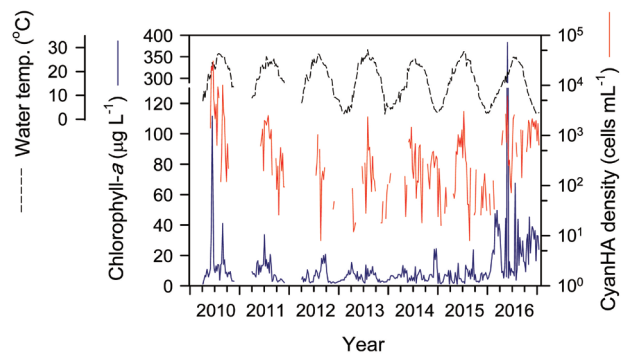
수문 - 여수로와 발전 방류량의 범위(평균값)는 각각

**Table 3.** Yearly comparison of water temperature, chlorophyll-*a* and cyanobacterial cell density in the lower part of Boryeong Reservoir from 2010 to 2016. The values indicate mean, standard deviation, minimum and maximum, respectively. Results of the Tukey's test is represented by a, b, c, when years with different letters are statistically different from each other ( $a > b > c$ ) and years that share letter are statistically similar.

Factors	Years								p
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016		
Water temperature (°C)	20.0 ± 5.7 <sup>c</sup> (7.5/27.3)	19.2 ± 4.8 <sup>b,c</sup> (8.8/26.0)	19.0 ± 5.7 <sup>b,c</sup> (6.7/27.1)	15.4 ± 9.2 <sup>a,b,c</sup> (2.0/28.9)	14.6 ± 7.2 <sup>a,b</sup> (4.0/25.0)	15.4 ± 8.3 <sup>a,b,c</sup> (2.4/28.1)	12.7 ± 7.9 <sup>a</sup> (2.1/25.8)		.000
Chlorophyll- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )	14.9 ± 20.1 <sup>a,b</sup> (1.2/111.5)	9.4 ± 6.6 <sup>a</sup> (2.1/33.6)	6.8 ± 5.3 <sup>a</sup> (1.7/20.7)	6.1 ± 3.3 <sup>a</sup> (1.9/15.4)	6.1 ± 2.6 <sup>a</sup> (1.9/13.4)	6.9 ± 5.7 <sup>a</sup> (1.1/24.4)	27.5 ± 49.0 <sup>b</sup> (3.6/383.4)		.000
Cell density (cells mL <sup>-1</sup> )	6,217 ± 1,931 <sup>b</sup> (120/30,458)	765 ± 740 <sup>a</sup> (26/2,506)	233 ± 291 <sup>a</sup> (8/1,034)	242 ± 487 <sup>a</sup> (12/2,354)	301 ± 313 <sup>a</sup> (18/1,468)	348 ± 539 <sup>a</sup> (8/3,016)	995 ± 1,130 <sup>a</sup> (26/0/6,126)		.000

55.6~1,569.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (614.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, 총 방류량의 40.4%), 117.4~330.1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (191.6 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, 12.5%)이었고, 취수량은 84.3~926.1 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (714.9 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, 47.1%)이었다(Fig. 2, Table 2). 여수로 방류는 1998년~2000년(4월~10월), 2003년~2004년(6월~7월, 10월), 2007년(9월) 및 2010년~2013년(7월~9월)에 있었고, 기간은 2일~15일 범위이었다(Fig. 2). 2014년~2016년에는 여름철 경우가 빈약하여 여수로 방류가 없었다(Fig. 2, Table 2). 발전 방류는 1998년~2011년까지 평균값이 188.7 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>로서 거의 일정하였으나, 2012년(251.0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)부터 다소 증가하였고, 2015년~2017년(123.0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)은 평균 유량보다 적은 시기가 빈번하였다(Fig. 2). 취수량은 2006년까지 변동 폭이 매우 컸으나, 2007년 중반부터 평균값이 845.0 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> 수준에서 소폭 증감하는 변동을 보였다(Fig. 2). 취수량은 하계에 비교적 많았고 동계에 적은 계절성이 다소 관련되었는데, 유의한 차이는 아니었다( $p > 0.05$ ).

수위의 변동 폭은 EL. 54.8~73.5 m(18.7 m 차이)이었고, 평균값은 EL. 67.0 m이었다(Fig. 2, Table 2). 수위는 여름철에서 가을철로 이행하면서 증가하였고, 이듬해 6월 중·하순에 감소하는 경향이었으나, 증감 폭은 시기에 따라 차이가 매우 컸다. 6월 중 저수위 수준에 비교적 가까웠던 해는 2007년(EL. 54.8 m), 2009년(EL. 55.2 m) 및 2012년(EL. 57.4 m)이었다. 반면, 1월~2월에 수위는 1998년(담수 초기, EL. 60.6 m), 2016년(EL. 58.5 m) 및 2017년(EL. 57.9 m)을 제외하고 비교적 높은 수위를 유지하였다(Fig. 2). 저수지의 수위는 몬순(태풍) 시기의 강우 양상에 의존적이었으며(Shin *et al.*, 2016), 이때 유입량이 예상 밖으로 적을 경우 수위 회복(상승)은 좀처럼 쉽지 않은 상태로 진행하게 되었다. 저수지 유입량은 최대 강수량과 관련성이 컸고(Hwang *et al.*, 2016, 2017; Shin *et al.*, 2016), 최대 방류량, 발전 방류량 및 기타 방류량이 큰 것은 수문-여수로 방류량의 유·무 또는 클 때이었으며(Hwang *et al.*, 2016,



**Fig. 3.** Daily fluctuations of water temperature, chlorophyll-*a* and cyanobacterial harmful algae (CyanoHABs) cell density in Boryeong Reservoir from April 2010 to February 2017.

2017; Shin *et al.*, 2016), 최고 수위를 유지하는 데도 영향을 주었다(Fig. 2, Table 3).

## 2. 수온, Chl-*a* 및 유해조류 현존량 변동

보령호에서 조류경보제를 시행한 시점인 2010년부터 2017년 2월까지 수온, Chl-*a* 및 CyanoHABs 세포밀도를 나타낸 것은 Fig. 3 및 Table 3과 같다. 수온의 범위(평균값)는 2.1~28.9°C(16.1°C)이었다(Fig. 3, Table 3). 최고·최저값은 각각 8월과 2월에 관찰되었고, 연도별 6월~9월에 평균값은 21.6~25.1°C 범위로서 2013년에 높았으며, 2016년에 낮았다(Fig. 3). Chl-*a* 농도는 1.1~383.4 µg L<sup>-1</sup> 범위로서 평균값은 14.6 µg L<sup>-1</sup>이었다(Table 3). 2010년과 2016년에 최대값은 각각 111.5 µg L<sup>-1</sup>, 383.4 µg L<sup>-1</sup>로서 다른 해에 비해 극도로 높은 과영양 상태를 기록하였다(Fig. 3). 특히, 2016년의 평균 농도는 2010년, 2011년 및 2012년~2015년에 비해 1.8배, 2.9배 및 4.2배 높아 현저하게 대비되었다(Fig. 3, Table 3). 이러한 양상은 CyanoHABs의 현존량에서도 유사한 것으로 볼 수 있었다( $p < 0.05$ ). 2010

**Table 4.** A list of major species of genus *Aphanizomenon* population occurred in various inland waters of the four large rivers basin, Korea from 1971 to 2016.

Localities	Species	Occurred month	Temperature (°C)	Standing crops or relative abundance (cells mL <sup>-1</sup> (cells g <sup>-1</sup> ) or %)	Chl- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )	References
<b>RESERVOIRS</b>						
Euiam Reservoir	<i>A. ovalisporum</i>	June~August	22.5~27.5	.	.	Cho and Ra (1971)
Paldang Reservoir	<i>Aphanizomenon</i> sp.	August~October	.	.	.	Park <i>et al.</i> (2011)
	<i>A. flos-aquae</i>	October	18.0	50.6~122.7 × 10 <sup>3</sup>	10.3~24.5	Lee (2014b)
Paldang Reservoir (sediment)	<i>Aphanizomenon</i>	October	21.0~21.3	0.2~6.7 × 10 <sup>3</sup> (Akinetes)	.	Kim <i>et al.</i> (2016)
	<i>Aphanizomenon</i> sp.	September, 1~15	24.3~28.3	76~83 (germinated cells, 7 days)	16.2~24.2	Kim <i>et al.</i> (1998)
Daecheong Reservoir	<i>A. flos-aquae</i>	July~August	28.0	.	.	Ko <i>et al.</i> (2004)
	<i>Aphanizomenon</i> sp.	June~September	.	.	.	Kim <i>et al.</i> (2006)
Yongdam Reservoir	<i>Aphanizomenon</i>	August	29.0	0.7~16.6 × 10 <sup>3</sup>	19.5~31.1	Ko <i>et al.</i> (2011)
	<i>A. flos-aquae</i>	July~October	> 20°C	.	.	Kim (2014)
Cheonho Reservoir	<i>A. issatschenkoi</i>	Summer, 2003	.	.	.	Jung (2007)
	<i>Cuspidothrix issatschenkoi</i>	January~December	.	67~3.7 × 10 <sup>3</sup>	.	Park <i>et al.</i> (2011)
Andong Reservoir	<i>Aphanizomenon</i>	May	24.0	4.9 × 10 <sup>3</sup>	18.5	GRBMC (2012)
	<i>A. flos-aquae</i>	July	6.0	220,000 × 10 <sup>3</sup>	.	Noh <i>et al.</i> (2014)
Hoedong Reservoir	<i>A. flos-aquae</i>	January	.	0.2~81.2 × 10 <sup>3</sup>	.	Kim (2014)
	<i>A. flos-aquae</i>	May~November	32.0	.	.	Kim <i>et al.</i> (2015)
Sayon Reservoir	<i>Aphanizomenon</i>	July~September (bloom at August)	.	.	.	Park <i>et al.</i> (2006)
	<i>Aphanizomenon</i> sp.	September~November	< 5.0	250.0 × 10 <sup>3</sup>	.	Jeong (2016)
Hoeya Reservoir	<i>A. flos-aquae</i>	December~June	.	0.4~2.2 × 10 <sup>3</sup>	28.8	Oh (2007)
	<i>Aphanizomenon</i>	January~December	< 5.0	.	.	Park <i>et al.</i> (2005)
Deokdong Reservoir	<i>A. flos-aquae</i>	August~September	.	26.0	.	Park <i>et al.</i> (2015)
	<i>Aphanizomenon</i> sp.	January~December	.	12.0	.	Kim and Hwang (2004)
Singu Reservoir	<i>A. flos-aquae</i>	August~September	.	150~24.0 × 10 <sup>3</sup>	32.5~202.0	Kim <i>et al.</i> (2005b)
	<i>Aphanizomenon</i> sp.	July~September	.	.	.	Kim <i>et al.</i> (2005a)
Seokchon Reservoir	<i>A. flos-aquae</i>	September	.	.	.	This study
	<i>Aphanizomenon</i> sp.	June~August	.	(27.3~38.3)	.	
Boryeong Reservoir	<i>A. flos-aquae</i>	November~December	.	.	.	
	<i>Aphanizomenon</i> sp.	August~September	.	26.0	.	You <i>et al.</i> (2014)
Nakdong River	<i>A. flos-aquae</i>	July~September	.	12.0	.	Choi <i>et al.</i> (2002)
	<i>A. issatschenkoi</i>	September	.	.	.	Lee <i>et al.</i> (2005)
RIVERS	<i>A. flos-aquae</i>	June~August	.	.	.	Yu <i>et al.</i> (2014)
	<i>A. flos-aquae</i>	November~December	.	(27.3~38.3)	.	

Table 4. Continued.

Localities	Species	Occurred month	Temperature (°C)	Standing crops or relative abundance (cells mL <sup>-1</sup> (cells g <sup>-1</sup> ) or %)	Chl- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )	References
Geum River (Estuary)	<i>A. flos-aquae</i>	May~June, January	20.6~22.5	(15.2)	.	Park <i>et al.</i> (2015)
	<i>Aphanizomenon</i>	May~November		26~36.9 × 10 <sup>3</sup>		Ryu <i>et al.</i> (2016)
	<i>A. flos-aquae</i> (NIER-10044)	April~May	840, (1.0~42.0)	.	Park <i>et al.</i> (2006)	
	<i>A. flos-aquae</i>				Lee <i>et al.</i> (2005a)	
Yeongsan River	<i>Aphanizomenon</i> sp.	Autumn	.	.	.	Lee <i>et al.</i> (2005b)
						Lee (2014a)
						Son <i>et al.</i> (2013)
<b>STREAMS</b>						
Gyeongang Stream	<i>A. flos-aquae</i>	September~October	.	27.3 × 10 <sup>3</sup> (54.9)	.	Lee <i>et al.</i> (2001)
Woncheon Stream	<i>A. flos-aquae</i> (?)	August, October	.	.	.	Han <i>et al.</i> (2002)
Suwon Stream						Lee (2001)
Hwangguji Stream						
<b>OTHERS</b>						
Unknown	<i>A. flos-aquae</i> (NIER-10028)	October	.	.	.	Park (2006)
Songchon WTP	<i>Aphanizomenon</i>	July~October	.	262.8 × 10 <sup>3</sup>	.	Bae <i>et al.</i> (2001)

년, 2011년, 2012년~2015년 및 2016년에 각각 6,217 cells mL<sup>-1</sup>, 765.4 cells mL<sup>-1</sup>, 281.1 cells mL<sup>-1</sup> 및 995.4 cells mL<sup>-1</sup>로서 연도별로 차이가 컸다(Fig. 3). 또한, 저온기(11월~2월)에 유해조류가 관찰된 것은 2014년부터이었고, 그 후 2017년으로 갈수록 출현빈도뿐만 아니라 세포밀도도 더욱 높아지는 특성( $r = -0.720, p < 0.01$ )을 나타내어 > 1,000 cells mL<sup>-1</sup>를 초과하는 기간이 약 > 3개월을 넘기기도 하였다(Fig. 3).

3. 저수온기(동계)에 *Aphanizomenon*속 개체군의 분포 특성

국내의 의암호에서 Cho and Ra (1971)에 의해 조사된 이후, 전국의 하천과 저수지에서 *A. ovalisporum*, *A. issatschenkoi*, *A. flos-aquae* 및 *Aphanizomenon* sp.의 4종이 분포하는 것으로 보고되었다(Table 4, Fig. 1 참고). 이 중에서 *A. ovalisporum*과 *A. issatschenkoi*는 각각 의암호와 대청호·낙동강에서 기록되었고, 그 외 지역에서 관찰된 분류군은 대부분 *A. flos-aquae*와 *Aphanizomenon* sp.이었다(Table 4). *Aphanizomenon*은 중·고온기(85.3%)를 중심으로 주로 번성하였으며, 저온기에 출현한 것은 총 5회(최대 220,000 × 10<sup>3</sup> cells mL<sup>-1</sup>)로서 *A. flos-aquae*와 *Aphanizomenon* sp.만 해당하였다.

보령호의 수온이 2.1~22.3°C 범위에서 *Aphanizomenon* 현존량의 범위(평균값)는 108~2,160 cells mL<sup>-1</sup> (1,164 cells mL<sup>-1</sup>)이었고, 수온이 떨어지면서 동시에 세포수는 현저하게 증가하는 양상( $r^2 = 0.694, p < 0.01$ )을 보였다(Fig. 4). 이 기간에, Chl-*a*의 범위(평균값)는 14.1~45.3 µg L<sup>-1</sup> (28.8 µg L<sup>-1</sup>)로서 그 경향은 현존량과 유사하였으나( $r^2 = 0.518, p < 0.01$ ), 동일한 수온 범위 내에서 변화 폭은 더욱 컸다(Fig. 4). 이러한 결과를 보인 것은 수중에 *Aphanizomenon* 이외에 와편모조류 *Peridinium* sp.를 포함하여 기타 조류가 다수 분포하였기 때문이었다(data not shown). 그리고 저수온기(1월)에 *Aphanizomenon*의 최대값은 2015년(480 cells mL<sup>-1</sup>)보다 2017년(2,160 cells mL<sup>-1</sup>)에 4.5배 정도 높이가 비교되었으며(Fig. 5), 해를 거듭하면서 크게 증가하는 양상이었다.

4. 동계에 수위 강하와 연계된 *Aphanizomenon*의 재입 잠재성

보령호의 수위가 EL. 57~64 m 범위에서 *Aphanizomenon*의 현존량 분포를 나타낸 것은 Fig. 6과 같다. 수위 EL. 60.5 m를 기준으로 수온 10°C 이상(가을철, 11월)·이하(겨울철, 12월~2월)로 구분되었고, 세포밀도의 범위(평



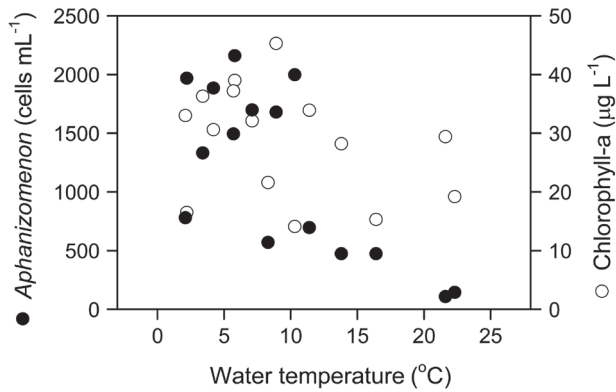


Fig. 4. Relationships between water temperature and standing crops of *Aphanizomenon* (●), chlorophyll-a concentration (○) in Boryeong Reservoir from November 2016 to February 2017.

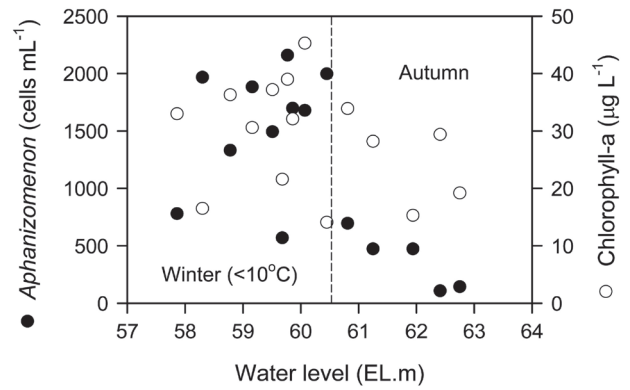


Fig. 6. Relationships between water level and standing crops of *Aphanizomenon* (●), chlorophyll-a concentration (○) in Boryeong Reservoir from November 2016 to February 2017.

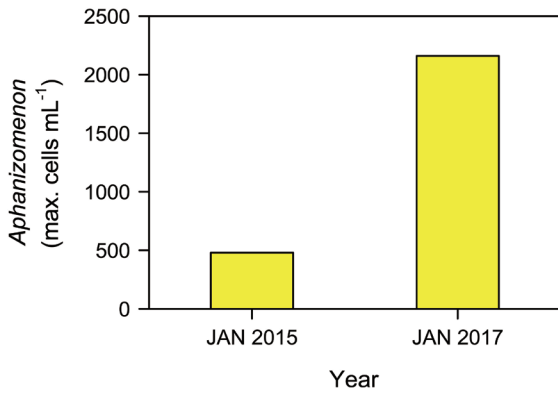


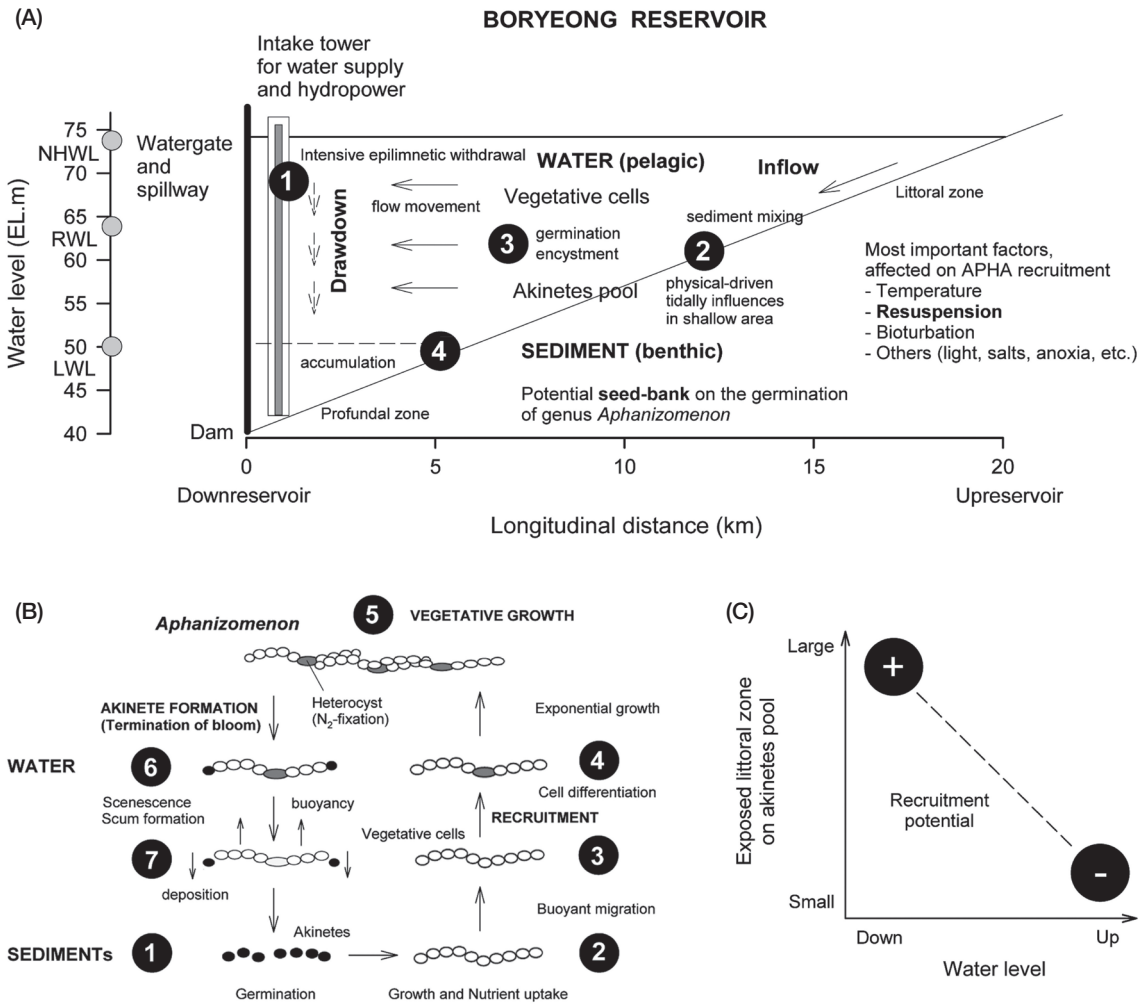
Fig. 5. Comparison of maximum *Aphanizomenon* population density observed at January, 2015 and 2017 in Boryeong Reservoir.

균값)는 각각  $108\sim 696\text{ cells mL}^{-1}$  ( $379\text{ cells mL}^{-1}$ ),  $570\sim 2,160\text{ cells mL}^{-1}$  ( $1,556\text{ cells mL}^{-1}$ )이었다. 수위가 감소하면서 현존량은 도리어 증가하는 양상이 현저하였고 ( $r^2 = 0.551$ ,  $p < 0.01$ ) (Yang *et al.*, 2016), 이것은 전술한 수온-세포밀도의 관계(Fig. 4 참고)와 그 개형이 유사하였다.

저수지에서 수문 개방과 취수 조작은 광역 또는 국지적(방류 수심과 방류대)인 영향을 미치게 되어 수중의 물질분포 특성에 변화를 주게 된다(Thornton *et al.*, 1990; Shin and Hwang, 2017). 또한, 저수지의 가장 큰 특성 중 하나인 WLF를 유도하는 주요 내적 인자는 홍수조절, 수력발전 및 용수공급·이용을 들 수 있다. 이것은 저수지 형태, 혼합체계, 중·횡적 수역 간 물교환, 체류시간 및 각종 물환경요인의 변화를 통해 침전과 재부유 양상에도 영향을 주게 될 뿐만 아니라 수생태계에 대한 무생물적 스트레스로도 작

용할 수 있다(Ryder, 1978). 특히, 홍수조절에 대비하여 일정 수준(예, 저수위(LWL))의 낮은 수위를 유지해야 하므로 계절에 따라 변동하게 된다. 수위의 상승 또는 하강 시기 및 그 정도는 기상 패턴과 물 이용성에 의해 다소 가변적일 수 있다(Hwang *et al.*, 2016, 2017; Shin *et al.*, 2016). 수위가 증가할 때, 저수지의 종적 수면 길이와 수심은 크게 증가하게 되며, 이에 비례하여 저수량도 커지게 된다(Yang *et al.*, 2016). 이때 물 흐름은 상류와 지류의 만입부에서 역류(back-flow)하게 되고, 유입수와 영양염의 부하는 수위가 하강할 때까지 시공간적으로 지체되거나 간헐 있게 된다(Thornton *et al.*, 1990; Ashby, 2009). 반대로, 수위가 하강할 때 수체는 개방수역으로 이동하고 입자물질과 영양염도 동반되어 이송하게 된다(Yang *et al.*, 2016; Hwang *et al.*, 2017). 따라서 홍수를 저장·조절하기 위해 수문을 조작하는 동안 또는 수력발전과 용수 이용의 취수량에 따라 WLF가 생기게 되며, 상·하류 간에 물질이송 기작의 기초가 된다(Kaster and Jacobi, 1978; Thornton *et al.*, 1990).

보령호의 수심별 수온 분포(2016년 1월~2017년 2월)를 분석한 결과, 6월~7월을 제외하고 연중 상·하층이 잘 혼합되는 구조를 나타내었다. 그리고 상류에서 하류로 갈수록 상·하층의 온도 차이(상류  $2\sim 6^\circ\text{C}$ , 하류  $8\sim 11^\circ\text{C}$ )가 커지나 그 유지기간은 매우 짧은 경향(약 2개월)을 가졌을 뿐만 아니라 다른 저수지들에 비해 시공간적 및 계절적으로 turn-over가 매우 빠른 특성을 가지고 있었다. 따라서 퇴적물이 재부유될 가능성도 그만큼 클 수 있었고, 댐의 최하류부에서 표층수를 계속적으로 취수하기 때문에 이 또한 상층(epilimnion)에 유효성을 제공하는 역할이 강화될 수 있었다(Evans, 1994; Zhang *et al.*, 2013).



**Fig. 7.** Schematic diagram and flow chart illustrated (A) the proliferation of genus *Aphanizomenon* population in Boryeong Reservoir during the winter season of 2016 and 2017. ①, intensive intake; ②, sediment disturbance and resuspension; ③, germination and encystment of akinetes; ④, accumulation of vegetative cells after continuous drawdown. (B) the life-cycle of *Aphanizomenon* (N-fixing akinete forming cyanobacteria) from germination to formation of akinete. ①~②, sediment surface; ③~⑦, water column, respectively. Schematic view of the life cycle reillustrated from Yamamoto and Nakahara (2009). (C) a neat explanation suggested relationship between water level and exposed littoral zone on the recruitment potential of *Aphanizomenon* population.

댐 저수지에서 WLF는 물질의 침전뿐만 아니라 퇴적물을 재부유시킬 수 있는 요인으로 작용할 수 있고 (Evans, 1994; Yang *et al.*, 2016), 재부유된 물질은 수층의 유·무기물질의 양과 수질 분포에 영향을 주게 된다 (Thornton *et al.*, 1990). 수위가 하강할 때, 이류 (advection) 또는 바람 (wind)에 의한 직·간접적인 와류 (turbulence)는 연안대 (littoral zone)와 상류의 저수심 수역에서 표층 퇴적물을 부상시킬 수 있는 가능성이 충분하게 상존한다 (Karlson *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2016). 또한, 저수지의 하층을 따라 이동하는 저층 밀도류 (underflow)에 의해 형성되는 바닥층의 전단력은 수층~퇴적층 경계면에

축적된 유·무기 미세입자를 재부유시킬 뿐만 아니라 시기에 따라 내부 깊은 곳으로 이동시키기도 한다 (Thornton *et al.*, 1990; Ishikawa *et al.*, 2002). 최종적으로, WLF의 지속적인 강하작용은 저수지의 가장자리를 점진적으로 노출시켜 넓은 빨 지대 형성과 육역화를 가중시키게 되고, 충수 (refilling)·배수 (emptying) 단계의 계절적 여건에 따라 증감 양상이 반복되는 형태를 보이게 된다 (Yang *et al.*, 2016).

저수지의 WLF는 일주기 또는 계절적 변동에서 크고 작은 차이를 현저하게 보이는데, 이것은 수문·여수로, 수력 발전 및 취수 등 방류 기구를 통해 인위적으로 조절하기

때문이다(Ashby, 2009; Yang *et al.*, 2016). 특히, 수력발전용 저수지에서 수위는 하루 중에도 큰 변화를 보일 수 있다(Hwang *et al.*, 2017). 또한, WLF는 시공간적으로 영양염 분포에 영향을 줄 수 있고, 저수지의 상·하류 및 개방수역(pelagic zone)~연안대(littoral zone)의 물질교환을 증가시키게 되어 조류의 성장을 유도할 수 있다(Ishikawa *et al.*, 2002). 보령호에서 수중 영양염 중 T-N과 T-P 농도가 각각  $1,267\sim 2,313\ \mu\text{g NL}^{-1}$ ,  $2\sim 17\ \mu\text{g PL}^{-1}$  범위이었고, 그 비율로 볼 때 P 제한성이 매우 강하였다. 특히, 저수온기 및 수위 강하 시기에는 연중 가장 낮은 농도( $< 3\ \mu\text{g PL}^{-1}$ )를 나타내어 녹조현상 수준은 기대하기가 쉽지 않았다(Reynolds, 1999). 따라서 WLF의 물리적 기작에 의해 *Aphanizomenon*은 퇴적층에서 발아된 후 영양세포는 조체 내에 저장된 P를 이용하는 수준에서 성장·증식을 이어가는 것으로 볼 수 있었고(Barbiero and Welch, 1992; Barbiero and Kann, 1994; Sondergaard *et al.*, 2001; Sanchez-Carrillo *et al.*, 2007; Carey *et al.*, 2008; Ni *et al.*, 2015; Lepori and Roberts, 2017), 수심 얇은 곳에서 재입된 후 깊은 개방 수층에서 용존 영양염(예, P)을 충분히 흡수 이용하는 데는 다소 불리한 환경조건으로 사료되었다(Karlsson-Elfgren and Brunberg, 2004; Uveges, 2012).

보령호에서 수문학적 구조와 유해조류 *Aphanizomenon*의 발생, 성장 및 이송 기작에 대한 내용을 요약한 것은 Fig. 7과 같다. 수위가  $> \text{EL. 74 m}$ 이면 수문개방에 의한 여수로 방류가 이루어지고, 그 외 유출(예, 용수공급, 발전)은 취수탑을 통해 방류되고 있다(Fig. 7A-①). 일 평균  $31.1 \times 10^4\ \text{m}^3\ \text{d}^{-1}$  (저수량의 0.3%)가 지속적으로 취수되고 있다. 따라서 유입량을 고려하더라도 저수온 갈수기는 취수량만큼 수위가 감소하게 되고, 수체에 미약한 유동성을 제공하게 된다(Shaw, 1983; Ishikawa *et al.*, 2002). 이때 댐(취수탑) 부근은 비교적 깊은 수심을 유지하게 되나, 상류부(물꼬리)와 연안대는 수심이 얇아져 퇴적층과 가까워지거나 육역화되어 노출된다(Fig. 7A-②). 수위가 하강할 때, 유입수의 흐름(유속)에 의해 퇴적층을 혼합체계로 유도하거나(Yang *et al.*, 2016), 수심이 얇을 경우 기상물리 요인(예, 바람)에 의해 수체에 물결 파동을 제공하여 바닥층(예, 종자 저장소)에 침적된 미세입자(예, 영양세포 또는 휴면포자)를 재부유시키게 된다(Evans, 1994; Faithful and Burns, 2006; Tan *et al.*, 2008; Karlson *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2015). 이때 휴면포자는 비계절적인 발아조건을 갖추게 되어 영양세포로 발달하며 수층으로 재입하는 전략의 전개가 가능하게 된다(Fig. 7A-③, B-①~③). 이렇게 재입된 영양세포는 방류시스템(취수탑)을 중심으로 이동하여 모이게 되고(Ishikawa *et al.*, 2002; Zhang *et al.*, 2013), 그 과정

에서 성장과 증식을 이루게 된다(Fig. 7B-④~⑤). 또한, 취수하는 양만큼 *Aphanizomenon*이 저수지에서 유출되어 세포밀도가 감소하게 되나(Welch *et al.*, 1972; Bortleson and Fretwell, 1993), 유입량이 빈약하고 수위가 지속적으로 낮아질 때 휴면포자의 분포지역은 넓어지며(Fig. 7A, C)(DESNH, 2010), 퇴적층과 가까워지기 때문에 발아뿐만 아니라 영양세포의 성장조건을 더욱 좋게 하여 개방수역에서 축적(Fig. 7A-②~④)될 가능성을 충분히 가지고 있었다(Tsujimura *et al.*, 2001; Ishikawa *et al.*, 2002). 따라서 저수지 하류에서 수위가 극도로 낮아지는 인위적 조절은 유해조류의 발생 가능성을 촉진 또는 증폭시킬 뿐만 아니라 그로 인해 이어지는 후속 수질·생태학적 영향(예, 독소 및 이취물질)도 면밀하게 고려되어야 하겠다.

## 적 요

남조류 *Aphanizomenon*속 개체군은 국내외에 널리 분포하고, 독소와 이취물질을 생산함으로써 유해조류로 잘 알려져 있어 육수생태학 분야에서 많은 관심을 갖게 된 분류군 중 하나에 속한다. 본 연구는 보령호에서 동계에 수위가 급격히 강하되면서 *Aphanizomenon*의 출현빈도, 강도 및 기간이 커지게 되어 이에 대한 시공간적 특성을 수문기상(1998년~2017년)·육수(2010년~2017년)학의 관점으로 상호 비교하였다. 국내에서 *Aphanizomenon*은 고온기에 주로 번성하였으며, 저온기에 출현은 총 5회로서 드물었다. 보령호에서 저온기(12월~2월)에 유해조류 *Aphanizomenon*이 관찰된 것은 2014년부터이었고, 그 후 2017년에 최대값  $2,160\ \text{cells mL}^{-1}$ 를 기록하였다. 그리고  $> 1,000\ \text{cells mL}^{-1}$ 를 초과하는 기간은 약 3개월을 넘기기도 하였다. 이것은 다른 아닌 저수온기( $< 10^\circ\text{C}$ )에 비정상적인 수위 강하와 관련성이 컸다. 동계에 수위 강하는 유해조류의 발아 및 발생을 촉진 또는 증폭시킬 수 있는 잠재적 특성을 가지고 있었다. 따라서 후속 수질·생태학적 영향(예, 조류독소 및 이취물질)도 면밀하게 고려되어야 할 필요성이 있었다.

## REFERENCES

- Ashby, S. 2009. Impacts of hydrology and hydropower on water quality in reservoir tailwaters. *Transactions on Ecology and the Environment* **124**: 55-66.
- Bae, B.U., Y.I. Kim and B.E. Lee. 2001. Monitoring of taste and odor compounds in drinking water supplies using practical taste and odor methods. *The Institute of Environmental*

- Studies* (Daejeon University) **5**: 3-20. (in Korean)
- Barbiero, R.P. and E.B. Welch. 1992. Contribution of benthic blue-green algal recruitment to lake populations and phosphorus translocation. *Freshwater Biology* **27**: 249-260.
- Barbiero, R.P. and J. Kann. 1994. The importance of benthic recruitment to the population development of *Aphanizomenon flos-aquae* and internal loading in a shallow lake. *Journal of Plankton Research* **16**: 1581-1588.
- Bortleson, G.C. and M.O. Fretwell. 1993. A Review of Possible Causes of Nutrient Enrichment and Decline of Endangered Sucker Populations in Upper Klamath Lake, Oregon. U.S. Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 93-4087. Oregon, USA. 24p.
- Bunn, S.E., M.C. Thoms, S.K. Hamilton and S.J. Capon. 2006. Flow variability in dryland rivers: Boom, bust and the bits in between. *River Research and Applications* **22**: 179-186.
- Carey, C.C., K.C. Weathers and K.L. Cottingham. 2008. *Gloeotrichia echinulate* blooms in an oligotrophic lake: helpful insights from eutrophic lakes. *Journal of Plankton Research* **30**: 893-904.
- Cho, K.S. and K.H. Ra. 1971. Limnological studies of the polluted water in the Uiam Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **4**: 35-47. (in Korean)
- Choi, C.M., J.H. Kim, W.I. Kim, J.S. Lee, G.B. Jung, J.T. Lee and S.G. Moon. 2007. Phytoplankton flora and community structure in the lower Nakdong River. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **26**: 159-170. (in Korean)
- Cires, S., L. Wormer, R. Agha and A. Quesada. 2013. Overwintering populations of *Anabaena*, *Aphanizomenon* and *Microcystis* as potential inocula for summer blooms. *Journal of Plankton Research* **35**: 1254-1266.
- Evans, R.D. 1994. Empirical evidence of the importance of sediment resuspension in lakes. *Hydrobiologia* **284**: 5-12.
- Faithful, C.L. and C.W. Burns. 2006. Effects of salinity and source of inocula on germination of *Anabaena* akinetes from a tidally influenced lake. *Freshwater Biology* **51**: 705-716.
- Falconer, I.R. 1993. *Algal Toxin in Seafood and Drinking Water*. Academic Press, San Diego, USA. pp. 176-186.
- Ferreira, F.M.B., J.M. Franco Soler, M.L. Fidalgo and P. Fernandez-Vila. 2001. PSP toxin from *Aphanizomenon flos-aquae* (cyanobacteria) collected in the Crestuma-Lever Reservoir (Douro River, Northern Portugal). *Toxicon* **39**: 757-761.
- Geum River Basin Management Commission (GRBMC). 2012. A Study on Control Measures of Algal Bloom for Management of Water Quality in the Daechung and Boryeong Reservoirs (III). Geum River Watershed Environment Office, Daejeon, Korea. 369p.
- Graham, J.L., A.C. Ziegler, B.L. Loving and K.L. Loftin. 2012. Fate and Transport of Cyanobacteria and Associated Toxins and Taste-and-Odor Compounds from Upstream Reservoirs in the Kansas River, Kansas, September and October 2011. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2012-5129. Reston, Virginia, USA. 65p.
- Graham, J.L., K.A. Loftin, A.C. Ziegler and M.T. Meyer. 2008. Guidelines for Design and Sampling for Cyanobacterial Toxin and Taste-and-Odor Studies in Lakes and Reservoirs. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2008-5038. Reston, Virginia, USA. 39p.
- Gugger, M., C. Lyra, P. Henriksen, A. Coute, J.F. Humbert and K. Sivonen. 2002. Phylogenetic comparison of the cyanobacterial genera *Anabaena* and *Aphanizomenon*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **52**: 1867-1880.
- Han, M.S., H.R. Lee, S.S. Hong, Y.O. Kim, K. Lee, Y.K. Choi, S. Kim and K.I. Yoo. 2002. Ecological studies on Togyo Reservoir in Chulwon, Korea. V. Seasonal changes of size-fractionated standing crops and chlorophyll a of phytoplankton in Kyungan Stream of Paldang river-reservoir systems and Togyo Reservoir, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **20**: 91-99. (in Korean)
- Hansson, L.A., L.G. Rudstam, T.B. Johnson, P. Soranno and Y. Allen. 1994. Patterns in algal recruitment from sediment to water in a dimictic, eutrophic lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **51**: 2825-2833.
- Hwang, S.J., K. Kim, C. Park, W. Seo, B.G. Choi, H.S. Eum, M.H. Park, H.R. Noh, Y.B. Sim and J.K. Shin. 2016. Hydro-meteorological effects on water quality variability in Paldang Reservoir, confluent area of the South-Han River-North-Han River-Gyeong Stream, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 354-374. (in Korean)
- Hwang, S.J., Y.B. Sim, B.G. Choi, K. Kim, C. Park, W. Seo, M.H. Park, S.W. Lee and J.K. Shin. 2017. Rainfall and hydrological comparative analysis of water quality variability in Euiam Reservoir, the North-Han River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 29-45. (in Korean)
- Ishikawa, K., M. Kumagai, W.F. Vincent, S. Tsujimura and H. Nakahara. 2002. Transport and accumulation of bloom-forming cyanobacteria in a large, mid-latitude lake: the gyre-*Microcystis* hypothesis. *Limnology* **3**: 87-96.
- Jeon, B.S., J. Han, S.K. Kim, J.H. Ahn, H.C. Oh and H.D. Park. 2015. An overview of problems cyanotoxins produced by cyanobacteria and the solutions thereby. *Journal of Korean Society of Environment and Engineer* **37**: 657-667.
- Jeong, I.H. 2016. Identification and Characterization of Environmental Factors that Affect Spatial and Temporal Variation of Phytoplankton Community in Yongdam Reservoir. M.S. Thesis, The Graduate School, Chonbuk National University, Jeonju, Korea. 149p. (in Korean)
- Jung, J.W. 2007. Relationship between Environmental Parameters and Algal Growth in Daechong Reservoir. M.S. Thesis, Graduate School, Chungbuk National University,



- Cheongju, Korea. 74p. (in Korean)
- Jung, J.M., Y.J. Lee, H.K. Park, E.Y. Jung and G.J. Joo. 2003. The analysis of cyanobacterial neurotoxins by high-performance liquid chromatography-mass spectrometry. *Algae* **18**: 233-238.
- Karlson, A.M.L., F.J.A. nascimento, S. Suikkanen and R. Elmgren. 2012. Benthic fauna affects recruitment from sediments of the harmful cyanobacterium *Nodularia spumigena*. *Harmful Algae* **20**: 126-131.
- Karlsson-Elfgren, I. and A.K. Brunberg. 2004. The importance of shallow sediments in the recruitment of *Anabaena* and *Aphanizomenon* (Cyanophyceae). *Journal of Phycology* **40**: 831-836.
- Kaster, J.L. and G.Z. Jacobi. 1978. Benthic macroinvertebrates of a fluctuating reservoir. *Freshwater Biology* **8**: 283-290.
- Kim, B.H., W.S. Lee, Y.O. Kim, H.O. Lee and M.S. Han. 2005a. Relationship between akinete germination and vegetative population of *Anabaena flos-aquae* (Nostocales, Cyanobacteria) in Seokchon Reservoir (Seoul, Korea). *Archiv für Hydrobiologie* **163**: 49-64.
- Kim, C.H., J.H. Lee and Y.K. Choi. 1998. The relationship between water-bloom and distribution of microorganisms that inhibit the growth of cyanobacterium (*Anabaena cylindrica*). *The Korean Journal of Microbiology* **34**: 188-193. (in Korean)
- Kim, D.K., A.R. Choi, H.K. Lee, O.S. Kwon and J. Kim. 2004. Community dynamics of phytoplankton and bacteria as affected by physicochemical environmental factors in Hoya dam Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **37**: 26-35. (in Korean)
- Kim, H.S. and S.J. Hwang. 2004. Effects of nutrients and N/P ratio stoichiometry on phytoplankton growth in an eutrophic reservoir. *Korean Journal of Limnology* **37**: 36-46. (in Korean)
- Kim, H.S., D.S. Kong and S.J. Hwang. 2005b. Characteristic community dynamics of phyto- and zooplankton in a shallow eutrophic reservoir. *Korean Journal of Limnology* **38**: 18-29. (in Korean)
- Kim, K.Y. 2014. Temporal and Spacial Distribution of Geosmin and 2-MIB in the Daecheong Reservoir. M.S. Thesis, Graduate School, Chungbuk National University, Cheongju, Korea. 74p. (in Korean)
- Kim, K.Y., J.B. Khan, I.C. Choi, S.H. Hong, J.B. Lee, S.H. Lee and J.J. Lee. 2015. Temporal and spatial distribution of geosmin and 2-MIB in the Daecheong Reservoir. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **34**: 20-26. (in Korean)
- Kim, S.G., S.K. Rhee, C.Y. Ahn, S.R. Ko, G.G. Choi, J.W. Bae, Y.H. Park and H.M. Oh. 2006. Determination of cyanobacterial diversity during algal blooms in Daechung Reservoir, Korea, on the basis of *cpcBA* intergenic spacer region analysis. *Applied and Environmental Microbiology* **72**: 3252-3258.
- Kim, Y.J., J.S. Baek, S.J. Youn, H.N. Kim, B.C. Lee, G. Kim, S. Park, K.A. You and J.K. Lee. 2016. Cyanobacteria community and growth potential test in sediment of Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Environment* **32**: 261-270. (in Korean)
- Ko, S.R., C.Y. Ahn, Y.K. Lee and H.M. Oh. 2011. Dynamics of bacterial communities analyzed by DGGE during cyanobacterial bloom in Daechung Reservoir, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **29**: 225-235. (in Korean)
- Ko, S.R., S.J. Park, C.Y. Ahn, A. Choi, J.S. Lee, H.S. Kim, B.D. Yoon and H.M. Oh. 2004. Analysis of microbial communities during cyanobacterial bloom in Daechung Reservoir by DGGE. *The Korean Journal of Microbiology* **40**: 205-210. (in Korean)
- Komarek, J. 1984. Sobre las cyanoficeas de Cuba: (1) *Aphanizomenon volzii*, (2) especies de Fortiea. Acta Bot. Cubana, La Habana 18. 30p.
- Komarek, J. and J. Komarkova. 2006. Diversity of *Aphanizomenon*-like cyanobacteria. *Czech Phycology, Olomouc* **6**: 1-32.
- Komarek, J. and K. Anagnostidis. 1986. Modern approach to the classification system of Cyanophytes 2 Chroococcales. *Algological Studies* **43**: 157-226.
- Komarek, J. and K. Anagnostidis. 1989. Modern approach to the classification system of Cyanophytes 4 Nostocales. *Algological Studies* **56**: 247-345.
- Korea Meteorological Agency (KMA). 2016. Annual Report of Korean Meteorological Events. Seoul, Korea. (in Korean)
- Korea Water Resources Corporation (K-water). 2015. Annual Report of Boryeong Dam Operation and Management. Daejeon, Korea. (in Korean)
- Korea Water Resources Corporation (K-water). 2016. Annual Report of Boryeong Dam Operation and Management. Daejeon, Korea. (in Korean)
- Kushak, R.I., C. Drapeau, E.M. Van Cott and H.H. Winter. 2000. Favorable effects of blue-green algae *Aphanizomenon flos-aquae* on rat plasma lipids. *Journal of the American Nutraceutical Association* **2**: 59-65.
- Laamanen, M.J., L. Forsstrom and K. Sivonen. 2002. Diversity of *Aphanizomenon flos-aquae* (cyanobacterium) populations along a Baltic Sea salinity gradient. *Applied and Environmental Microbiology* **68**: 5296-5303.
- Lee, D.H. 2014. Study on the Analysis of Seasonal Occurring Nature of Algal Bloom in the Keum River Estuary. M.S. Thesis, Graduate School, Chungnam National University, Daejeon, Korea. 69p. (in Korean)
- Lee, J.W. 2003. The Vertical Distribution and Succession of Phytoplankton in Sayon Reservoir, Korea. Ph.D. Thesis, Graduate School, University of Ulsan, Ulsan, Korea. 201p. (in Korean)
- Lee, K.R. 2014. Study on the Growth and Off-flavor Production of Harmful Cyanobacteria. M.S. Thesis, Graduate School

- of Konkuk University, Seoul, Korea. 89p. (in Korean)
- Lee, O.M. 2001. The distribution and standing crop of phytoplankton in the nearby streams of Suwon sewage disposal plant. *Korean Journal of Environmental Biology* **19**: 282-291. (in Korean)
- Lee, Y.J., J.M. Jung, P.S. Shin and G.J. Joo. 2005. Daily variation of phytoplankton and water quality in the lower Nakdong River. *Algae* **20**: 133-140.
- Lepori, F. and J.J. Roberts. 2017. Effects of internal phosphorus loadings and food-web structure on the recovery of a deep lake from eutrophication. *Journal of Great Lakes Research* **43**: 255-264.
- Li, R., W.W. Carmichael and P. Pereira. 2003. Morphological and 16S rRNA gene evidence for reclassification of the paralytic shellfish toxin producing *Aphanizomenon flos-aquae* LMECYA31 as *Aphanizomenon issatschenkoi* (Cyanophyceae). *Journal of Phycology* **39**: 814-818.
- Lin, S. and R.L. Evans. 1981. Relationships between Odor and Commonly Measured Water Quality Characteristics in Surface Water Supplies. Illinois State Water Survey, Champaign, Report of Investigation 100. Illinois, USA. 35p.
- Mahmood, N.A. and W.W. Carmichael. 1986. Paralytic shellfish poisons produced by the freshwater cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae* NH-5. *Toxicon* **24**: 175-186.
- Ministry of Environment (MOE). 1999. *A White-Paper of Environment*. Ministry of Environment, Seoul, Korea. (in Korean)
- Ministry of Environment (MOE). 2011. *A White-Paper of Environment*. Ministry of Environment, Seoul, Korea. (in Korean)
- Ministry of Environment (MOE). 2015. *A White-Paper of Environment*. Ministry of Environment, Seoul, Korea. (in Korean)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). 2012. National List Book of Rivers, Korea, 2011. KGE 11-1611492-000088-01. Seoul, Korea. 767p. (in Korean)
- National Institute of Biological Resources (NIBR). 2015. National List of Species of Korea: Blue-green Algae. Incheon, Korea. 75p. (in Korean)
- New Hampshire Department of Environmental Services (DES/NH). 2010. Lake drawdown for Aquatic plant control. Environmental Fact Sheet WD-BB-12. www.des.nh.gov, USA. 3p.
- Ni, Z., S. Wang, Z. Chu and X. Jin. 2015. Historical accumulation of N and P sources of organic matter and N in sediment in an agricultural reservoir in Northern China. *Environmental Science Pollution Research* **22**: 9951-9964.
- Noh, S.Y., H.K. Park, H.L. Choi and J.A. Lee. 2014. Effect of climate change for cyanobacteria growth pattern in Chudong station of Lake Daechung. *Journal of Korean Society on Water Environment* **30**: 377-385. (in Korean)
- Oh, J.H. 2007. Analysis of Bacterial Diversity in Cheon-Ho Reservoir by Denaturing Gradient Gel Electrophoresis. M.S. Thesis, Graduate School, Dankook University, Cheonan, Korea. 73p. (in Korean)
- Paerl, H.W. 2014. Mitigating harmful cyanobacterial blooms in a human- and climatically-impacted world. *Life* **4**: 988-1012.
- Paerl, H.W., W.S. Gardner, K.E. Havens, A.R. Joyner, M.J. McCarthy, S.E. Newell, B. Qin and J.T. Scott. 2016. Mitigating cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems impacted by climate change and anthropogenic nutrients. *Harmful Algae* **54**: 213-222.
- Park, H.K. 2006. Long-term preservation of bloom-forming cyanobacteria by cryopreservation. *Algae* **21**: 125-131.
- Park, H.K., H. Kim, J.J. Lee, J.A. Lee, H. Lee, J.H. Park, J. Seo, S.J. Youn and J. Moon. 2011. Investigation of criterion on harmful algae alert system using correlation between cell numbers and cellular microcystins content of Korean toxic cyanobacteria. *Journal of Korean Society on Water Quality* **27**: 491-498. (in Korean)
- Park, H.K., R.Y. Shin, H. 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**: 286-294. (in Korean)
- Park, H.K., Y.C. Seo, I.H. Cho and B.H. Park. 2006a. Effect of chlorination on disinfection byproducts production and release of microcystins from bloom-forming algae. *Journal of Korean Society on Water Quality* **22**: 513-520. (in Korean)
- Park, J.C., J.W. Park, J.D. Kim and J.K. Shin. 2005. Spatial and temporal variations of environmental factors and phytoplankton community in Andong Reservoir, Korea. *Algae* **20**: 333-343. (in Korean)
- Park, J.W., Y.G. Kim, W. Heo, B. Kim and W. Yih. 2006b. Bloom-forming cyanobacteria in Yongdam Lake (1), Nutrient limitation in a laboratory strain of a nitrogen-fixing cyanobacterium, *Anabaena spiroides* v. *crassa*. *The Sea Journal of the Korean Society of Oceanography* **11**: 158-164. (in Korean)
- Park, Y.C., S.J. Shin, H.Y. Lee, Y.S. Kim, M.R. Kim, S.J. Lee and H.J. Lee. 2013. Development and application of detection method for *Aphanizomenon flos-aquae* not usable as a food materials in Korea. *Journal of Food Hygiene and Safety* **28**: 188-193. (in Korean)
- Pollingher, U., O. Hadas, Y.Z. Yacobi, T. Zohary and T. Berman. 1998. *Aphanizomenon ovalisporum* (Forti) in Lake Kinneret, Israel. *Journal of Plankton Research* **20**: 1321-1339.
- Rajaniemi, P., J. Komarek, L. Hoffmann, P. Hrouzek, K. Kastovska and K. Sivonen. 2005a. Taxonomic consequences from the combined molecular and phynotype evaluation of selected *Anabaena* and *Aphanizomenon* strains. *Archiv für Hydrobiologie/Algological Studies* **117**: 371-391.

- Rajaniemi, P., P. Hrouzek, K. Kastovska, R. Willame, A. Rantala, L. Hoffmann, J. Komarek and K. Sivonen. 2005b. Phylogenetic and morphological evaluation of genera *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Trichormus* and *Nostoc* (Nostocales, Cyanobacteria). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **55**: 11-26.
- Rapala, J., K. Sivonen, R. Luukkainen and S. Niemela. 1993. Anatoxin-a concentration in *Anabaena* and *Aphanizomenon* under different environmental conditions and comparison of growth by toxic and non-toxic *Anabaena*-strains: A laboratory study. *Journal of Applied Phycology* **5**: 581-591.
- Rashash, D.M.C., R.C. Hoehn, A.M. Dietrich, T.J. Grizzard and B.C. Parker. 1996. Identification and Control of Odorous Algal Metabolites. AWWA Research Foundation and American Water Works Association Report 0-89867-855-2. USA. 172p.
- Reynolds, C.S. 1999. Non-determinism to probability, or N:P in the community ecology of phytoplankton. *Archiv für Hydrobiologie* **146**: 23-35.
- Rudi, K., O.M. Skulberg, F. Larsen and K.S. Jakobsen. 1997. Strain characterization and classification of oxyphotobacteria in clone cultures on the basis of 16S rRNA sequence from the variable region V6, V7, and V8. *Applied Environmental Microbiology* **63**: 2593-2599.
- Ryder, R.A. 1978. Ecological heterogeneity between north-temperate reservoirs and glacial lake systems due to differing succession rates and cultural uses. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* **20**: 1568-1574.
- Ryu, H.S., H.K. Park, H.J. Lee, R.Y. Shin and S.U. Cheon. 2016. Occurrence and succession pattern of cyanobacteria in the upper region of the Nakdong River: Factors influencing *Aphanizomenon* bloom. *Journal of Korean Society on Water Environment* **32**: 52-59. (in Korean)
- Ryu, H.S., S.M. An, C.K. Lim, R.Y. Shin, J.G. Park and J.H. Lee. 2017. Analysis of potential toxigenicity and phylogeny using target genes in *Aphanizomenon flos-aquae* (Cyanophyceae) strains isolated from the Nakdong River. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 137-147. (in Korean)
- Sanchez-Carrillo, S., L.C. Alatorre, R. Sanchez-Andres and J. Garatuza-Payan. 2007. Eutrophication and sedimentation patterns in complete exploitation of water resources scenarios: An example from northwestern semi-arid Mexico. *Environmental Monitoring Assessment* **132**: 377-393.
- Shaw, B.H. 1983. Agricultural Runoff and Reservoir Drawdown Effects on a 2760-Hectare Reservoir. U.S. Environmental Protection Agency, EPA-600/S3-82-003 (Project Summary). Ohio, USA. 5p.
- Shin, J.K. and S.J. Hwang. 2017. Dynamics of phosphorus, turbid water outflow and limno-hydrological effects on hypolimnetic effluents discharging by hydropower electric generation in a large dam reservoir (Daecheong), Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**: 1-15. (in Korean)
- Shin, J.K., B.G. Kang and S.J. Hwang. 2016. Water-blooms (Green-tide) dynamics of algae alert system and rainfall-hydrological effects in Daecheong Reservoir, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **49**: 153-175. (in Korean)
- Son, M., J.H. Park, C. Lim, S. Kim and B.J. Lim. 2013. Seasonal change of phytoplankton community and water quality in Yeongsan River watershed. *Korean Journal of Environmental Biology* **31**: 105-112. (in Korean)
- Sondergaard, M., J.P. Jensen and E. Jeppesen. 2001. Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes. *The Scientific World* **1**: 427-442.
- SPSS. 1998. SYSTAT<sup>®</sup> 8.0 Statistics. SPSS Inc. Chigaco, USA. 1,086p.
- Tan, X.T., F.X. Kong, H.S. Cao, Y. Yu and M. Zhang. 2008. Recruitment of bloom-forming cyanobacteria and its driving factors. *African Journal of Biotechnology* **7**: 4726-4731.
- Thornton, K.W., B.L. Kimmel and F.E. Payne. 1990. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA. 256p.
- Tsujimura, S., K. Ishikawa and H. Tsukada. 2001. Effect of temperature on growth of the cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae* in Lake Biwa and Lake Yogo. *Phycological Research* **49**: 275-280.
- Uveges, V., K. Tapolczai, L. Krienitz and J. Padisak. 2012. Photosynthetic characteristics and physiological plasticity of an *Aphanizomenon flos-aquae* (Cyanobacteria, Nostocaceae) winter bloom in a deep oligo-mesotrophic lake (Lake Stechlin, Germany). *Hydrobiologia* **698**: 263-272.
- Wantzen, K.M., K.O. Rothhaupt, M. Mortl, M. Cantonati, L.G. Toth and P. Fischer. 2008. Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: An urgent issue. *Hydrobiologia* **613**: 1-4.
- Watson, S.B., C. Miller, G. Arhonditsis, G.L. Boyer, W. Carmichael, M.N. Charlton, R. Confesor, D.C. Depew, T.O. Hook, S.A. Ludsin, G. matisoff, S.P. McElmurry, M.W. Murray, R.P. Richards, Y.R. Rao, M.M. Steffen and S.W. Wilhelm. 2016. The re-eutrophication of Lake Erie: Harmful algal blooms and hypoxia. *Harmful Algae* **56**: 44-66.
- Watts, R.J., C. Allan, K.H. Bowmer, K.J. Page, D.S. Ryder and A.L. Wilson. 2009. Pulsed Flows: A Review of Environmental Costs and Benefits and Best Practice. Waterlines Report Series No. 16, The National Water Commission, Canberra, Australia. 147p.
- Welch, E.B., J.A. Buckley and R.M. Bush. 1972. Dilution as an algal bloom control. *Journal of the Water Pollution Control Federation* **63**: 550-552.
- Wetzel, R.G. 2001. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd ed. Academic Press, California, USA. 1006p.

- Yamamoto, Y. 2009a. Effect of temperature on recruitment of cyanobacteria from the sediment and bloom formation in a shallow pond. *Plankton Benthos Research* **4**: 95-103.
- Yamamoto, Y. 2009b. Environmental factors that determine the occurrence and seasonal dynamics of *Aphanizomenon flos-aquae*. *Journal of Limnology* **68**: 122-132.
- Yamamoto, Y. and H. Nakahara. 2005. The formation and degradation of cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae* blooms: the importance of pH, water temperature, and day length. *Limnology* **6**: 1-6.
- Yamamoto, Y. and H. Nakahara. 2006. Importance of interspecific competition in the abundance of *Aphanizomenon flos-aquae* (Cyanophyceae). *Limnology* **7**: 163-170.
- Yamamoto, Y. and H. Nakahara. 2009. Life cycle of cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae*. *Taiwania* **54**: 113-117.
- Yang, J., H. Lv, J. Yang, L. Liu, X. Yu and H. Chen. 2016. Decline in water level boosts cyanobacteria dominance in subtropical reservoirs. *Science of the Total Environment* **557-558**: 445-452.
- Yih, W., G. Myung, H.S. Kim and H.J. Jeong. 2005a. Semiweekly variation of spring population of a mixotrophic ciliate *Myrionecta rubra* (= *Mesodinium rubrum*) in Keum River estuary, Korea. *Algae* **20**: 207-216. (in Korean)
- Yih, W., G. Myung, Y.D. Yoo, Y.G. Kim and H.J. Jeong. 2005b. Semiweekly variation of phytoplankton community in relation to the freshwater discharges from Keum River estuarine weir, Korea. 『The Sea』 *Journal of the Korean Society of Oceanography* **10**: 154-163. (in Korean)
- You, K.A., M.A. Song, M.S. Byeon, H.J. Lee and S.J. Hwang. 2014. The calculation method of cell count for the bloom-forming (green tide) cyanobacterium using correlation between colony area and cell number in Korea. *Korea Journal of Ecology and Environment* **47**: 350-357. (in Korean)
- Yu, J.J., H.J. Lee, K.L. Lee, H.S. Lyu, J.W. Whang, L.Y. Shin and S.U. Chen. 2014. Relationship between distribution of the dominant phytoplankton species and water temperature in the Nakdong River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 247-257. (in Korean)
- Zapomelova, E., P. Hrouzek, K. Rehakova, M. Sabacka, M. Stibal, L. Caisova, J. Komarkova and A. Lukesova. 2008. Morphological variability in selected heterocystous cyanobacterial strains as a response to varied temperature, light intensity and medium composition. *Folia Microbiologica* **53**: 333-341.
- Zhang, M., Q.Q. Lin, L.J. Xiao, S. Wang, X. Qian and B.P. Han. 2013. Effect of intensive epilimnetic withdrawal on the phytoplankton in a (sub)tropical deep reservoir. *Journal of Limnology* **72**: 430-439.
- Zhou, J., B. Qin, C. Casenave, X. Han, G. Yang, T. Wu, P.W. and J. Ma. 2015. Effects of wind wave turbulence on the phytoplankton community composition in large, shallow Lake Taihu. *Environmental Science and Pollution Research* **22**: 12737-12746.



**Appendix 1.** Summary for the key of main diacritical features of typical *Aphanizomenon*-morphospecies identified in various habitats of worldwide (Adapted from Komarek and Komarkova, 2006).

Aphanizomenon species	Synonym	Trichomes		Akinetes		Terminal (apical) cells (µm)	Distribution
		Width (µm)	Form	Dimensions (µm)	Form		
<i>A. aphanizomenoides</i>	<i>Anabaena aphanizomenoides</i>	—	—	—	—	—	.
<i>A. capricorni</i>	<i>Cuspidothrix capricorni</i>	—	Cylindrical	—	Oval	Bluntly pointed	.
<i>A. chinense</i>	—	—	—	—	—	—	.
<i>A. elenkinii</i>	<i>C. elenkinii</i>	—	Cylindrical to barrel-shaped	—	Long oval	Bluntly pointed	North temperate zone
<i>A. flexuosum</i>	—	Facultatively, only few trichomes	Coiled	20~47(56) × 3.5~5.7	Cylindrical	42.8 long, hyaline, rounded at the apex	North temperate zone
<i>A. flos-aquae</i>	<i>A. incurvum</i> , <i>A. cyaneum</i> , <i>A. holsaticum</i> , <i>A. americanum</i>	2 cm	Straight	40~220 × 6~10.8	Long cylindrical	Elongated, hyaline with plasma string, rounded	North temperate zone, South American temperate zone
<i>A. gracile</i>	<i>A. flos-aquae</i> var. <i>gracile</i>	—	—	—	—	—	.
<i>A. hungaricum</i>	—	Solitary	Straight or slightly flexuous	15~24.5 × 4.5~10	Oval to cylindrical	Elongated, without aerotopes, cylindrical, cut at the apex	.
<i>A. issatschenkoi</i>	<i>C. issatschenkoi</i>	—	Cylindrical	—	Cylindrical	Pointed	North temperate zone
<i>A. klebahnii</i>	<i>A. flos-aquae</i> var. <i>klebahnii</i>	3 mm	Straight	20~54(113) × 5.4~9.3	Long cylindrical	Elongated, hyaline with rests of plasma zones	Temperate zones
<i>A. manguiinii</i>	—	—	—	—	—	—	.
<i>A. ovalisporum</i>	—	—	—	—	—	—	.
<i>A. paraflexuosum</i>	—	Solitary trichomes	Flexible	44.6~72 × 5.6~7.9	Long cylindrical	26.8 long, hyaline, abruptly rounded	Japan
<i>A. platense</i>	—	Solitary or irregular clusters	Straight or slightly flexuous	—	—	Long, hyaline, conical rounded at the apex	.
<i>A. schindleri</i>	—	—	—	—	—	—	.
<i>A. skujajae</i>	<i>A. cf. flos-aquae</i> var. <i>klebahnii</i>	—	—	—	—	—	.
<i>A. slovenicum</i>	—	2 cm	Straight	5.5~8.9(22) × 3.3~5.2	Short cylindrical	Elongated, hyaline, rounded at the apex	.

Appendix 1. Continued.

Aphanizomenon species	Synonym	Fascicles	Trichomes		Akinetes		Terminal (apical) cells (µm)	Distribution
			Width (µm)	Form	Dimensions (µm)	Form		
<i>A. sphaericum</i>	-	-	-	-	-	-	-	.
<i>A. tropicale</i>	<i>C. tropicalis</i>	-	-	Cylindrical	Cylindrical to oval	-	Sharply pointed	.
<i>A. ussatchevii</i>	<i>C. ussatchevii</i>	-	-	Cylindrical	Widely oval	-	Bluntly pointed	.
<i>A. volzii</i>	<i>Ana. volzii</i>	-	4.5~14 × 4~5.8	Cylindrical	Smooth surface (colourless or brownish)	(20)32~48 × (13)15~21	Slightly lengthened, bluntly pointed	.
<i>A. yezoense</i>	-	Microscopic, disintegrating bundles	(2)2.7~4	Straight or slightly curved	Long cylindrical	31.2~48.9 × 4.7~7.3	Long, hyaline, flattened or abruptly rounded	North temperate zone

Appendix 2. Correlation coefficient between rainfall and hydrological factors tested by Spearman's Rank Correlation. Statistical values were computed among mean of 1998 to 2016.

Variables	RAD	R50	R100	R200	RMA	TRA	R6-9	R6-9T	TOI	TOO	HYD	SPI	INT
RAD	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
R50	.	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
R100	.	0.598**	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
R200	.	0.525*	1.000	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.	.
RMA	.	0.552*	0.683**	0.683**	1.000	.	.	.	.	.	.	.	.
TRA	.	0.834**	0.632**	.	0.486*	1.000	.	.	.	.	.	.	.
R6-9	.	0.810**	0.684**	.	0.471*	0.927**	1.000	.	.	.	.	.	.
R6-9T	.	0.575**	0.534*	.	0.471*	0.610**	0.853**	1.000	.	.	.	.	.
TOI	.	0.705**	0.603**	.	.	0.939**	0.904**	0.642**	1.000	.	.	.	.
TOO	.	0.567*	0.628**	.	.	0.707**	0.764**	0.626**	0.843**	1.000	.	.	.
HYD	.	.	.	.	0.499*	.	.	.	.	.	1.000	.	.
SPI	.	0.579**	0.837**	.	0.499*	0.742**	0.763**	0.553*	0.812**	0.799**	1.000	.	.
INT	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1.000	.

\*p<0.05, \*\*p<0.01. RAD, rainfall days; R50, > 50 mm; R100, > 100 mm; R200, > 200 mm rainfall days; RMA, maximum rainfall; TRA, total rainfall; R6-9, June-September rainfall; R6-9T, R6-9/total rainfall rate; TOI, total inflow; TOO, total outflow; HYD, hydropower; SPI, spillway; INT, intake.