

북한강 수계에 출현한 남조류와 이취미의 상관관계

변정환 · 황순진¹ · 김백호² · 박진락 · 이재관 · 임병진*

국립환경과학원 한강물환경연구소, ¹건국대 환경과학과, ²한양대학교 생명과학과

Relationship between a Dense Population of Cyanobacteria and Odorous Compounds in the North Han River System in 2014 and 2015. Byun, Jeong-Hwan, Soon-Jin Hwang¹, Baik-Ho Kim², Jin-Rak Park, Jae-Kwan Lee and Byung-Jin Lim* (Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Gyeonggi 12585, Korea; ¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 05030, Korea; ²Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 04763, Korea)

Abstract To evaluate the relationship between dynamics of cyanobacteria and odorous compounds, a monthly monitoring of water quality and phytoplankton were conducted at the three serial lakes (Lake Ui-am, Lake Cheong-pyeong and Lake Pal-dang) in the North Han River for 11 times from May 2014 to March 2015. In the three serial lakes, phytoplankton communities showed that seasonal changes in Bacillariophyceae-Cyanophyceae-Bacillariophyceae. *Anabaena* and *Pseudanabaena* were dominant species in August and September 2014. At the same time the odors (Geosmin, 2-MIB) were also detected with high concentration. Relationship between environmental factors and cyanobacterial abundance showed a significant correlation with *Anabaena circinalis* and geosmin ($r=0.983$, $p<0.01$). In the case of *Pseudanabaena limnetica* showed a significant correlation of total nitrogen ($r=0.685$, $p<0.01$) and $\text{NO}_3\text{-N}$ ($r=0.723$, $p<0.01$). In addition, similarly *Pseudanabaena limnetica* and 2-MIB ($r=0.717$, $p<0.01$) was high. The odorous compounds appeared in the North Han River water were considered to be a direct relationship with cyanobacteria.

Key words: North Han River, *Anabaena circinalis*, *Pseudanabaena limnetica*, geosmin, 2-MIB

서 론

우리나라 주요 4대강 수계는 댐의 건설로 인해 인공호를 포함하는 구조적 특성을 가지고 있다. 특히, 북한강 수계는 풍부한 유량과 큰 경사도를 가지고 있어 댐건설에 유리한 조건으로 작용하며, 화천댐, 소양댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐 그리고 남한강 수계와 합류되는 팔당댐에 이르기까지 많은

다목적 댐이 건설되었다(Park, 2006). 그러나 이러한 인공 호의 건설은 수체의 체류시간을 증가시키는 원인이 되고, 수질 관리가 이루어지지 않으면 호소의 부영양화 현상이 일어나게 된다. 호소에서 부영양화 현상이 발생하면 식물플랑크톤의 이상증식으로 인해 수중 생태계 및 수자원 이용에 심각한 문제를 야기하게 된다(Hayes and Burch, 1989; Lowton and Codd, 1991; Park and Jheong, 2003).

국내·외에서 식물플랑크톤 이상증식은 주로 남조류에 의해 발생되며, HABs (Harmful Algal Blooms)라 불리는 유해 남조류의 이상증식은 독소와 이취미 물질 등 남조류 대사산물로 인해 음용수 공급에 심각한 영향을 가져올 수 있다(Watson, 2004; Watson *et al.*, 2007; Paerl and Huisman,

Manuscript received 23 November 2015, revised 14 December 2015, revision accepted 16 December 2015

* Corresponding author: Tel: +82-2-770-7240, Fax: +82-2-773-2268, E-mail: limnolim@korea.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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

2009). 특히, 이취미 물질은 흙, 곰팡이 냄새를 발생시켜 고도의 정수처리를 하지 않을 경우 음용수를 공급하는 과정에서 심미적인 문제를 일으킨다. 이취미 물질을 생성하는 주요 남조류는 *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Planktonthrix*, *Pseudanabaena* 등의 종들이 보고되어 있으며 (Peterson *et al.*, 1995; Sugiura *et al.*, 1997; Izaguirre and Taylor, 1998; Sugiura and Nakano, 2000; Saadoun *et al.*, 2001; Zimba *et al.*, 2001), 이 종들이 2차 산물로 생성하는 대표적인 이취미 물질은 Geosmin과 2-Methylisoborneol (2-MIB)가 있다. 이와 같은 이취미 물질은 독성은 없으나 심미적 불쾌감을 주는 물질로 4~10 ng L⁻¹의 농도의 범위에서 인간이 감지할 수 있으며, 일본의 경우 음용수 규제기준을 10 ng L⁻¹ 이하로 설정하고 있다 (Suffet, 1995; Whelton and Dietrich, 2004). 우리나라의 경우 규제기준은 없지만, 먹는물 수질 감시 항목으로 지정하여 권고기준 20 ng L⁻¹ 이하로 관리하고 있다 (MOE, 2011).

이취미 물질은 국외뿐 아니라 국내에서 역시 큰 관심을 받고 있는 환경문제로 주목받고 있다. 실제로 최근에 2011년 북한강 수계에서 남조류가 이상증식을 일으켜 상수원으로 이용되는 팔당호에서 이취미 문제를 일으킨 사례가 있었으며 (You *et al.*, 2013), 이후 여름과 가을철에 북한강, 팔당호 등에서 지속적으로 이취미 물질의 발생이 보고되었다 (NIER, 2014). 하지만 한강 수계에서 이취미 물질에 대한 보고는 아직까지 현저히 부족한 실정이며, 남조류와

이취미 물질에 대한 지속적인 모니터링이 필요하다.

따라서 본 연구는 북한강 수계내의 환경요인, 식물플랑크톤, 이취미 물질을 분석하여 유해 남조류와 이취미 물질의 동태를 파악하고자 2014년 5월부터 2015년 3월까지의 암호, 청평호, 팔당호 지점을 선정하여 조사를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 기간

조사지점은 북한강 수계 중 남조류가 우점 출현했던 의암호의 중도선착장 (UA; 37°31'19", 127°41'6"), 청평호의 댐 앞 (CP; 37°43'26", 127°25'37"), 팔당댐의 댐 앞 (PD; 37°31'22", 127°17'1") 등 각 호소별 1개 정점을 선정하고 2014년 5월부터 2015년 3월까지 의암호, 청평호, 팔당호 순으로 각 월마다 1회씩 실시하였다 (Fig. 1).

2. 환경요인 분석

조사지점별 수질조사항목은 시료채취는 호소환경조사 지침의 시료채취 원칙에 따라 채수하였으며, 실험실 분석 항목은 현장 시료를 냉암소에서 보관하여 실험실로 옮긴 후 분석하였다.

수질조사항목 중 수온 (Water temperature), 수소이온농도 (pH), 용존산소 (Dissolved oxygen)는 현장수질측정기 (YSI-

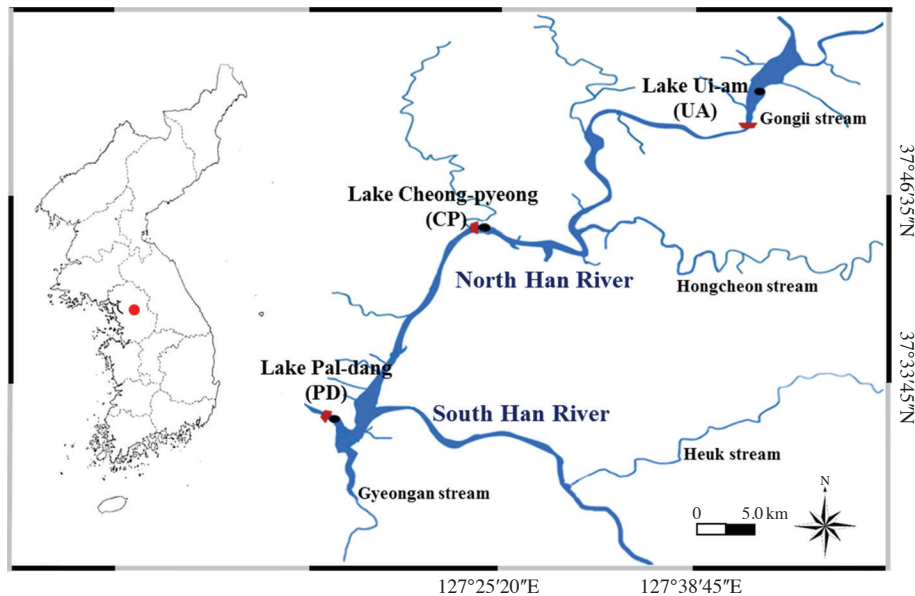


Fig. 1. A map showing the sampling sites in three lakes (Lake Ui-am, Lake Cheong-pyeong and Lake Pal-dang) in North Han River System from May 2014 to March 2015.

6600D, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 영양염류 분석의 경우 총질소(TN)와 질산성질소(NO₃-N)는 카드뮴 환원법을 이용하였으며, 암모니아성질소(NH₃-N)는 비색법, 총인(TP)과 인산염인(PO₄-P)은 흡광광도법 중 아스코르빈산 환원법으로 각각 측정하였다(APHA, 2005).

이취미 물질인 Geosmin, 2-MIB는 먹는물 수질감시항목지침(MOE, 2011)에 따라 GC/MS(Varian, US/CP3800)을 이용하여 HS-SPME(Head Space-Solid Phase Micro-Extraction)법을 적용하여 분석하였다. 분석 전 시료 전처리 위해 화이버를 270°C에서 1시간 이상 헬륨가스를 유량 1 mL min⁻¹로 흘려 활성화하고 20 mL vial에 시료 10 mL와 정제된 염화나트륨(NaCl) 3 g을 넣어 70°C, 400 rpm으로 교반하면서 SPME 화이버에 30분간 흡착시켰다. 시료의 전처리 결과 흡착시킨 시료를 270°C에서 4분간 탈착시켜 기체크로마토그래프/질량분석기(GC/MS)(450-GC, 320-MS, BRUKER)로 분석하여 크로마토그램에서 각 분석성분의 시간별 위치를 확인하여 면적을 구하고 절대검정곡선법을 적용하여 이취미 물질 농도를 구하였다. 절대검정곡선은 정제수 10 mL에 표준혼합용액(47525-U, SUPELCO)을 0.005~0.2 µg L⁻¹까지 단계적으로 첨가하고 HS-SPME 및 GC/MS로 분석하여 각 분석화합물의 농도(µg L⁻¹)를 가로축(x축)에, 각 분석화합물에 해당하는 위치의 면적을 세로축(y축)에 취하여 작성하였다. 작성된 검정곡선식의 y(i)값에 각 분석화합물 위치 면적(Ax)을 대입한 후 X(i)값을 계산하여 분석물질의 농도(Cs, ng L⁻¹)를 구하였다.

$$Cs = (Ax - b)/a \text{ (}\mu\text{g L}^{-1}\text{)}$$

위 식에서 a는 검정곡선의 기울기, b는 검정곡선의 절편 값을 나타낸다.

3. 식물플랑크톤 분석

조사지점별 채수는 Van Dorn 채수기로 표층수(수심 30 cm)에서 현장수를 채수하였으며, 식물플랑크톤의 동정과 계수를 위해 채수한 시료를 250 mL 폴리에틸렌 채집병에 넣고, 현장에서 Lugol 용액으로(최종농도 1%) 고정하여 실험실로 운반하였다. 운반한 고정시료는 72시간 이상 침강시킨 후 조류 농도에 따라 Siphon을 이용하여 상등액을 제거하는 방법으로 2~5배 농축한 뒤 식물플랑크톤을 동정하였다. 동정은 광학현미경 200~1000배(Nikon eclipse E600, Japan)를 이용하여 종 수준까지 하였고, 동일 속에서 뚜렷한 식별 형질의 차이를 보이지 않는 종은 미동정종으로 처리하였다. 출현종의 동정은 규조류는 Cox(1996), 남조류는

Akiyama *et al.*(1981), 와편모조류는 Abe(1981) 등의 문헌을 참고하였다.

식물플랑크톤의 정량분석을 위해 고정된 시료를 잘 혼합한 후 1 mL를 Sedgwick-Rafter Chamber에 넣고 5분 이상 안정시킨 후 광학현미경 200배(Nikon eclipse E600, Japan)에서 군체 또는 세포 수를 계수하였다.

식물플랑크톤과 환경요인의 상관관계를 분석하기 위해 조사기간 동안 분석된 결과를 바탕으로 Pearson의 상관지수 분석법을 이용하여 상관관계를 분석하였다(SPSS Statistics 21, IBM).

결과 및 고찰

1. 환경요인 변화

조사기간 동안 북한강 수계에서의 환경요인 중 수온은 2~26°C의 범위로 일반적인 국내하천과 유사한 경향을 나타냈다(Fig. 2)(Lee *et al.*, 2002; Park *et al.*, 2006; Shin and Lee, 2014). pH는 6.4~8.7의 범위로 하류로 갈수록 낮아지는 경향을 나타내었다. DO는 8.4~14.0 mg L⁻¹의 범위로 계절별로 농도 차이가 나타났고, 의암호에서 6, 7월에 일시적으로 청평호, 팔당호 보다 비교적 높은 농도를 나타냈다. 전기전도도는 99~418 µS cm⁻¹로 의암호에서 9월에 가장 높은 값을 나타내었다.

영양염의 경우 총인은 9~51 µg L⁻¹의 범위로 나타났으며, 인산염인은 0~23 µg L⁻¹의 범위로 나타났다. 총인과 인산염인의 경우 팔당호 보다 의암호, 청평호에서 비교적 높은 농도를 나타냈으며, 팔당호에서는 조사기간 동안 큰 변화가 없었다. 총질소는 1.38~8.72 mg L⁻¹의 범위로 나타났고, 질산성질소는 0.99~7.13 mg L⁻¹의 범위로 나타났으며, 암모니아성질소는 0.02~1.18 mg L⁻¹의 범위로 나타났다. 총질소, 질산성질소, 암모니아성질소 모두 의암호에서 9월에 가장 높은 농도로 나타난 반면, 청평호와 팔당호의 경우 의암호 보다 낮은 농도를 유지하였으며, 변동 폭이 크지 않았다. 의암호의 경우 춘천하수처리장의 방류수와 춘천시를 통과하며 국지적으로 오염된 공지천의 유입으로 인산염 및 질산염의 농도가 비교적 높게 나타난 것으로 판단된다(Park *et al.*, 2004).

이취미 물질 중 Geosmin의 농도는 0~385 ng L⁻¹의 범위로 나타났으며, 8월에 팔당호에서 가장 높은 농도로 검출된 반면, 의암호와 청평호의 경우 조사기간 동안 계속 낮은 농도를 유지하였다. 또 다른 이취미 물질인 2-MIB의 경우 0~57 ng L⁻¹의 범위로 나타났으며, 2014년 9월에 의

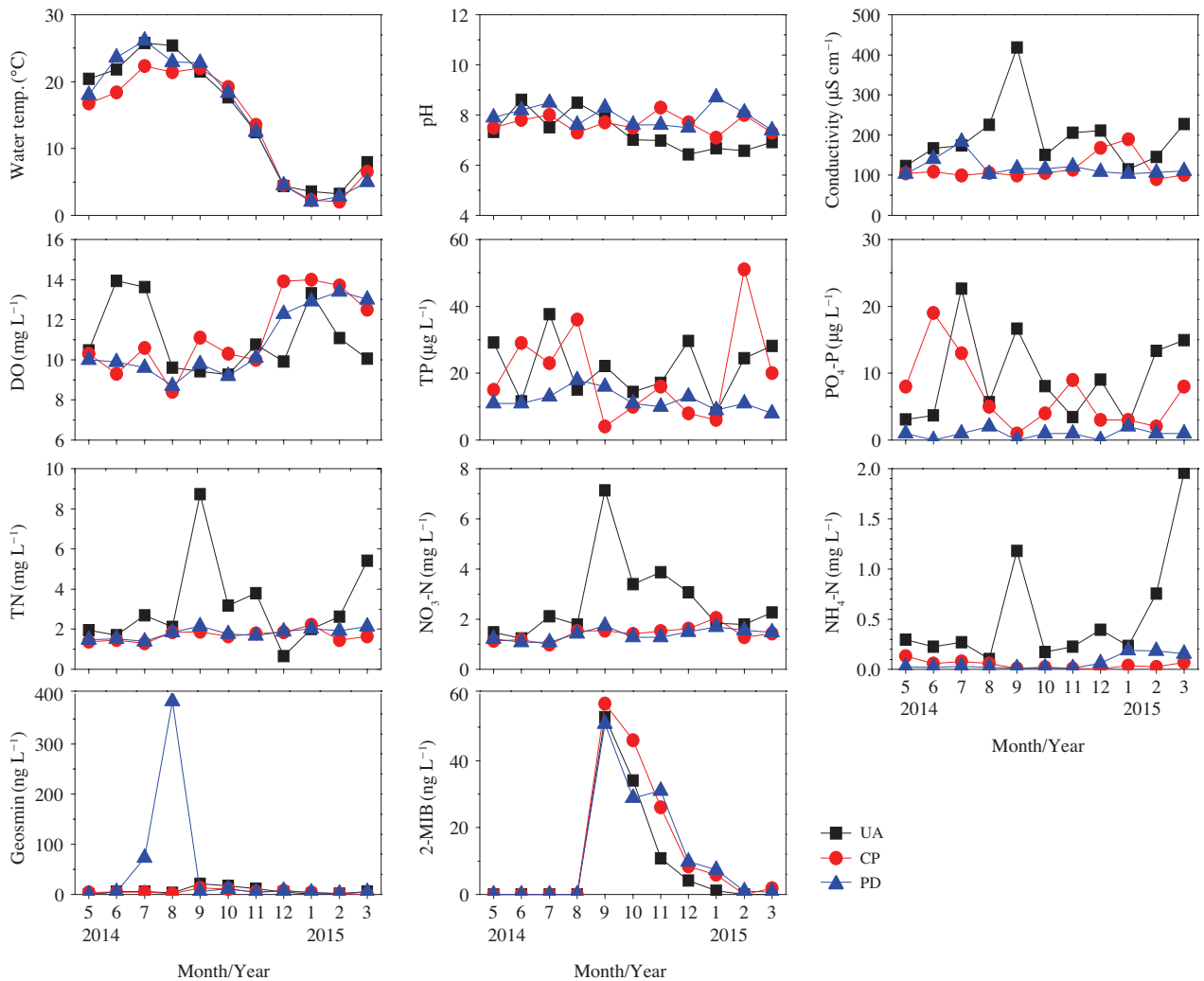


Fig. 2. Monthly fluctuation of environmental factor in three serial lakes of North Han River System from May 2014 to March 2015. UA; Lake Ui-am, CP; Lake Cheong-pyeong, PD; Lake Pal-dang.

암호(53 ng L^{-1}), 청평호(57 ng L^{-1}), 팔당호(51 ng L^{-1})의 모든 조사지점에서 높은 농도로 검출된 후 점차 감소하는 경향을 나타냈다.

2. 식물플랑크톤 군집 동태

각 정점에서 조사기간 동안 식물플랑크톤 현존량 변화를 살펴보면, 의암호에서 식물플랑크톤 현존량은 $40 \sim 6,288 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위로 나타났고, 2014년 9월에 가장 높은 현존량을 보였으며, 그중 *Pseudanabaena limnetica*가 $3,408 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 전체 현존량의 54.2%의 비율을 차지하였다. 청평호에서 식물플랑크톤 현존량은 $56 \sim 2,954 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위로 나타났고, 2014년 9월에 가장 높은 현존량을 보

였으며, 그중 *Pseudanabaena limnetica*가 $2,082 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 전체 현존량의 70.5%의 비율을 차지하였다. 팔당호에서 식물플랑크톤 현존량은 $214 \sim 3,120 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 범위로 나타났고, 2014년 8월에 가장 높은 현존량을 보였으며, 그중 *Anabaena circinalis*가 $2,280 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 전체 현존량의 73.1%의 비율을 차지하였다. 전체적으로 각 정점별 식물플랑크톤 현존량은 큰 폭으로 변화하지 않았다.

각 정점별 식물플랑크톤 우점종은 의암호의 경우 2014년 7월 제외하고 5월부터 8월까지 규조류인 *Asterionella formosa*와 *Fragilaria crotonensis*가 우점종으로 출현하였으며, 7월에는 녹조류인 *Pediastrum duplex* var. *gracillimum*이 일시적으로 우점종으로 출현하였다(Table 1). 규조류가 빈번하게 우점하던 수체에 9월, 10월 남조류인 *Pseudana-*

Table 1. Dominant phytoplankton species and abundance (%) in three serial lakes in North Han River System from May 2014 to March 2015.

Month	Lake Ui-am		Lake Cheong-pyeong		Lake Pal-dang	
	DPS	cells mL ⁻¹ (%)	DPS	cells mL ⁻¹ (%)	DPS	cells mL ⁻¹ (%)
2014/5	<i>Asterionella</i>	952 (89.5)	<i>Cyclotella</i>	32 (57.1)	<i>Fragilaria</i>	216 (56.3)
6	<i>Fragilaria</i>	2,056 (69.1)	<i>Fragilaria</i>	904 (61.4)	<i>Fragilaria</i>	528 (62.9)
7	<i>Pediastrum</i>	256 (15.9)	<i>Aulacoseira</i>	648 (86.2)	<i>Fragilaria</i>	576 (55.0)
8	<i>Fragilaria</i>	384 (19.6)	<i>Aulacoseira</i>	288 (60.0)	<i>Anabaena</i>	2,280 (73.1)
9	<i>Pseudanabaena</i>	3,408 (54.2)	<i>Pseudanabaena</i>	2,082 (70.5)	<i>Pseudanabaena</i>	920 (47.9)
10	<i>Pseudanabaena</i>	952 (34.2)	<i>Fragilaria</i>	528 (52.8)	<i>Aulacoseira</i>	696 (62.1)
11	<i>Fragilaria</i>	576 (77.4)	<i>Fragilaria</i>	472 (79.7)	<i>Fragilaria</i>	496 (59.0)
12	<i>Asterionella</i>	120 (31.5)	<i>Asterionella</i>	152 (35.9)	<i>Rhodomonas</i>	88 (41.1)
2015/1	<i>Fragilaria</i>	272 (82.9)	<i>Asterionella</i>	64 (63.4)	<i>Asterionella</i>	112 (33.3)
2	<i>Asterionella</i>	24 (60.0)	<i>Asterionella</i>	112 (56.0)	<i>Asterionella</i>	240 (81.1)
3	<i>Dinobryon</i>	592 (66.1)	<i>Asterionella</i>	472 (63.8)	<i>Asterionella</i>	392 (49.0)

DPS; dominant phytoplankton species

Anabaena; *Anabaena circinalis*, *Asterionella*; *Asterionella formosa*, *Aulacoseira*; *Aulacoseira granulata*, *Cyclotella*; *Cyclotella meneghiniana*, *Dinobryon*; *Dinobryon divergens*, *Fragilaria*; *Fragilaria crotonensis*, *Pseudanabaena*; *Pseudanabaena limnetica*, *Rhodomonas*; *Rhodomonas lacustris*

*baena limnetica*가 우점종으로 출현하였으며, 이후 2015년 2월까지 다시 규조류인 *Asterionella formosa*와 *Fragilaria crotonensis*가 우점종으로 출현하였고, 3월에는 녹조류인 *Dinobryon divergens*가 우점종으로 출현하였다. 청평호에서는 2014년 5월부터 8월까지 지속적으로 규조류가 우점종으로 출현하였으며, *Cyclotella meneghiniana*, *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis* 등의 종이 우점종으로 출현하였다. 청평호의 경우 9월에만 남조류인 *Pseudanabaena limnetica*가 우점종으로 출현하였고, 이후 다시 규조류인 *Fragilaria crotonensis*, *Asterionella formosa*가 2015년 3월까지 우점종으로 출현했다. 팔당호의 경우 2014년 5월부터 7월까지 지속적으로 규조류인 *Fragilaria crotonensis*가 우점종으로 출현하였으며, 8월에는 남조류인 *Anabaena circinalis*가 9월에는 *Pseudanabaena limnetica*가 우점종으로 출현했다. 이후 2015년 3월까지 규조류인 *Asterionella formosa*, *Fragilaria crotonensis*가 우점종으로 출현했다. 2014년 9월에 의암호, 청평호, 팔당호 모두 *Pseudanabaena limnetica*가 우점종으로 출현하였다. 남조류 *Anabaena*는 최근 2~3년 동안 한강수계에서 대발생을 발생시키는 원인 종으로 *Anabaena circinalis*의 경우 2012년 여름에 대발생을 일으킨 종이다(Li *et al.*, 2013; You *et al.*, 2013; Byun *et al.*, 2014). 남조 *Pseudanabaena limnetica*의 경우 대청호에서 1998년에 우점종으로 출현한 적은 있으나(Park and Lee, 2005), 북한강 수계에서 *Pseudanabaena limnetica*의 우점은 아직까지 보고된 바 없으며, 모든 조사 지점에서 2014년 9월에 처음으로 우점종으로 출현하였다.

조사기간 동안 식물플랑크톤 군집에 대한 분류군별 구성을 전체 식물플랑크톤 현존량에 대한 비율로 분석하였

다(Fig. 3). 의암호의 경우 2014년 5월부터 8월까지 규조강이 55.5~100%의 범위로 가장 많이 출현하였으며, 2014년 9, 10월에는 남조강이 각각 34.2, 54.2%로 가장 많이 출현하였다. 이후 2014년 11월부터 2015년 2월까지 다시 규조강이 39.9~100%의 범위로 가장 많이 출현하였고, 2015년 3월에 황색편모강이 66.1%로 가장 많이 출현하였다. 청평호의 경우 2014년 5월부터 8월까지 규조강이 71.4~96.2%의 범위로 가장 많이 출현하였으며, 2014년 9월에 일시적으로 남조강이 70.5%로 가장 많이 출현하였으나, 2014년 10월부터 2015년 3월까지 다시 규조강이 62.3~96%의 범위로 가장 많이 출현하였다. 팔당호의 경우 2014년 5월부터 7월까지 규조강이 55.0~81.3%의 비율로 가장 많이 출현하였고, 2014년 8월, 9월에 남조강이 각각 73.1, 47.9%의 비율로 가장 많이 출현하였다. 이후 갈색편모강이 44.9%의 비율로 가장 많이 출현한 2014년 12월을 제외하고 2014년 10월부터 2015년 3월까지 규조강이 46.6~100%의 비율로 가장 많이 출현하였다.

전체적으로 북한강 수계에서 봄, 겨울철에 규조강이 우점종으로 출현하고 여름, 가을철에 남조강이 우점종으로 출현하는 특성을 보였다. 이와 같은 출현 특성은 부영양화 호소에서 나타나는 천이 양상을 보였으며(Reynolds, 1984), 최근 북한강 수계에서 보고된 식물플랑크톤 출현 특성과 유사한 경향성을 보였다(Byun *et al.*, 2014).

3. 이취미물질, 환경요인과 남조류의 관계

조사기간 동안 북한강 수계에서 남조류가 우점한 시기에 이취미 물질의 농도가 높게 측정되었다(Fig. 4). 이취미 물

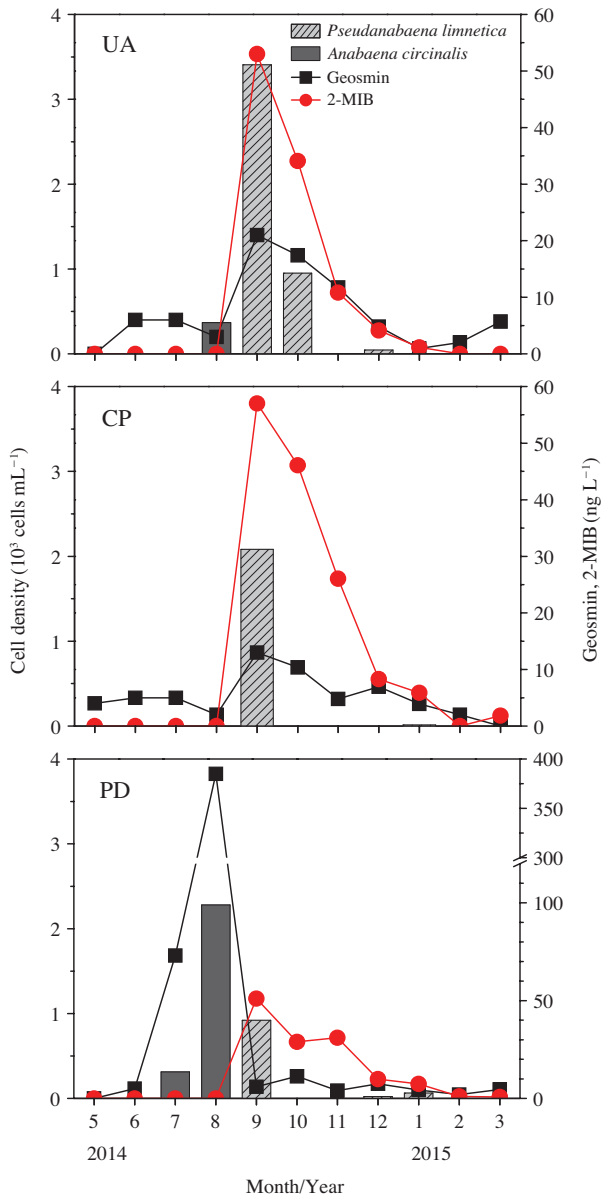


Fig. 3. Monthly fluctuation of cyanobacteria and odorous compounds in three serial lakes of North Han River System from May 2014 to March 2015. UA; Lake Ui-am, CP; Lake Cheong-pyeong, PD; Lake Pal-dang.

질 중 Geosmin의 경우 2014년 8월에는 팔당호에서 *Anabaena circinalis*가 우점종으로 출현하였고, 동일한 시기에 Geosmin농도가 높게 측정하였다. *Anabaena circinalis*를 포함한 *Anabaena*속은 Geosmin을 생성하는 종으로 보고되어 있으며, 같은 시기에 Geosmin농도가 증가하는 것으로 볼 때 Geosmin은 *Anabaena circinalis*가 생성한 것으로 판단된다(Izagulrre *et al.*, 1982; Hayes and Burch, 1989; Saadoun *et al.*, 2001; Tsujimura and Okubo, 2003; Wang *et*

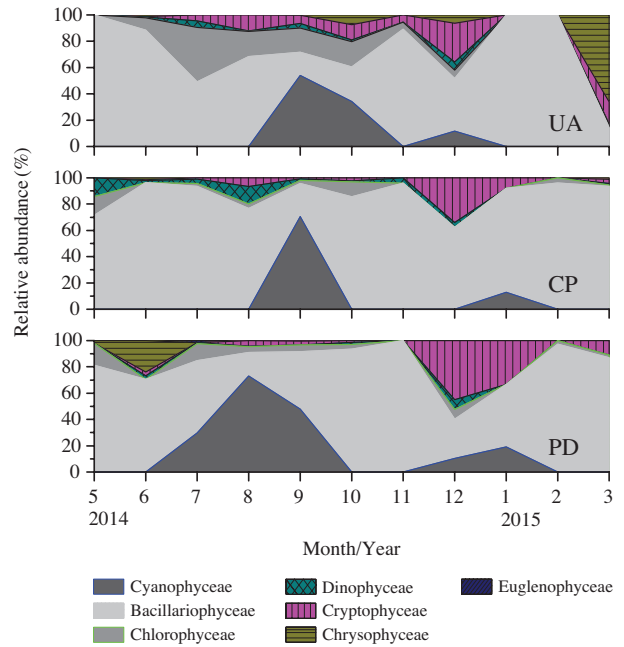


Fig. 4. Monthly fluctuation of relative abundance of phytoplankton in three serial lakes of North Han River System from May 2014 to March 2015. UA; Lake Ui-am, CP; Lake Cheong-pyeong, PD; Lake Pal-dang.

al., 2005). 2014년 8월 이후 Geosmin농도가 급격하게 감소하였는데 이는 장마철에 내린 비와 남한강, 경안천 등의 합류로 인한 희석효과와 댐의 수문 개방으로 인해 발생한 flushing 효과로 감소된 것으로 사료된다(Ward and Stanford, 1983; Jeon *et al.*, 2012; Byun *et al.*, 2014).

이취미 물질인 2-MIB의 경우 2014년 9월 의암호, 청평호, 팔당호 등의 모든 지점에서 높은 농도로 검출되었는데, 동일한 시기에 3개 지점 모두에서 *Pseudanabaena limnetica*가 우점종으로 출현하였기 때문에 판단된다. *Pseudanabaena limnetica*는 이취미 물질인 2-MIB를 생성하는 종으로 보고되어 있는데, 같은 시기에 2-MIB가 높은 농도로 나타난 것으로 볼 때 2-MIB는 *Pseudanabaena limnetica*가 생성한 것으로 판단된다(Izaguirr and Taylor, 1998; Jüttner and Watson, 2007; Kim *et al.*, 2015). 2-MIB는 *Pseudanabaena limnetica*가 낮은 현존량으로 출현하거나 출현하지 않은 10월에도 비교적 높은 농도를 보였는데, 이취미 물질을 생성하는 남조류의 경우 세포가 사멸할 때, 이취미 물질이 용출되는데, 9월에 우점종으로 출현했던 *Pseudanabaena limnetica*가 사멸하면서 세포내에 있는 2-MIB가 용출된 것으로 사료된다(Jüttner and Watson, 2007; Bea *et al.*, 2008; Kim *et al.*, 2014).

북한강 수계에서 조사기간 동안 출현한 남조류와 환경

Table 2. Pearson's correlation coefficient between biological and physicochemical variable in North Han River System from May 2014 to March 2015.

Variable	Cyanobacteria	Total phytoplankton	<i>Pseudanabaena limnetica</i>	<i>Anabaena circinalis</i>
Water temperature	0.360*	0.544**	0.259	0.251
pH	0.104	0.224	0.078	0.068
Dissolved oxygen	-0.328	-0.298	-0.205	-0.280
Conductivity	0.478**	0.589**	0.568**	-0.065
Total phosphorus	-0.081	-0.029	-0.082	-0.014
PO ₄ -P	0.103	0.262	0.185	-0.124
Total nitrogen	0.584**	0.632**	0.685**	-0.063
NO ₃ -N	0.607**	0.626**	0.723**	-0.084
NH ₄ -N	0.213	0.260	0.298	-0.107
Geosmin	0.487**	0.317	-0.016	0.983**
2-MIB	0.570**	0.531**	0.717**	-0.147

*p<0.05, **p<0.01

요인 간의 상관관계 분석을 실시하였다(Table 2). 그 결과 전체 식물플랑크톤은 환경요인 중 수온($r=0.544$), 전기전도도($r=0.589$), 총질소($r=0.632$), 질산성질소($r=0.626$), 2-MIB($r=0.531$)와 유의한 수준에서 양의 상관관계를 보였고, 식물플랑크톤 분류군 중 남조류는 수온($r=0.360$), 전기전도도($r=0.478$), 총질소($r=0.584$), 질산성질소($r=0.607$), Geosmin($r=0.487$), 2-MIB($r=0.570$)와 유의한 수준에서 양의 상관관계를 보여 Geosmin을 제외하고 전체 식물플랑크톤과 유사한 결과를 나타냈다. 남조류 분류군 중 *Pseudanabaena limnetica*의 경우 전기전도도($r=0.568$), 총질소($r=0.685$), 질산성질소($r=0.723$), 2-MIB($r=0.717$)와 유의한 수준에서 양의 상관관계를 보였다. 국내 하천이나 호소에서 주로 인이 제한요소로 작용하여 높은 상관성을 보이거나, 본 연구에서는 질산염의 농도가 남조류와 유의한 상관관계가 나타났다. Park *et al.* (2014)의 연구결과에서 높은 질소 농도가 남조류 발아 및 출현에 영향을 준다는 보고가 있으며, 특히 *Pseudanabaena limnetica*의 경우 질소를 고정하는 이형세포를 가지고 있지 않아 질산염 등의 영양염과 양의 상관관계를 가지는 것으로 판단되며, 질산염의 농도가 *Pseudanabaena limnetica*의 거동에 영향을 주는 요소라고 판단된다(Kallas *et al.*, 1985; Acinas *et al.*, 2009; Kakimoto *et al.*, 2014). 또한 *Pseudanabaena limnetica*는 이취미 물질인 2-MIB를 생성하는데, 상관분석 결과 역시 *Pseudanabaena limnetica*와 2-MIB가 높은 상관관계를 나타내어 *Pseudanabaena limnetica*의 현존량이 2-MIB 농도에 영향을 주는 중요한 요소임이 확인되었다. *Anabaena circinalis*의 경우 이취미 물질인 Geosmin($r=0.983$)과 유의한 수준에서 높은 양의 상관관계를 나타냈으며, Geosmin 항목을 제외하고 모든 항목에서 상관관계가 유의하게 나타내지 않았다. *Anabaena circinalis*는 *Pseudana-*

*baena limnetica*와 달리 질소고정을 하는 이형세포(Heterocyst)를 가지고 있는 종으로 질산염 등의 영양염과 상관성을 나타내지 않은 것으로 사료된다(Fogg, 1949; Golden *et al.*, 1985; Kallas *et al.*, 1985). *Anabaena circinalis*는 이취미 물질인 Geosmin을 생성하는데 상관분석 결과 또한 *Anabaena circinalis*와 Geosmin이 높은 상관관계를 나타내어 *Anabaena circinalis*의 현존량이 Geosmin농도에 영향을 주는 중요한 요소임이 확인되었다.

최근 북한강 수계에서 남조류인 *Anabaena* spp.가 여름철에서 가을철까지 우점하는 경향을 보였으며, 이취미 물질의 경우 역시 *Anabaena* spp.가 생성한다고 알려져있는 Geosmin이 원인 물질로 나타났다(You *et al.*, 2013; Byun *et al.*, 2014; Kim *et al.*, 2014). 이번 연구에서 여름철에 남조 *Anabaena circinalis*가 우점종으로 나타나 선행연구 결과와 유사한 패턴을 보였으나, 가을철에 수온이 낮아지면서 그동안 우점종으로 출현하지 않았던 남조 *Pseudanabaena limnetica*가 처음 우점종으로 출현하였다. 이취미 물질 발생 역시 *Anabaena circinalis*의 현존량이 높았던 2014년 8월에 Geosmin이 높은 농도로 나타났고, *Pseudanabaena limnetica*의 현존량이 높았던 2014년 9월부터 11월까지 2-MIB 농도가 비교적 높게 나타났다. 이러한 결과는 Geosmin뿐 아니라 2-MIB가 이취미 문제의 원인이 될 수 있음을 시사하며, 북한강 수계에서 이취미 물질을 생성하는 남조 *Anabaena*, *Pseudanabaena*속에 대한 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 2014년 5월부터 2015년 3월까지 북한강 수계

3개의 연속댐(의암호, 청평호, 팔당호)의 환경요인 및 식물 플랑크톤 현존량 등을 매월 1회씩 조사하였다. 3개 호의 식물플랑크톤 군집은 규조류-남조류-규조류의 순서로 우점하는 계절성을 보였으며, 가을철 북한강 수계에서 남조 *Pseudanabaena limnetica*가 우점종으로 처음 출현하였다. 이취미 물질을 발생하는 남조 *Anabaena circinalis*, *Pseudanabaena limnetica*의 종이 우점종으로 출현한 시기에 이취미 물질인 Geosmin과 2-MIB 역시 높은 농도로 검출되었다. 환경요인과 남조류의 현존량과의 관계를 보면, *A. circinalis*의 경우 이취미 물질인 Geosmin ($r=0.983$, $p<0.01$)과 유의한 상관성을 나타냈으며, *P. limnetica*의 경우 영양염류 중 총질소($r=0.685$, $p<0.01$), 질산성질소($r=0.723$, $p<0.01$)와 유의한 상관성을 나타냈고, 이취미 물질인 2-MIB ($r=0.717$, $p<0.01$)와 유의한 상관성을 나타냈다. 따라서 북한강 수계에서 나타나는 이취미 물질은 남조류 출현과 직, 간접적인 관계가 있을 것으로 사료되며, 상수원 저수지 이취미 관리를 위해 지속적인 모니터링이 필요하다.

사 사

본 연구는 2014년도 한강수계 환경기초조사사업(유해조류에 의한 이취미물질 발생원인 조사 및 관리방안 연구)의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- Acinas, S.G., T.H. Haverkamp, J. Huisman and L.J. Stal. 2009. Phenotypic and Genetic Diversification of *Pseudanabaena* spp. (cyanobacteria). *The ISME Journal* **3**: 31-46.
- APHA. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21st ed. American Public Health Association. Washington, D.C. USA.
- Bae, B.U., Y.J. Lee and M.G. Lim. 2008. Comparison of Taste and Odor in Raw Water from the Main Daecheong Reservoir and its Regulating Reservoir Downstream. *Journal of Korean Society on Water Environment* **24**(5): 598-602.
- Byun, J.H., I.H. Cho, S.J. Hwang, M.H. Park, M.S. Byeon and B.H. Kim. 2014. Relationship between a Dense Bloom of Cyanobacterium *Anabaena* spp. and Rainfalls in the North Han River System of South Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**(2): 116-126.
- Fogg, G.E. 1949. Growth and Heterocyst Production in *Anabaena* *Cylindrica* Lemm.: II. In Relation to Carbon and Nitrogen Metabolism. *Annals of Botany*: 241-259.
- Golden, J.W., S.J. Robinson and R. Haselkorn. 1985. Rearrangement of nitrogen fixation genes during Heterocyst differentiation in the Cyanobacterium *Anabaena*. *Nature* **314**: 419-423.
- Hayes, K.P. and M.D. Burch. 1989. Odorous compounds associated with algal blooms in South Australian waters. *Water Research* **23**: 115-121.
- Izaguirre, G., C.J. Hwang, S.W. Krasner and M.J. McGuire. 1982. Geosmin and 2-methylisoborneol from Cyanobacteria in Three Water Supply Systems. *Applied and Environmental Microbiology* **43**: 708-714.
- Izaguirre, G. and W.D. Taylor. 1998. A pseudanabaena Species from Castaic Lake, California, That Produces 2-methylisoborneol. *Water Research* **32**(5): 1673-1677.
- Jeon, H.W., J.W. Choi and K.G. An. 2012. Spatio-temporal Water Quality Variations at Various Streams of Han-River Watershed and Empirical Models of Serial Impoundment Reservoirs. *Korean Journal of Limnology* **45**(4): 378-391.
- Jüttner, F. and S.B. Watson. 2007. Biochemical and Ecological Control of Geosmin and 2-methylisoborneol in Source Waters. *Applied and Environmental Microbiology* **73**(4): 4395-4406.
- Kakimoto, M., T. Ishikwa, A. Miyagi, K. Saito, M. Miyazaki, T. Asaeda, M. Yamaguchi, H. Uchimiya and M. Kawai-Yamada. 2014. Culture temperature affects gene expression and metabolic pathways in the 2-methylisoborneol-producing cyanobacterium *Pseudanabaena galeata*. *Journal of Plant Physiology* **171**(3): 292-300.
- Kallas, T., T. Coursin and R. Rippka. 1985. Different organization of *nif* genes in nonheterocystous and heterocystous cyanobacteria. *Plant Molecular Biology* **5**(5): 321-329.
- Kim, Y.J., S.J. Youn, H.N. Kim, M.Y. Hwang, J.R. Park, B.C. Lee and J.K. Lee. 2013. Formation of Phytoplankton Community and Occurrences of Odorous Compounds for Sediment Incubation by Water Temperature. *Journal of Korean Society on Water Environment* **31**(5): 460-467.
- Kim, Y.J., S.J. Youn, H.N. Kim, E.R. Park, M.Y. Hwang, J.R. Park, B.C. Lee and J.K. Lee. 2014. Formation of Plankton Community and Occurrences of Odorous Compounds by Sediment Incubation. *Journal of Korean Society on Water Environment* **30**(6): 658-664.
- Lawton, L.A. and G.A. Codd. 1991. Cyanobacteria (blue green algal) Toxins and Their Significance in U.K. and European Waters. *Journal of the Institution of Water & Environmental Management* **5**: 460-465.
- Lee, J.E., J.G. Park and E.J. Kim. 2002. Trophic States and Phytoplankton Compositions of Dam Lakes in Korea. *Algae* **17**(4): 275-281.
- Ministry of environment (MOE). 2011. Drinking water quality monitoring guideline.
- National Institute of Environmental Research (NIER). 2014. Physiological and Ecological Characteristics of Algae in the Lake Paldang (I). National Institute of Environmental Research, pp. 62.

- Paerl, H.W. and R.S. Fulton III. 2006. Ecology of Harmful Cyanobacteria, p. 95-107. *In: Ecology of Harmful Algae* Springer Berlin Heidelberg.
- Park, C.H., B.J. Lim, K.A. You, M.H. Park and S.J. Hwang. 2014. Effects of Environmental Factors on Akinete Germination of *Anabaena circinalis* (Cyanobacteriaceae) Isolated from the North Han River. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**(4): 292-301.
- Park, H.K. and W.H. Jheong. 2003. Long-term Changes of Algal Growth in Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Quality* **19**(6): 673-684.
- Park, J.E. 2006. A Modeling Study for the Impact Prediction of Serial Impoundments on Downstream Temperature Distribution. Master thesis, Ewha Womans University, Korea.
- Park, J.G. and J.J. Lee. 2005. Community Dynamics of Phytoplankton in Lake Daecheong. *Algae* **20**(3): 197-205.
- Park, J.H., B.L. Moon and O.M. Lee. 2006. The Phytoplankton Composition and Trophic States at Several Lake of Suwon-si, Korea. *Algae* **21**(2): 217-228.
- Peterson, H.G., S.E. Hrudey, I.A. Cantin, T.R. Perley and S.L. Kenefick. 1995. Physiological Toxicity, Cell Membrane Damage and the Release of Dissolved Organic Carbon and Geosmin by *Aphanizomenon flos-aquae* after Exposure to Water Treatment Chemicals. *Water Research* **29**(6): 1515-1523.
- Reynolds, C.S. 1984. Phytoplankton periodicity the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater Biology* **14**: 11-42.
- Saadoun, I.M.K., K.K. Schrader and W.T. Blevins. 2001. Environmental and Nutritional factors Affecting Geosmin Synthesis by *Anabaena* sp. *Water Research* **35**: 1209-1218.
- Shin, H.J. and O.M. Lee. 2014. The Dynamic of Phytoplankton Communities and the Biological Water Quality Assessment at Three Artificial Weirs in Downstream of Namhan-river. *Journal of Korean Society on Water Environment* **30**(6): 612-621.
- Suffet, I.H. 1995. Advances in Taste-And-Odor Treatment and Control. American Water Works Association.
- Sugiura, N., O. Nishimura, Y. Inamor, T. Ouchiyama and R. Sudo. 1997. Grazing characteristics of musty-odor-compound-producing *Phormidium tenue* by a microflagellate, *Monas guttula*. *Water Research* **31**(11): 2792-2796.
- Sugiura, N. and K. Nakano. 2000. Causative Microorganisms for musty Odor occurrence in the Eutrophic Lake Kasumigaura. *Hydrobiologia* **434**(1-3): 145-150.
- Tsujimura, S. and T. Okubo. 2003. Development of *Anabaena* Blooms in a Small Reservoir with Dense Sediment Akinete Population, with Special Reference to Temperature and Irradiance. *Journal of Plankton Research* **25**: 1059-1067.
- Wang, S.H., A.R. Dzialowski, J.O. Meyer, F. de Noyelles, N.C. Lim, W.W. Spotts and D.G. Huggins. 2005. Relationships Between Cyanobacterial Production and the Physical and Chemical Properties of a Midwestern Reservoir, USA. *Hydrobiologia* **541**: 29-43.
- Watson, S.B. 2003. Cyanobacterial and Eukaryotic Algal Odour Compounds: Signal or By-products? A Review of Their Biological Activity. *Phycologia* **42**: 332-350.
- Watson, S.B. 2004. Aquatic Taste and Odor: a Primary Signal of drinking-water integrity. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* **67**(20-22): 1779-1795.
- Watson, S., M. Charlton, Y. Rao, T. Howell, J. Ridal and B. Brownlee, C. Marvin and S. Millard. 2007. Off Flavours in Large Waterbodies: Physics, Chemistry and Biology in Synchrony. *Water Science and Technology* **55**(5): 1-8.
- Ward, J.V. and J.A. Stanford. 1983. The Serial Discontinuity Concept of Lotic Ecosystems, p. 29-42. *In: Dynamics of Lotic Ecosystems* (Fontaine, T.D. and S.M. Bartell, eds.), Ann Arbor Science, Ann Arbor, USA.
- Whelton, A.J. and A.M. Dietrich. 2004. Relationship Between Intensity Concentration and Temperature for Drinking Water Odorants. *Water Research* **38**: 1604-1614.
- You, K.A., M.S. Byeon, S.J. Youn, S.J. Hwang and D.H. Rhew. 2013. Growth Characteristics of Blue-green Algae (*Anabaena spiroides*) Causing Tastes and Odors In the North-Han River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 135-144.
- Zimba, P.V., C.C. Grimm, C.P. Dionigiand and C.R. Weirich. 2001. Phytoplankton Community Structure, Biomass, and Off-flavor: Pond Size Relationships in Louisiana Catfish Ponds. *Journal of the World Aquaculture Society* **32**(1): 96-104.