KJEE 51(4): 299-310 (2018)
https://doi.org/10.11614/KSL.2018.51.4.299
ISSN: 2288-1115 (Print), 2288-1123 (Online)

Original article

북한강 수계 미소생물 군집 및 이취미 물질의 시공간적 분포 특성

변정환[1,2] · 유미나[1] · 이은정[1] · 유순주[1] · 김백호[2,*] · 변명섭[1,*]

[1]국립환경과학원 한강물환경연구소, [2]한양대학교 생명과학과

Temporal and Spatial Distribution of Microbial Community and Odor Compounds in the Bukhan River System. *Byun, Jeong-Hwan*[1,2] (0000-0001-5422-2950), *Mina Yu*[1] (0000-0003-2047-7589), *Eunjeong Lee*[1] (0000-0002-7260-1900), *Soon-Ju Yoo*[1] (0000-0002-1860-131x) *Baik-Ho Kim*[2,*] (0000-0002-7144-0770) *and Myeong-Seop Byun*[1,*] (0000-0003-0997-2415) *([1]Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Gyeonggi 12585, Republic of Korea; [2]Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 04763, Republic of Korea)*

Abstract Odor compounds (geosmin, 2-MIB) have been causing problems in the Bukhan River system, but the causative organisms have not been clearly identified. To evaluate the relationship between dynamics of microbial community and odor compounds, two times monthly monitoring of water quality and microbial community from the three serial lakes (Lake Uiam, Lake Cheongpyeong and Lake Paldang) in the Bukhan River system were conducted from April to October 2017. The odor compounds were analyzed by HS-SPME analysis method using GC/MS. Bacteria communities were identified at the class level by NGS analysis. Actinobacteria and Betaproteobacteria were dominant taxon in bacteria community of three serial lakes. In the case of phytoplankton communities showed that seasonal changes by Bacillariophyceae and Cryptophyceae in spring, Cyanobacteria in summer, and Bacillariophyceae and Cryptophyceae in autumn. Dominant species was *Dolichospermum* (=*Anabaena*), *Microcystis* and *Pseudanabaena* in Bukhan River system in all study period. At the same time the odors geosmin and 2-MIB were also detected at high concentration. There is a significant positive correlation between proportion of Actinobaceria and 2-MIB concentration ($r=0.491$, $p<0.01$). In addition, proportion of cyanobacteria showed a significant correlation of geosmin ($r=0.381$, $p<0.05$) and 2-MIB ($r=0.386$, $p<0.05$) concentration. In this study, odor compounds in the Bukhan River system are considered to be a direct relationship between with Actinobacteria and cyanobacteria.

Key words: Bukhan River, Cyanobacteria, Actinobacteria, geosmin, 2-MIB

서 론

한국의 주요 강은 댐의 건설로 인한 인공호를 포함하는 구조적 특성을 가지고 있다. 특히, 북한강 수계는 풍부한 유량과 큰 경사도로 이루어져 있어 댐을 건설하는데 유리한 조건으로 작용하며, 화천댐, 소양댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐 그리고 남한강 수계 및 경안천과 합류되는 팔당댐까지 많은 다목적 댐이 건설되었다(Park, 2006). 그러나 이러한 인공호의 건설은 수체의 체류시간을 증가시키는 원인이 되고, 영양염 등의 축적으로 호소의 부영양화 현상이 빈번하게 일어난다. 호소에서 부영양화 현상이 발생하

Manuscript received 29 October 2018, revised 10 December 2018, revision accepted 12 December 2018
* Corresponding author: Tel: +82-31-770-7270, Fax: +82-31-773-2268, E-mail: zacco@korea.kr
Tel: +82-2-2220-0960, Fax: +82-2-2298-0319, E-mail: tigerk@hanyang.ac.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.

면 이화학적 변화로 미소생물의 이상증식 등이 발생해 수중 생태계 및 수자원 이용에 심각한 문제를 야기하게 된다 (Hayes and Burch, 1989; Lawton and Codd, 1991; Park and Jheong, 2003).

특히, 방선균 및 남조류 등이 대발생 할 경우 2차 대사산물로 생성되는 이취미 물질이 흙, 곰팡이 냄새를 발생시켜 고도의 정수처리를 하지 않을 경우 음용수를 공급하는 과정에서 심미적인 문제를 일으킨다. 국내에서 이취미 문제를 일으키는 대표적인 이취미 물질은 geosmin과 2-Methylisoborneol (2-MIB) 물질이며, geosmin은 Gerber and Lechevalier (1965)에 의해 방선균으로부터 분리한 물질에서 처음 발견되었고, 2-MIB 역시 방선균과 남조류 등의 생물에서 유래한 이취미 물질로 보고되었다 (Bentley and Meganathan, 1981). 방선균 이외에 이취미 물질을 생성하는 남조류는 *Dolichospermum* (=*Anabaena*), *Aphanizomenon*, *Lyngbya*, *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Planktonthrix*, *Pseudanabaena*속 등이 보고되었으며 (Peterson *et al*., 1995; Sugiura *et al*., 1997; Izaguirre and Taylor, 1998; Sugiura and Nakano, 2000; Saadoun *et al*., 2001; Zimba *et al*., 2001), 이취미 물질은 독성은 없으나 심미적 불쾌감을 주는 물질로 4~10 ng L^{-1}의 농도의 범위에서 인간이 감지할 수 있으며, 일본의 경우 음용수 규제기준을 10 ng L^{-1} 이하로 설정하고 있다 (Suffer *et al*., 1995; Whelton and Dietrich, 2004). 우리나라의 경우 규제기준은 없지만, 먹는물 수질 감시 항목으로 지정하여 권고기준 20 ng L^{-1} 이하로 관리하고 있다 (MOE, 2011).

최근 이취미 물질은 국외뿐 아니라 국내에서 역시 큰 관심을 받고 있는 환경문제로 주목받고 있다. 우리나라의 경우 2011년 북한강 수계에서 남조류가 이상증식을 일으켜 상수원으로 이용되는 팔당호에서 이취미물질 중 Geosmin이 높은 농도로 검출되어 문제가 된 사례가 있었으며, 2014년에는 이취미 물질 중 2-MIB가 북한강 수계에 높은 농도로 검출되어 문제가 되었다 (You *et al*., 2013; Byun *et al*., 2015). 이후 여름과 가을철에 북한강, 팔당호 등에서 지속적으로 이취미 물질의 발생이 보고되었다 (NIER, 2014). 하지만, 수계 내 남조류 미출현 시 이취미 물질 발생에 대한 연구는 미비한 실정으로, 갈수기 및 저수온기에 발생하는 이취미 문제에 대해 연구가 필요하다.

따라서 본 연구는 북한강 수계내의 환경요인, 미소생물 (박테리아, 식물플랑크톤) 군집, 이취미 물질의 관계를 통해 미소생물 군집 변화와 이취미 물질의 동태를 파악하고자 이취미 물질이 발생하는 북한강 수계의 의암호, 청평호, 팔당호 지점을 선정하여, 2017년 4월부터 10월까지 조사를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 기간

조사지점은 2011년부터 이취미 물질이 빈번하게 발생했던 북한강 수계 중 의암호의 중도선착장 (UA; 37°51′19″, 127°42′49″), 청평댐 앞 (청평호; 37°43′26″, 127°25′37″), 팔당댐 앞 (PD; 37°31′22″, 127°17′1″) 등 3개 정점을 선정했으며 (Fig. 1), 환경요인의 경우 2017년 4월부터 10월까지 월 1회, 이취미 물질 및 미소생물의 경우 2017년 4월부터 10월까지 월 2회씩 조사를 실시하였다.

2. 환경요인 분석

조사지점별 수질조사항목은 호소환경조사지침의 시료채취 원칙에 따라 채수하였으며, 실험실 분석항목은 현장 시료를 냉암소에서 보관하여 실험실로 옮긴 후 분석하였다.

수질조사항목 중 수온 (Water temperature), 수소이온농도 (pH), 용존산소 (Dissolved oxygen)는 현장수질측정기 (YSI-6600D, America)를 이용하여 현장에서 측정하였다. 영양염류 분석의 경우 용존총질소 (DTN)는 카드뮴 환원법, 용존총인 (DTP)은 아스코르빈산 환원법으로 각각 측정된 결과를 물환경정보시스템에 공개된 자료를 활용하였다.

이취미 물질인 Geosmin, 2-MIB는 먹는물 수질감시항목 지침 (MOE, 2011)에 따라 기체크로마토그래피/질량분석기 (GC/MS) (Varian, US/CP3800)를 이용하여 HS-SPME (Head Space-Solid Phase Micro-Extraction)법을 적용하여 분석하였다. 분석 전 시료 전처리를 위해 화이버를 270°C에서 1시간 이상 헬륨가스를 유량 1 mL min^{-1}로 흘려 활성화하고 20 mL 유리병 (vial)에 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 GC/MS로 분석하여 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^{-1}까지 단계적으로 첨가하고 HS-SPME 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 분석화학물 위치 면적 (Ax)을 대입한 후 X (i)값을 계산하여 분석물질의 농도 (Cs, ng L^{-1})를 구하였다.

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

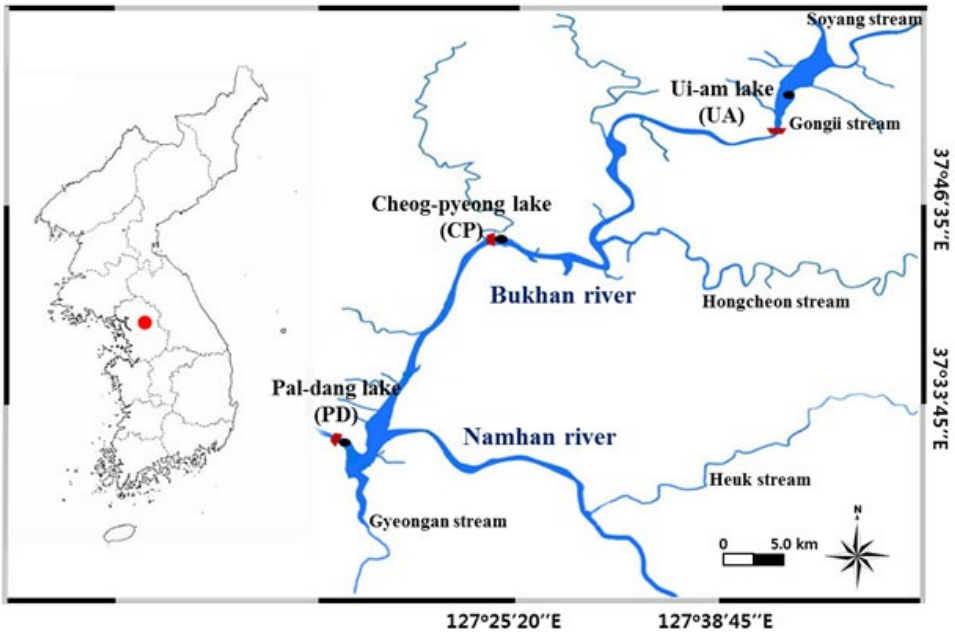

Fig. 1. A map showing the sampling sites in Bukhan River system.

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

3. 미소생물 분석

조사지점별 채수는 반돈(Van Dorn) 채수기로 표층수(수심 30 cm)에서 현장수를 채수하였으며, 식물플랑크톤의 동정과 계수를 위해 채수한 시료를 250 mL 폴리에틸렌 채집병에 넣고, 루골(Lugol) 용액으로(최종농도 1%, v/v) 고정하였다. 고정시료는 48시간 이상 침강시킨 후 조류 농도에 따라 Siphon을 이용하여 상등액을 제거하는 방법으로 2~5배 농축한 후 식물플랑크톤을 동정하였다. 동정은 광학현미경 200~1000배(Nikon eclipse E600, Japan)를 이용하여 종 수준까지 하였고, 동일 속에서 뚜렷한 식별 형질의 차이를 보이지 않는 종은 미동정종(sp.)으로 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 200~400배(Nikon eclipse E600, Japan)에서 군체 또는 세포 수를 계수하였다.

박테리아 동정을 위해 채수한 시료 중 200 mL를 0.25 μm 멤브레인 필터(membrane filter, Whatman, England)에 여과하였으며, DNA extraction kit (MO Bio, Germany)의 프로토콜에 따라 DNA를 추출하였다. 추출된 DNA는 차세대염기서열분석(NGS; Next Generation Sequencing) 방법을 이용하였다. 박테리아 Operational taxonomic unit (OTU)은 97% sequence 유사성에 따라 구분하였다. 동정의 정확성을 위해 박테리아를 강(Class) 수준까지 동정하였으며, 차세대염기서열 분석은 실험실에서 DNA 추출 후 LTSW 분석 센터(www.bccio.16mb.com, HongKong)에 의뢰를 분석하여 수행하였다.

박테리아 현존량은 DAPI staining 방법을 이용하여 세포수 현존량을 관찰하였으며, DAPI staining은 DAPI staing Kit (GenScript, China)를 이용하여 염색후 형광을 이용해 광학현미경(Nikon eclipse 80i, Japan) 상에서 계수하였다.

북한강 수계에 출현한 미소생물과 환경요인 및 이취미 물질의 상관관계를 분석하기 위해 조사기간 동안 분석된 결과를 바탕으로 비모수 상관분석인 Spearman의 상관지수 분석법을 이용하여 상관관계를 분석하였다(SPSS Statistics 21. IBM).

결과 및 고찰

1. 환경요인 및 이취미 물질 변화

조사기간 동안 북한강 수계의 강수량은 '17년 4월부터 10월까지 950 mm 이상의 많은 강우('15년 약 600 mm,

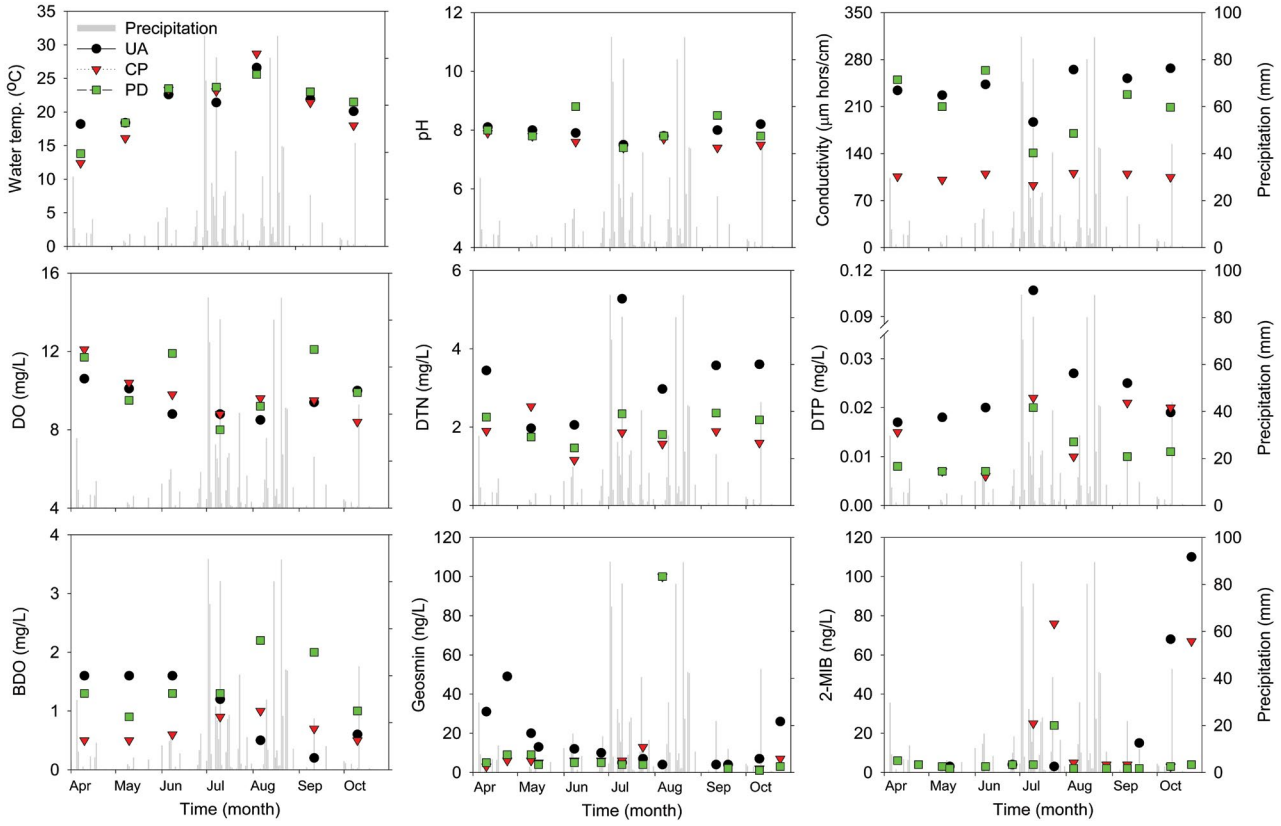

Fig. 2. Monthly fluctuation of environmental factor in three serial lakes of Bukhan River system from April to October 2017. UA; Lake Uiam, CP; Lake Cheongpyeong, PD; Lake Paldang.

'16년 약 815 mm)가 발생하였으며, 그 중 몬순기인 7월에 500 mm 이상의 강우가 집중 발생하였다(Fig. 2). 수온의 경우 12.4~28.7°C의 범위로 나타났으며, 조사지점 간 큰 차이는 없었다. 평균 수온은 21.0°C로 일반적인 국내하천의 4~10월 사이의 수온과 유사한 경향을 나타냈다(Lee *et al*., 2002; Park *et al*., 2006; Shin and Lee, 2014, Byun *et al*., 2016). pH의 경우 7.4~8.8의 범위로 나타났으며, 조사지점 간 큰 차이는 없었다. 전기전도도는 93~267 µmhos cm^{-1}의 범위로 나타났으며, 청평호의 전기전도도가 의암호, 팔당호에 비해 낮게 나타났다. 용존산소(DO)의 경우 8.0~12.1 mg L^{-1}의 범위로 계절별로 농도 차이가 나타났으며, 팔당호에서 6월과 9월에 높게 나타났다. 생화학적 산소요구량(BOD)은 4월부터 6월까지 의암호에서 1.6 mg L^{-1}로 조사지점 중 가장 높게 나타났고, 7월부터 10월까지는 팔당호에서 1~2.2 mg L^{-1}로 조사지점 중 가장 높게 나타났으며, 청평호는 조사기간 동안 1 mg L^{-1} 이하로 낮게 나타났다. 의암호의 경우 BOD가 높게 나타난 3월부터 6월까지 박테리아 현존량이 청평호, 팔당호에 비해 높게 출현해 BOD가 높은 값으로 나타난 것으로 판단되며, 팔당호의 경우 BOD가 2.2 mg L로 가장 높게 나타난 3월 7일은 식물플랑크톤 현존량이 5,933 cells m L^{-1}로 높게 나타나 식물플랑크톤에 의한 BOD 증가로 판단된다.

영양염 중 용존총질소(DTN)는 1.16~5.28 mg L^{-1}의 범위로 나타났으며, 5월을 제외한 조사기간 동안 의암호에서 가장 높게 나타났다. 용존총인(DTP)의 경우 0.007~0.107 mg L^{-1}의 범위로 나타났으며, 조사기간 동안 의암호에서 가장 높게 나타났다. 모든 조사지점에서 7월에 용존총질소(DTN)와 용존총인(DTP) 농도가 증가하였는데, 이는 몬순기에 많은 강우로 인해 토양에 축적되어 있던 유기물이 유입되어 영양염 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 용존총질소(DTN) 및 용존총인(DTP) 농도는 의암호에서 가장 높은 농도가 나타났으며, 의암호를 제외한 다른 조사지점 간 차이는 크지 않았다. 북한강 수계는 전체적으로 영양염류의 농도가 중, 빈영양 수준의 수질을 나타내지만, 의암호의 경우 춘천하수처리장의 방류수와 춘천시를 통과하며 국지적으로 오염된 공지천의 유입으로 인산염 및 질산염의 농도가 비교적 높게 나타난 것으로 판단된다(Park *et al*., 2004).

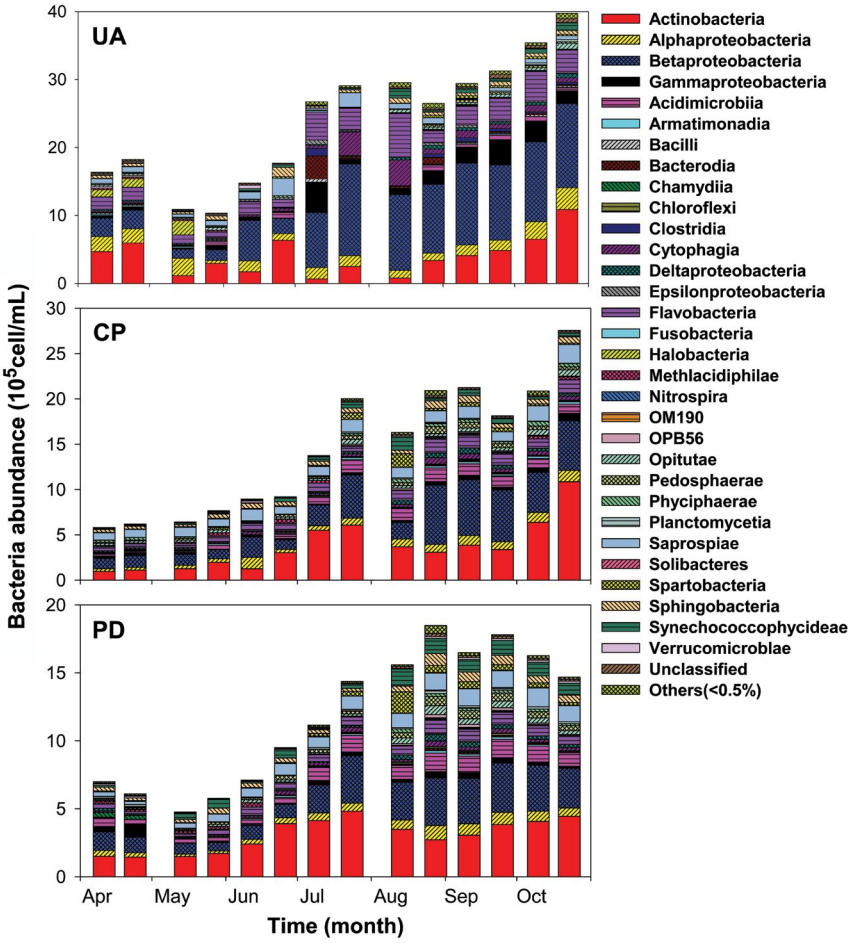

Fig. 3. Monthly fluctuation of relative abundance of bacteria in three serial lakes of Bukhan River system from April to October 2017. UA; Lake Uiam, CP; Lake Cheongpyeong, PD; Lake Paldang.

이취미 물질 중 geosmin의 경우 0~100 ng L^{-1}의 범위로 나타났다. 의암호에서 4~6월까지 전체 조사지점 중 geosmin이 가장 높게 나타났으며, 8월 14일에 청평호, 팔당호에서 geosmin이 100 ng L^{-1}의 매우 높은 농도로 나타나다가 급격하게 감소하였다. 이후 전체조사 지점에서 낮은 농도를 유지하다가 10월 24일에 의암호에서 26 ng L^{-1}로 높게 나타났다. 봄철인 4~5월에 먹는물 수질 감시기준 농도인 20 ng L^{-1} 이상의 농도가 의암호에서 검출되었고, 다른 지점에서는 20 ng L^{-1} 이하의 농도로 검출되었다. 여름철의 경우 8월에 청평호와 하류인 팔당호에서 8월 14일에 100 ng L^{-1} 이상의 높은 농도의 geosmin이 검출되었다. 이후 모든 조사지점에서 감시기준보다 낮은 7 ng L^{-1} 이하의 농도로 검출되었으며, 10월 24일 의암호에서 26 ng L^{-1}의 geosmin이 검출되었다.

2-MIB의 경우 몬순이 시작되기 전까지 모든 조사지점에서 6 ng L^{-1} 이하의 낮은 농도로 나타났다. 7월 10일 청평호에서 처음 먹는물 수질 감시기준 이상의 25 ng L^{-1}의 농도로 나타난 이후, 7월 24일 청평호와 팔당호에서 각각 76, 24 ng L^{-1}의 높은 농도의 2-MIB 농도가 나타났으며, 이후, 급격히 감소하여 9월 4일까지 모든 조사지점에서 5 ng L^{-1} 이하의 낮은 농도로 유지되었다. 의암호에서 9월 19일에 15 ng L^{-1}로 증가하기 시작하여, 10월 10일에 68 ng L^{-1}, 10월 24일에 110 ng L^{-1}까지 꾸준히 증가하였으며, 10월 24일에는 청평호에서 역시 67 ng L^{-1}의 감시기준을 초과하는 높은 농도의 2-MIB가 나타났다.

2. 미소생물 군집 변화

1) 박테리아

북한강 수계에서 조사기간 동안 박테리아는 31 분류군이 출현하였다. 전체 군집 중 10% 이상의 비율로 출현했던 분류군은 Actinobacteria, Betaproteobacteria, Alpha-

proteobacteria, Flavobacteria, Saprospirae로 나타났으며, 위의 분류군은 담수, 해양, 토양 등 전반적 환경에 다양하게 분포되어 있는 종으로 보고되어 있다(Bernardet *et al*., 1996; Parveen *et al*., 2011; Newton *et al*., 2011; Kang *et al*., 2013; Bai *et al*., 2017). 전 지점에서 가장 높게 출현했던 분류군은 Actinobacteria와 Betaproteobacteria로 각 정점의 군집 전체에서 30% 이상을 차지하였으며(Fig. 3), 이 결과는 Actinobacteria와 Betaproteobacteria가 담수생태계에서 우점도가 높은 생물군이라는 보고와 같은 결과이다(Klausen *et al*., 2005; Newton *et al*., 2011).

각 정점에서 박테리아 현존량 및 군집변화를 살펴보면, 의암호의 경우 10.4~39.8 10^5 cells mL^{-1}의 범위로 나타났고, 10월 24일에 가장 높은 현존량을 나타냈으며, 5월 15일에 가장 낮게 나타났다. 박테리아 현존량은 몬순기 이후에 급증하였는데, 이는 토양에 존재하는 박테리아가 강우의 영향으로 수계에 다량 유입되면서 박테리아 현존량이 직접적으로 증가하고, 동시에 높은 농도의 영양염이 수체 내로 유입되어 박테리아가 증식하기 유리한 조건으로 작용하였을 것으로 사료된다. 특히, 이 시기에 우점분류군으로 출현한 Betaproteobacteria 분류군은 용존영양염을 이용해 성장하는 분류군으로 용존총질소 및 용존총인이 높게 나타났던 의암호에서 Betaproteobacteria의 현존량을 증가시켰을 것으로 판단된다(Niemi *et al*., 2009; Louati *et al*., 2015). 시기별 우점 분류군 변화는 4월에 Actinobacteria가 높은 비율로 우점 출현했으며, 5, 6월에 Actinobacteria, Betaproteobacteria, Alphaproteobacteria가 혼재되어 우점 출현하였다. 이후 7월부터 꾸준히 Betaproteobacteria가 우점 출현하였다.

청평호의 경우 5.8~27.6 10^5 cells mL^{-1}의 범위로 나타났고, 10월 24일에 가장 높은 현존량을 나타냈으며, 4월 10일에 가장 낮게 나타났다. 청평호의 박테리아 현존량은 몬순기 이후에 증가하였으며, 상류지점인 의암호 지점과 유사한 패턴을 나타냈다. 청평호 역시 강우의 영향으로 토양의 박테리아가 수계에 유입되면서 현존량이 증가하였을 것으로 판단된다. 우점 분류군 변화는 조사기간 동안 Actinobacteria와 Betaproteobacteria가 혼재되어 우점 출현하였다.

팔당호의 경우 4.8~14.7 10^5 cells mL^{-1}의 범위로 나타났고, 10월 24일에 가장 높은 현존량을 나타냈으며, 5월 8일에 가장 낮게 나타났다. 팔당호 역시 몬순기 이후에 박테리아 현존량이 증가하였으나, 의암호, 청평호 지점에 비해 증가량이 낮았는데, 팔당호의 경우 북한강 수계뿐 아니라 남한강 수계와 경안천이 동시에 유입되는 지점으로, 남한강 및 경안천 등의 유입이 박테리아 현존량에 영향을 주었을 것으로 판단된다. 우점 분류군 변화는 8월 28일, 9월 11일 조사를 제외한 조사기간 동안 Actinobacteria가 지속적으로 우점 출현하였으며, 8월 28일, 9월 11일에는 Betaproteobacteria가 우점 출현하였다.

전체적으로 박테리아 현존량은 의암호에서 가장 높게 나타났으며, 현존량 변화는 전체 조사지점에서 유사한 패턴을 나타냈다. 박테리아 군집 변화는 의암호를 제외한 청평호, 팔당호 지점에서 유사하게 나타났는데, 의암호의 경우 청평호, 팔당호 지점에 비해 상대적으로 유량이 적고 조사지점의 수심이 낮아 강수 발생시 유입되는 박테리아 현존량이 다른 지점에 비해 상대적으로 높게 나타났으며, 군집 구조 역시 다르게 나타난 것으로 사료된다.

2) 식물플랑크톤

북한강 수계에서 조사기간 동안 식물플랑크톤은 6강 27목 37과 49속 102종이 출현하였다. 각 정점별 식물플랑크톤 현존량 및 군집 변화를 살펴보면, 의암호의 경우 200~16,340 cells mL^{-1}의 범위로 나타났고, 6월 26일에 가장 높은 현존량을 나타냈으며, 7월 10일에 가장 낮게 나타났다. 시기별 우점종 변화는 봄철인 4~6월에 주로 *Cyclotella*, *Synedra*, *Fragilaria* 속 등의 규조류가 우점 출현했으며, 수온이 상승함에 따라 은편모조류의 *Rhodomonas*, 녹조류인 *Pandorina* 속이 우점 출현하였다(Table 1). 여름철인 7, 8월의 경우 강우 발생기인 7월 10일, 8월 28일에 높은 수온에도 불구하고 규조류 *Nitzschia* 속이 우점 출현하였는데, 이는 몬순기 강우에 의한 영향으로 판단된다. 한반도의 몬순은 여름철에 2번의 집중호우가 뚜렷하게 나타나는 특성을 가지고 있으며(Ha *et al*., 2005), 7월 10일의 경우 첫 번째 집중호우 시기에 발생한 130.5 mm의 집중강우로 인한 희석효과로 식물플랑크톤 현존량이 낮아져 80 cells mL^{-1}의 낮은 현존량으로 출현한 *Nitzschia palea*가 우점종으로 나타났을 것으로 사료된다. 8월 28일의 경우 두 번째 집중강우 이후 실시된 조사로 1,402 CMS의 많은 댐 방류량(평균 방류량 167 CMS)에 의한 flushing 효과에 의해 *Nitzschia palea*가 150 cells mL^{-1}의 낮은 현존량으로 우점 출현했을 것으로 사료된다(Ward and Stanford, 1983; Byun *et al*., 2014). 여름철 강우가 발생하지 않았던 시기는 남조류인 *Microcystis*, *Dolichospermum* (=*Anabaena*) 속이 우점 출현했는데, 이는 몬순기 초기 집중강우 이후 유입된 높은 농도의 영양염(N, P)과 수온에 의해 발생된 것으로 판단되며, 최근 북한강 수계에 보고된 식물플랑크톤 출현 특성과 유사한 경향성을 보였다(Byun *et al*., 2014, 2015). 가을철인 9~10월에는 규조류 *Nitzschia*, *Rhizosolenia*, 녹조류 *Kirchneriella*,

Table 1. Dominant phytoplankton species and bacteria class abundance in three serial lakes in Bukhan River system from April to October 2017.

Month	Lake Ui-am		Lake Cheong-pyeong		Lake Pal-dang	
	DPS	Abundance	DPS	Abundance	DPS	Abundance
Phytoplankton		(cells mL^{-1})		(cells mL^{-1})		(cells mL^{-1})
4/10	*Cyc. atomus*	1,240	*Syn. acus*	610	*Cyc. atomus*	1,420
4/24	*Syn. acus*	860	*Syn. delicatassima*	880	*Rhodomonas* sp.	1,060
5/8	*Syn. delicatassima*	1,280	*Syn. delicatassima*	1,610	*Cyc. atomus*	320
5/15	*Rhodomonas* sp.	1,520	*Syn. delicatassima*	1,220	*Rhodomonas* sp.	720
6/8	*Fra. crotonensis*	3,430	*Rhodomonas* sp.	440	*Aul. granulata* var. *angusrissima*	2,200
6/26	*Pan. morum*	9,920	*Fra. crotonensis*	220	*Aul. granulata* var. *angusrissima*	1,040
7/10	*Nitz. palea*	80	*Rhodomonas* sp.	1,420	*Aul. granulata* var. *angusrissima*	580
7/24	*Mic. aeruginosa*	3,280	*Pseudanabaena* sp.	1,800	*Aul. granulata* var. *angusrissima*	460
8/7	*Dol. circinale*	3,915	*Dol. macrosporum*	571	*Rhodomonas* sp.	1,300
8/28	*Nitz. palea*	150	*Syn. acus*	250	*Sce. ecornis*	320
9/11	*Nitz. palea*	190	*Rhodomonas* sp.	320	*Cyc. atomus*	960
9/25	*Kir. obesa*	520	*Rhodomonas* sp.	1,040	*Aul. granulata* var. *angusrissima*	880
10/10	*Rhi. eriensis* var. *morsa*	490	*Rhodomonas* sp.	460	*Rhodomonas* sp.	540
10/24	*Cyc. stelligera*	870	*Rhodomonas* sp.	260	*Cyc. atomus*	4,360
Bacteria		(10^3cells mL^{-1})		(10^3cells mL^{-1})		(10^3cells mL^{-1})
4/10	Actinobactera	471	Betaproteobacteria	113	Actinobactera	150
4/24	Actinobactera	596	Betaproteobacteria	131	Actinobactera	144
5/8	Alphaproteobacteria	256	Actinobactera	126	Actinobactera	148
5/15	Actinobactera	294	Actinobactera	196	Actinobactera	171
6/8	Betaproteobacteria	592	Betaproteobacteria	224	Actinobactera	241
6/26	Actinobactera	634	Actinobactera	303	Actinobactera	390
7/10	Betaproteobacteria	806	Actinobactera	550	Actinobactera	413
7/24	Betaproteobacteria	1,348	Actinobactera	607	Actinobactera	482
8/7	Betaproteobacteria	1,113	Actinobactera	367	Actinobactera	349
8/28	Betaproteobacteria	1,010	Betaproteobacteria	651	Betaproteobacteria	350
9/11	Betaproteobacteria	1,202	Betaproteobacteria	614	Betaproteobacteria	333
9/25	Betaproteobacteria	1,106	Betaproteobacteria	570	Actinobactera	384
10/10	Betaproteobacteria	1,172	Actinobactera	638	Actinobactera	407
10/24	Betaproteobacteria	1,234	Actinobactera	1,085	Actinobactera	445

DPS; dominant phytoplankton species. *Aul*; *Aulacoseira, Cyc*; *Cyclotella*, *Dol*; *Dolichospermum, Fra*; *Fragilaria, Kir*; *Kirchneriella, Mic*; *Microcystis, Nit*; *Nitzschia, Rhi*; *Rhizosolenia*, *Syn*; *Synedra*

은편모조류 *Rhodomonas* 속 등이 우점 출현하였다.

청평호의 식물플랑크톤 현존량은 800~4,020 cells mL^{-1}의 범위로 나타났고, 7월 10일에 가장 높은 현존량을 나타냈으며, 10월 10일에 가장 낮게 나타났다. 시기별 우점종 변화는 봄철인 4~6월에 주로 *Synedra*, *Fragilaria* 속 등의 규조류가 우점 출현했으며, 수온이 상승함에 따라 은편모조류인 *Rhodomonas* 속이 우점 출현하였다. 여름철인 7, 8월은 강우 발생기에 규조류 *Synedra*, 은편모조류 *Rhodomonas* 속이 우점 출현했는데, 7월 10일의 경우 의암호와 다르게 11 mm의 적은 양의 강우가 발생해 *Rhodomonas* sp.가 1,420 cells mL^{-1}의 비교적 높은 현존량으로 출현한 것으로 사료된다. 8월 28일의 경우 의암호와 마찬가지로 1331 CMS의 많은 강우로 인한 희석효과 및 댐 방류에 의한 flushing 효과에 의해 식물플랑크톤 전체 현존량이 낮게 나타났으며, *Synedra acus*가 250 cells mL^{-1}의 낮은 현존량으로 우점 출현했을 것으로 사료된다.

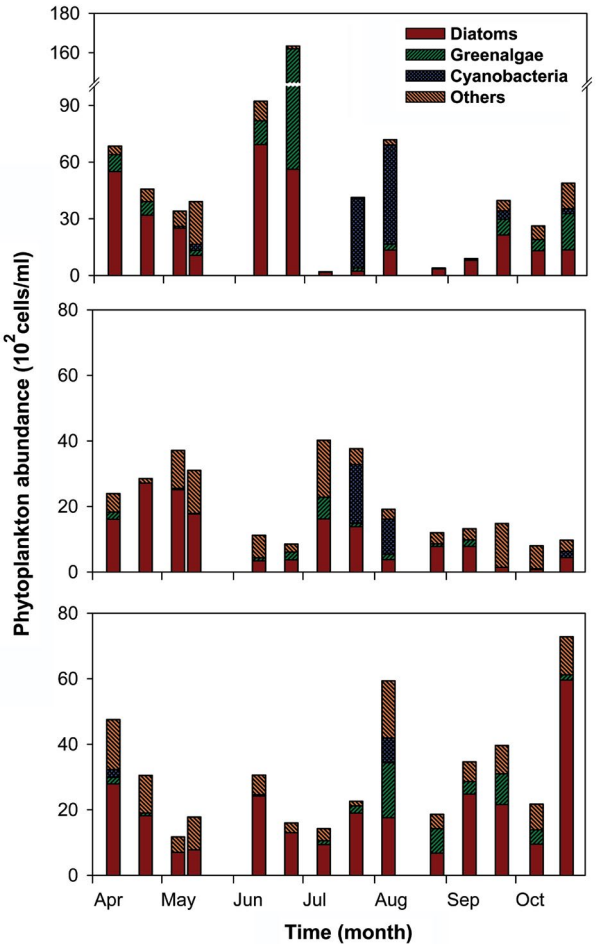

Fig. 4. Monthly fluctuation of relative abundance of phytoplankton in three serial lakes of Bukhan River system from April to October 2017. UA; Lake Uiam, CP; Lake Cheongpyeong, PD; Lake Paldang.

청평호 역시 집중강우 이후 강우가 발생하지 않았을 때 유입된 높은 농도의 영양염(N, P)과 수온에 의해 남조류 *Dolichospermum*, *Pseudanabaena* 속이 우점 출현하였다. 가을철인 9~10월에는 은편모조류 *Rhodomonas* 속이 지속적으로 우점 출현하였다.

팔당호의 식물플랑크톤 현존량은 1,170~7,280 cells mL^{-1}의 범위로 나타났고, 10월 24일에 가장 높은 현존량을 나타냈으며, 5월 8일에 가장 낮게 나타났다. 우점종 변화는 조사기간 동안 규조류 *Cyclotella*, *Aulacoseira*, 은편모조류의 *Rhodomonas* 속이 혼재되어 우점했으며, 수온이 높았던 여름철에 녹조류 *Scenedesmus* 속이 우점 출현하였다. 팔당호 지점의 경우 상류지점인 의암호, 청평호와 우점종 천이가 다르게 나타났는데, 팔당호의 경우 북한강 수계뿐 아니라 남한강 수계와 경안천 등이 유입되어 수체에 많은 영향을 미치며, 북한강 수계에서 유입되는 유량보다 남한강에서 유입되는 유량이 더 크기 때문에 의암호, 청평호 지점과 우점종 천이가 다르게 나타난 것으로 사료된다(Han *et al*., 1995; Kim, 1998; Byun *et al*., 2014; Yoo *et al*., 2018).

3. 미소생물과 이취미 물질의 상관관계

조사기간 동안 북한강 수계에서 발생한 이취미 물질(geosmin, 2-MIB)은 Actinobacteria와 남조류(Cyanobacteria)의 현존량이 높게 출현하였을 때 농도가 높게 검출되었다(Fig. 5). 이취미 물질 중 geosmin의 경우 의암호에서 4월 10일 조사부터 5월 8일 조사까지 각각 31, 29, 20 ng L^{-1}, 10월 24일에 26 ng L^{-1}로 먹는물 수질감시기준 농도인 20 ng L^{-1} 이상의 농도로 나타났으며, Actinobacteria의 현존량이 상대적으로 높게 출현하였을 때 높은 농도로 발생하였다. Actinobacteria는 이취미를 생성한다고 보고되어 있는 분류군으로 Actinobacteria의 현존량이 높게 출현했을 때 geosmin 농도 역시 높게 나타나는 것으로 보아 의암호에서 발생한 geosmin은 Actinobacteria가 원인일 것으로 판단된다(Jiang *et al*., 2007; Zuo *et al*., 2010; Auffret *et al*., 2011). 다른 조사지점인 청평호, 팔당호에서는 8월 7일에 100 ng L^{-1}의 높은 농도로 나타났다. 이와 동일한 시기에 박테리아는 의암호와 마찬가지로 Actinobacteria가 우점 분류군으로 출현하였다. 식물플랑크톤은 남조 *Dolichospermum macrospoum*, *Dolichospermum circinale*가 아우점종으로 출현하였는데, 남조 *Dolichospermum* 속 역시 geosmin을 합성하는 분류군으로 보고되어 있어, 이 시기에 발생한 geosmin은 Actinobacteria와 남조 *Dolichospermum* 속이 원인일 것으로 판단된다(Miwa and Morizane, 1988; Hayes and Burch, 1989; Tsujumura and Okubo, 2003; Wang *et al*., 2005).

이취미 물질 중 2-MIB의 경우 의암호 지점에서 4~9월까지 먹는물 수질감시 기준 농도 미만으로 나타났으며, 10월 10일, 25일 조사 시 각각 68, 110 ng L^{-1}의 높은 농도의 2-MIB가 검출되었다. 이와 동일한 시기에 박테리아 중 이취미 물질을 합성할 수 있는 Actinobacteria가 우점 분류군으로 출현하였으며, 현존량 역시 조사기간 중 가장 높게 나타나 의암호에서 발생한 2-MIB는 Actinobacteria에 기인한 것으로 판단된다(Klausen *et al*., 2005; Koksal *et al*., 2012). 청평호의 경우 7월 10일, 24일, 10월 24일 조사 시 각각 25, 76, 67 ng L^{-1}로 먹는물 수질감시 기준 농도 이상으로 검출되었으며, 같은 시기에 박테리아 중 Actinobacteria가 우점 분류군으로 출현하였다. 7월 24일

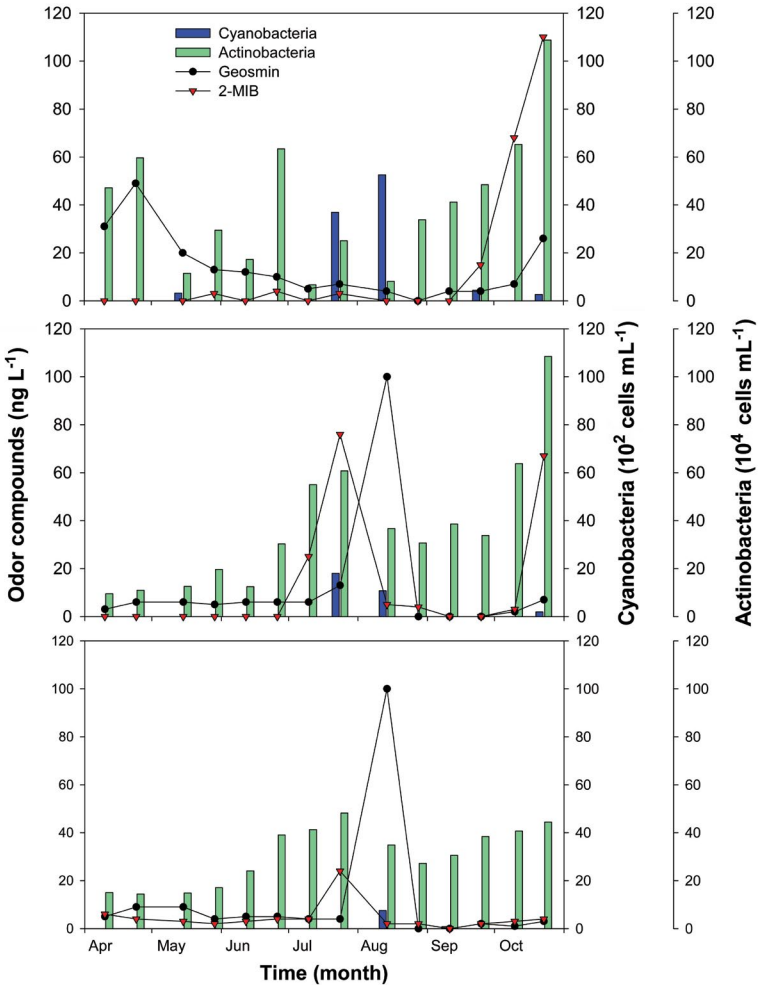

Fig. 5. Monthly fluctuation of relative abundance of Actinobacteria, cyanobacteria and odor compounds in three serial lakes of Bukhan River system from April to October 2017. UA; Lake Uiam, CP; Lake Cheongpyeong, PD; Lake Paldang.

조사의 경우 Actinobacteria 현존량이 7월 10일과 유사하게 나타난 것에 비해 2-MIB 농도가 높게 나타났는데, 이는 동일한 시기에 2-MIB 물질을 합성한다고 보고되어 있는 남조 *Pseudanabaena* sp.가 우점 분류군으로 출현하여, 7월 24일 조사에 2-MIB 농도가 높게 나타났을 것으로 판단된다(Izaguirr *et al*., 1982; Jüttner and Watson, 2007; Kim *et al*., 2015). 팔당호의 경우 7월 24일에 2-MIB 농도가 24로 먹는물 수질감시 기준 농도 이상으로 나타났으며, 같은 시기에 Actinobacteria가 우점 분류군으로 출현해, 팔당호에서 발생한 2-MIB 역시 Actinobacteria에 기인한 것으로 판단된다.

조사기간 동안 북한강 수계에 출현한 박테리아, 남조류와 환경요인 및 이취미 물질 간의 상관성을 알아보기 위해 상관분석을 실시하였다(Table 2). 그 결과 박테리아는 용존산소($r=-0.393$, $p<0.05$)와 음의 상관관계, 용존총질소($r=0.456$, $p<0.01$), 용종총인($r=0.696$, $p<0.01$) 등의 영양염과 양의 상관관계로 나타났으며, 이는 용존영양염을 높은 효율로 이용한다고 보고된 Betaproteobacteria, Alphaproteobacteria 등의 분류군이 높은 비율로 출현함에 따라 용존영양염과 양의 상관관계로 나타난 것으로 판단된다(Niemi *et al*., 2009; Newton *et al*., 2011; Louati *et al*., 2015). 이취미 물질을 합성한다고 보고되어 있는 Actinobacteria는 용존총질소($r=-0.330$, $p<0.05$)와 음의 상관관계, 이취미 물질 중 2-MIB ($r=0.491$, $p<0.01$)와 양의 상관관계로 나타났다. 식물플랑크톤 중 남조류는 이취미 물질인 geosmin ($r=0.381$, $p<0.05$), 2-MIB ($r=0.386$, $p<0.05$)와 양의 상관관계로 나타났으며, 남조 *Pseudanabaena* sp.는 2-MIB ($r=0.416$, $p<0.01$)와 양의

Table 2. Speaman correlation coefficient between biological and physicochemical variable in Bukhan River System from April to October 2017.

	WT	pH	EC	DO	BOD	DTN	DTP	Geosmin	2-MIB
Dol. circinale	0.439**	−0.065	0.058	−0.210	0.052	−0.111	0.008	0.243	−0.020
Dol. flosaquae	0.161	−0.097	0.058	−0.213	−0.039	0.251	0.251	0.097	0.040
Dol. macrosporum	0.264	−0.071	−0.097	−0.007	0.026	−0.226	−0.155	0.259	0.167
Mer. tenuissima	−0.058	0.084	0.135	−0.058	0.187	−0.019	0.084	0.181	0.040
Mic. aeruginosa	0.375*	−0.082	0.144	−0.331*	0.018	0.174	0.249	0.152	−0.089
Pse. limnetica	−0.200	−0.129	−0.148	−0.122	−0.233	−0.206	0.084	0.097	0.234
Pse. sp.	0.051	0.135	0.153	0.058	−0.024	0.079	0.001	0.256	0.416**
T-Cyanobacteria	0.253	0.004	0.190	−0.213	−0.095	0.063	0.192	0.381*	0.386*
Actinobacteria	−0.072	−0.114	−0.237	−0.040	0.204	−0.330*	−0.212	0.217	0.491**
Alphaproteobacteria	−0.346*	0.283	0.209	0.271	0.164	0.358*	−0.003	0.319*	−0.210
Betaproteobacteria	0.126	−0.125	0.210	−0.311*	−0.440**	0.397**	0.490**	−0.350*	−0.047
T-Bacteria	0.288	−0.042	0.288	−0.393*	−0.256	0.456**	0.696**	−0.129	0.163

*p<0.05, **p<0.01. *Dol; Dolichospermum, Mer; Merismopedia, Mic; Microcystis, Pse; Pseanabaena*, T-; Total

상관관계로 나타났다. 이와 같은 결과는 북한강 수계에서 출현하는 *Pseudanabaena* 속이 2-MIB와 높은 양의 상관관계를 가진다는 Byun *et al.*(2015) 결과와 일치한다.

조사기간 동안 발생한 이취미 물질(geosmin, 2-MIB)은 이취미 물질을 생성한다고 알려진 Actinobacteria 및 남조류와 유의한 상관관계를 나타났다. 따라서, 북한강 수계에 발생한 이취미 물질은 Actinobacteria 및 남조류에 의해 발생하는 것으로 사료되며, 남조류가 출현하지 않을 때 발생하는 높은 농도의 이취미 물질은 Actinobacteria가 주요 원인 분류군으로 작용할 수 있음을 시사한다. 하지만, 국내 하천 및 호수에 대한 연구 중 Actinobacteria를 포함한 박테리아 군집에 대한 연구는 미비한 실정으로 추후 박테리아 군집과 다양한 환경요인 및 다른 생물군과의 상호작용 대한 다양한 연구가 필요하다.

적 요

본 연구는 2017년 4월부터 10월까지 북한강 수계 3개의 연속댐(의암호(UA), 청평호(CP), 팔당호(PD))의 미소생물 군집과 이취미 농도와 관계를 알아보기 위해 환경요인, 이취미 물질, 미소생물 군집 등을 조사하였다. 3개 저수지의 박테리아 군집은 주로 Actinobacteria와 Betaproteobacteria가 우점 분류군으로 나타났으며, 계절성은 나타나지 않았다. 식물플랑크톤 군집은 봄철, 규조류 및 은편모조류 여름철 남조류, 가을철 규조류 및 은편모조류 순서로 우점하는 계절성을 보였으며, 북한강 수계에서 출현한 남조류는 *Dolichospermum* spp., *Microcystis aeruginosa*, *Pseudanabaena* spp. 속이 우점 출현하였다. 북한강 수계에 출현한 미소생물 중 이취미 물질을 발생하는 분류군은 Actinobacteria와 남조 *Anabaena*, *Pseudanabaena* 속 등이며, 이취미 물질인 Geosmin과 2-MIB가 높게 나타났을 때, 높은 현존량으로 출현하였다. 미소생물과 이취미 물질의 상관관계는 Actinobacteria의 경우 2-MIB (r=0.491, p<0.01)와 유의한 상관성을 나타냈으며, 남조류의 경우 geosmin (r=0.381, p<0.05), 2-MIB (r=0.386, p<0.05)와 유의한 상관성을 나타냈다. 따라서, 북한강 수계에서 나타나는 이취미 물질은 Actinobacteria 및 남조류의 출현과 직접적인 관계가 있을 것으로 사료되며, 남조류 미출현 시 발생하는 높은 농도의 이취미 물질은 Actinobacteria가 생성하는 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부 국립환경과학원 한강물환경연구소 조사연구사업인 남조류 기원 이취미 발생에 대한 분자생물학적 특성(NIER-2018-01-01-074)의 일환으로 수행되었음.

REFERENCES

Auffret, M., A. Pilote, E. Proulx, D. Proulx, G. Vandenberg and R. 2011. Villemur. Establishment of a real-time PCR method for quantification of geosmin-producing Streptomyces spp. in recirculating aquaculture systems. *Water Research* **45**: 6753-6762.

Bai, L., C. Cao, C. Wang, H. Xu, H. Zhang, V.H. Slaveykova

and H. Jiang. 2017. Toward Quantitative Understanding of the Bioavailability of Dissolved Organic Matter in Freshwater Lke during Cyanobacteria Blooming. *Environmental Science & Technology* **51**: 6018-6026.

Bentley, R. and R. Maganathan. 1981. Geosmin and methylisoborneol biosynthesis in stretomyces; evidence for an isoprenoid pathway and its absence in non-differentiating isolates. *FEBS Letters* **125**: 220-222.

Betnardet, J.F., P. Segers, M. Vancanneyt, F. Berthe, K. Kersters and P. Vandamme. 1996. Cutting a Gordian Knot: Emended Classification and Description of the Genus *Flavobacterium*, Emended Description of the Family *Flavobacteriaceae*, and Proposal of *Flavobacterium hydatis* nom. nov. (Basonym, *Cytophaga aquatilis* Strohl and Tait 1978). *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **46**: 128-148.

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.

Byun, J.H., S.J. Hwang, B.H. Kim, J.R. Park, J.K. Lee and B.J. Lim. 2015. Relationship Between a Dense Population of Cyanobacteria and Odorous Compounds in the North Han River System in 2014 and 2015. *Korean Journal of Ecology and Environment* **48**(4): 263-271.

Gerber, N.N. and H.A. Lechevalier. 1965. Geosmin and earthy-smelling substances isolated from actinomycetes. *Applied Microbiology* **13**: 935-938.

Ha, K.J., K.S. Yun, J.G. Jhun and C.K. Park. 2005. Definition of onset/retreat and intensity of changma during the boreal summer monsoon season. *Journal of the Korean Meteorological Society* **41**(6): 927-942.

Han, M.S., Y.Y. Auh, J.K. Ryu, K.I. Yoo and Y.K. Choi. 1995. Ecological Studies on Pal'tang River-reservoir System in Korea 2. Change in Phytoplankton Community Structure. *Korean Journal of Limnological Society* 28(3); 335-344.

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 and W.D. Taylor 1998. A pseudanabaena Species from Castaic Lake, California, That Produces 2-methylisoborneol. *Water Research* **32**(5):1673-1677.

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.

Jiang, J., X. He and D.E. Cane. 2007. Biosynthesis of the earthy odorant geosmin by a biofunctional Streptomyces coelicolor enzyme. *Nature Chemical Biology* **3**(11): 711-715

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.

Kang, J.Y., J. Chun and R. Rippka. 2013. *Flavobacterium Aciduliphilum* sp. nov., Isolated from Freshwater, and Emended Description of the Genus *Flavobacterium*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* **63**: 1633-1638.

Kim, Y.J. 1996. Ecological Study of Phytoplankton Community and Trophic States Using Indicators in Lake Paltang. *Korean Journal of Limnological Society* **19**(4): 323-345.

Klausen, C., M.H. Nicolaisen, B.W. Strobel, F. Warnecke, J.L. Nielsen and N.O.G. Jørgensen. 2005. Abundance of actinobacteria and production of geosmin and 2-methylisoborneol in Danish streams and fish ponds. *FEMS Micobiol Ecology* **52**: 265-278.

Koksal, M., W.K.W. Chou, D.E. Cane and D.W. Christinason. 2012. Structure of 2-Methylisoborneol synthase from Streptomyces coelicolor and implications for the cyclization of a non-canonical C-methylated monoterpenoid substrate. *Biochemistry* **51**(14): 3011-3020.

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.

Louati, I., N. Pascault, D. Debroas, C. Bernard, J.F. Humbert and J. Leloup. 2015. Structural Diversity of Bacterial Communities Associated with Bloom-Forming Freshwater Cyanobacteria Differs Accoding to the Cyanobacterial Genus. *PLOS ONE* **10**(11): e0140614.

Ministry of Environment (MOE). 2011. Drinking water quality monitoring guideline.

Miwa, M. and K. Morizane. 1988. Effect of Chelating Agents on the Growth of Blue-Green Algae and the Relese of Geosmin. *Water Science and Technology* **20**(8): 197-203.

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.

Niemi, R.M., I. Heiskanen, R. Heine and J. Rapala. 2009. Previously Uncultured β-Proteobacteria Dominate in Biologically Active Granular Activated Carbon (BAC) Filters. *Water Research* **43**: 5075-5086.

Newton, R.J., S.E. Jones, A. Eiler, K.D. McMahon and S. Bertilsson. 2011. A Guide to the Natural History of Freshwater Lake Bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* **75**(1): 14-49.

Park, H.K. and W.H. Jheong. 2003. Long-term changes of algal growth in Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Quailty* **19**(6): 673-684.

Park, H.K., M.S. Byeon, E.K. Kim, H.J. Lee, M.J. Chun and D.I. Jung. 2004. Water Quality and Phytoplankton Distribution

Pattern in Upper Inflow Rivers of Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Quality* **20**(6): 488-498.

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.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.

Parveen, B., J.P. Reveilliez, I. Mary, V. Ravet, G. Bronner, J.F. Mangot, I. Domaizon and D. Debroas. 2011. Diversity and Dynamics of Free-ling and Particle-associated *Betaproteobacteria* and *Actinobacteria* in Relation to Phytoplankton and Zoolpankton Communities. *FEMS Microbiology Ecology* **77**: 461-476.

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.

Saadoun, I.M.K., K.K. Schrader and W.T. Blevins. 2001. Environmental and Nutritionalfactors 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.M., J. Mallevialle and E. Kawczynski. 1995. Advances in Taste-And-Odor Treatment and Control, American Water Works Association Research Foundation in Denver, Colorado, pp. 385.

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.

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.

Zuo, Y., L. Li, T. Zhang, L. Zheng, G. Dai, L. Liu and L. Song. 2010. Contribution of Streptomyces in sediment to earthy odor in the overlying water in Xionghe Reservoir, China. *Water Research* **44**: 6085-6094.