

우리나라 *Pseudanabaena* 속 남조류 종다양성 및 남조류 기원 이취미 물질(2-MIB)의 발생

김건희^{1a} · 박채홍^{1b} · 심연보^{2a} · 김난영^{1c} · 이수곤^{3a} · 장재영^{3b} · 이가림^{3c} · 황순진^{2b,†}

¹건국대학교 상허생명과학대학 Human and Eco-Care 센터 · ²건국대학교상허생명과학대학환경보건과학과 ·
³한국수자원공사한강유역본부한강유역관리처

Pseudanabaena Species Diversity and Off-flavor Material (2-MIB) Production by Cyanobacteria in Korea

Kim Keonhee^{1a} · Park Chaehong^{1b} · Shim Yeonbo^{2a} · Kim Nan-young^{1c} · Lee Soogone^{3a} · Jang Jaeyoung^{3b} ·
Lee Karam^{3c} · Hwang Soon-Jin^{2b,†}

¹Human and Eco-Care Center, Sanghur College of Life Sciences, Konkuk University

²Department of Environmental Health Science, Sanghur College of Life Sciences, Konkuk University

³Department of Hangang River Basin Head Office, River Basin Management, K-Water

(Received 21 April 2021, Revised 12 July 2021, Accepted 20 July 2021)

Abstract

Off-flavor materials (geosmin and 2-methylisoborneol (2-MIB)) produced by microorganisms, such as, cyanobacteria and actinomycetes, cause freshwater use problems worldwide. Due to unpleasant taste and odor, these microorganisms have raised issues especially in drinking water resources. Recently, there has been increasing concern about 2-MIB and causal cyanobacteria, namely, *Pseudanabaena*, in Korea. However, material production and ecological dynamics remain largely unexplored. This study reviewed the distribution of *Pseudanabaena*, its species diversity, and the research trend of molecular ecology related to 2-MIB production in Korea. Based on published literature, we found that seven species of *Pseudanabaena* which include *P. mucicola*, *P. limnetica*, *P. redekei*, *P. catenata*, *P. galeata*, *P. yagii*, and *P. cinerea* appeared to occur in a variety of Korean water systems. All of these *Pseudanabaena* species were found in the North-Han River system (Lakes Soyang, Chuncheon, Uiam, and Paldang). Some of these species were also detected in other watersheds, but the precise species diversity was not identified. Species belonging to the *Pseudanabaena* genus are hard to classify through general microscopic alpha taxonomy, due to their very small cell size and similar morphological characters. Moreover, the potential of 2-MIB production cannot be detected by microscopic observation. Combining molecular ecological techniques, such as, environmental genomic materials (eDNA, eRNA) analyses to conventional methods could be useful to better understand the off-flavor material production and dynamics, thereby providing more efficient management strategies of freshwater systems.

Key words : Cyanobacteria, Environmental genomic materials (eDNA, eRNA), Off-flavor material, *Pseudanabaena*, 2-MIB

^{1a} 연구교수(Academic professor), skyopera@konkuk.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-5725-1447

^{1b} 연구교수(Academic professor), qkrcoghd2@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-1080-0733

^{1c} 연구교수(Academic professor), celeste0@daum.net, https://orcid.org/0000-0001-5949-2095

^{2a} 박사과정(Ph.D. Student), sumatra8865@gmail.com, https://orcid.org/0000-0003-2317-8146

^{3a} 차장(Senior Manager), jesuglory@kwater.or.kr, https://orcid.org/0000-0003-3878-5379

^{3b} 과장(Manager), jjy88@kwater.or.kr, https://orcid.org/0000-0003-2238-5047

^{3c} 대리(Manager), riverly@kwater.or.kr, https://orcid.org/0000-0002-0103-9797

^{2b} Corresponding author, 교수(Professor), sjhwang@konkuk.ac.kr, https://orcid.org/0000-0001-7083-5036

1. Introduction

담수생태계에 서식하는 일부 남조류는 흙 냄새, 곰팡이 냄새 혹은 비릿한 냄새를 유발하는 이취미 물질(Geosmin, 2-MIB)을 생산하며, 이로 인해 상수원 물관리 측면에서 세계적으로 큰 관심의 대상이 되어 왔다(Catarina et al., 2020; Pham et al., 2020; Whangchai et al., 2017). 남조류가 생산하는 2-MIB (2-methylisoborneol)는 세균의 일종인 방선균(*Streptomyces lasaliensis*) NRRL 3382 균주에서 처음 발견되었으며(Komatsu et al., 2008), 담수생태계에서는 *Oscillatoria*, *Planktothrix* (*Planktothricoides*), *Phormidium*, *Pseudanabaena* 과 같은 흔들말목(*Oscillatoriales*) 남조류가 주로 생산하는 것으로 알려져 있다(Jüttner and Watson, 2007). 또 다른 이취미 물질인 Geosmin도 방선균(*Streptomyces griseus*) Lp-16 균주에서 처음 발견되었으며(Gerber and Lechevalier, 1965), *Dolichospermum* (*Anabaena*)와 *Aphanozomenon*와 같은 엽주말목(*Nostocales*) 남조류가 주로 생산한다. 균주에 따라서 흔들말목에 속하는 균주가 Geosmin을 생산하거나 또는 2-MIB와 Geosmin을 모두 생산하기도 하지만, 엽주말목의 균주에 의한 2-MIB 생산 사례는 현재까지 보고된 바 없다(Table 1).

2-MIB와 Geosmin은 휘발성 유기화합물이지만 휘발에 의한 반감기는 매우 느리며, 반면 수중으로 용출되었을 때 생분해로 인한 반감기가 더 빠른 것으로 알려져 있다(Li et al., 2012). 이들은 모두 3차 알코올 구조로 이루어져 있기 때문에 일반적인 정수공정에서 쉽게 산화되지 않는다(Kim et al., 2015). 이러한 이유로 2-MIB와 Geosmin은 일반적인 정수 공정에서 약 20% 정도 밖에 제거되지 않으며 반면, 오존-과산화수소 공정 및 활성탄 공정과 같은 고도처리공정을 적용할 때는 제거효율이 90% 이상으로 나타난다(Song et al., 2015).

이러한 이취미 물질은 불과 1~2 ng/L(ppt)의 초미량의 농도에서도 불쾌한 냄새가 감지될 수 있다(Gagné et al., 1999). 이로 인해 이취미 물질을 합성하는 남조류가 상수원에서 대발생할 경우, 수도물 소비자들의 피해뿐만 아니라 먹는물 시장성에도 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 상수원의 효율적인 관리를 위해 이취미 물질을 합성하는 남조류 균주에 대한 연구는 지속적으로 수행되고 있으며 세계적으로 이취미 물질을 합성하는 새로운 균주가 꾸준히 보고되고 있다(Berglind et al., 1983; Jørgensen et al., 2016; Sun et al., 2013; Watson et al., 2016).

본 논문은 최근 우리나라 특히, 북한강 수계에서 상수원 관리에 어려움을 주고 있는 2-MIB를 생산하는 원인생물로 지목되고 있는 남조류 *Pseudanabaena*에 대하여, 국내 여러 수계에서의 출현 상황과 종의 동정, 그리고 2-MIB 생산과 관련된 선행 연구들을 검토함으로써 상수원을 포함하는 담수생태계 관리에 도움이 되는 정보를 제공하고자 하였다. 또한 정확한 원인종의 탐색과 2-MIB 생산 여부를 조기에 확인하고 예측하기 위해 필요한 연구 방법론의 필요성을 제안하였다.

2. Distribution and Occurrence of *Pseudanabaena* genus in Korea

Pseudanabaena 속 균주들의 국내 출현 현황을 파악하기 위해 물환경정보시스템(water.nier.go.kr)에 존재하는 ‘전국호소 환경조사’ 연구보고서 및 ‘4대강 보구간 모니터링’ 보고서를 검토하였으며, 이 밖에도 논문 및 보고서 검색엔진(riss.kr, scienceon.kisti.re.kr, kiss.kstudy.com)을 사용하여 1900년대부터 2020년대까지 출판된 문헌을 대상으로 검색하였다. 문헌 검색을 위해 7개 키워드 (Keyword: *Pseudanabaena*, 2-MIB, 맛냄새, 이취미, 유해남조류, 녹조, 대발생)를 조합하였으며, 국가생물종 목록 기준의 *Oscillatoria limnetica*로 기록된 문헌까지 포함하여 확인하였다.

2-MIB 발생 원인생물로 지목되고 있는 *Pseudanabaena* 속 균주들은 국내에서 4대강을 중심으로 하천, 저수지, 댐호 등 다양한 수환경에서 출현하고 있는 것으로 파악되었다(Fig. 1). 주요 종들은 과거에는 *Pseudanabaena* sp., *P. limnetica*, *O. limnetica* 등으로 보고되었으나, 2012년 이후부터는 주로 *Pseudanabaena* sp.로 기록되고 있다. 국내에서 *Pseudanabaena* 속의 출현은 1998년 대청호, 광동호, 안동호, 사연호에서 *P. limnetica*로 처음 보고되었으며 (Lee et al., 2002), 2012년 한강 수계에서 이취미 물질 대발생 이후 타 수계에서도 *Pseudanabaena* 속 남조류의 출현 보고가 증가하였다. 4대강 수계 댐호를 중심으로 한 *Pseudanabaena* 분류군의 보고는 주로 한강과 낙동강 수계에서 나타났으며 금강과 영산강 수계가 뒤를 이었다. 섬진강 수계에서는 이취미 물질을 생산하는 남조류의 출현이 상대적으로 적었다.

한강 수계의 경우, 2008년 11월 의암호에서 *P. limnetica* 세포가 발견되었으며, 청평호와 팔당호에서 3월과 12월에 *Pseudanabaena* sp.가 출현한 것으로 보고되었다(HRWEMD, 2008). 2009년에는 한강 수계를 포함하는 주요 댐호들(파로호, 소양호, 청평호, 팔당호, 충주호, 황성호)에서 *Pseudanabaena* sp. 및 *P. limnetica*의 출현이 확인되었다(HRWEMD, 2009). 이후 2010년부터 현재까지 팔당호, 청평호, 의암호, 춘천호에서 매년 *Pseudanabaena* 속 남조류의 출현이 지속적으로 확인되고 있으며, 종명은 대부분 *Pseudanabaena* sp.로 보고되었다(HRWEMD, 2010; 2011; 2012b; 2013b; 2014b; 2015b).

낙동강 수계에서는 2012년 칠곡보에서 *Pseudanabaena* sp.가 우점하였고, 2013년 상주보, 낙단보, 달성보, 합천창녕보, 구미보, 칠곡보, 강정고령보, 창녕함안보에서 6~11월에 걸쳐 *Pseudanabaena* sp.가 우점종 또는 아우점종으로 출현하였으며 낙동강 본류에서도 출현이 확인되었다(NRWEMD, 2013; Park et al., 2015; Yu et al., 2014). 2015년에도 창녕 함안보를 비롯하여 낙동강 보에서 *Pseudanabaena* sp.가 5~10월 사이에 우점 및 아우점하였다(NRWEMD, 2015a; 2015b). 2015년 이후에도 낙동강 수계 전체에서 *Pseudanabaena*는 지속적으로 출현하였다.

금강 수계에서는 1998년 4월 대청호에서 *P. limnetica*가 우점한 이후 *Pseudanabaena* 속 남조류의 출현이 만경강 및 금

Table 1. Cyanobacteria producing odorous substances (geosmin and 2-MIB), listed by current taxonomic names, past synonyms, and primary habitat (Jüttner et al., 2007)

Species	Synonym	habitat	Odorous materials		Strain specific
			Geosmin	2-MIB	
<i>Geitlerinema splendidum</i>	<i>Oscillatoria splendida</i>	BEN	+		
<i>Jaaginema geminatum</i>	<i>Oscillatoria geminata</i>	BEN		+	
<i>Leibleinia subtilis</i>	<i>Lyngbya subtilis</i>	BEN	+		
<i>Lyngbya aestuarii</i>		BEN		+	
<i>Oscillatoria curviceps</i>		BEN		+	
<i>Oscillatoriatenuis var.levis</i>		BEN		+	
<i>Oscillatoria variabilis</i>		BEN		+	
<i>Phormidium allorgei</i>	<i>Lyngbya allorgei</i>	BEN	+		
<i>Phormidium amoenum</i>	<i>Oscillatoria amoena</i>	BEN	+		
<i>Phormidium breve</i>	<i>Oscillatoria brevis</i>	BEN	+	+	○
<i>Phormidium chalybeum</i>	<i>Oscillatoria chalybea</i>	BEN		+	
<i>Phormidium cortianum</i>	<i>Oscillatoria cortiana</i>	BEN	+		
<i>Phormidium favosum</i>		BEN		+	
<i>Phormidium formosum</i>	<i>Oscillatoria formosa</i>	BEN	+		
<i>Phormidium strain LM689</i>		BEN		+	
<i>Phormidium simplissimum</i>	<i>Oscillatoria simplicissima</i>	BEN	+		
<i>Phormidium sp. NIVA51</i>		BEN	+	+	
<i>Phormidium tenue</i>	<i>Oscillatoria tenuis</i>	BEN		+	
<i>Phormidium uncinatum</i>		BEN	+		
<i>Phormidium viscosum</i>		BEN	+		
<i>Planktothrix prolifica</i>	<i>Oscillatoria prolifica</i>	BEN			
<i>Planktothricoides raciborskii</i>		BEN		+	
<i>Planktothrix sp.</i>		BEN	+	+	
<i>Porphyrosiphon martensianus</i>	<i>Lyngbya martensiana</i>	BEN		+	
<i>Tychonema bornetii</i>	<i>Oscillatoria bornetii</i>	BEN	+		○
<i>Tychonema granulatum</i>	<i>Oscillatoria f. granulata</i>	BEN	+	+	
<i>Hyella sp.</i>		EPI		+	
<i>Microcoleus sp.</i>		EPI	+		
<i>Anabaena circinalis</i>		PL	+		
<i>Anabaena circinalis</i>		PL	+		
<i>Anabaena lemmermannii</i>		PL	+		
<i>Anabaena macrospora</i>		PL	+		
<i>Anabaena solitaria</i>		PL	+		
<i>Anabaena viguieri</i>		PL	+		
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>		PL	+		
<i>Aphanizomenon gracile</i>		PL	+		
<i>Oscillatoria limosa</i>		PL		+	
<i>Planktothrix agardhii</i>	<i>Oscillatoria agardhii</i>	PL	+	+	○
<i>Planktothrix cryptovaginata</i>	<i>Lyngbya cryptovaginata</i>	PL		+	
<i>Planktothrix perornata</i>	<i>Oscillatoria perornata</i>	PL		+	
<i>Planktothrix perornata var. attenuata</i>	<i>O. perornata var. attenuata</i>	PL		+	
<i>Pseudanabaena catenata</i>		PL	+	+	
<i>Pseudanabaena limnetica</i>	<i>Oscillatoria limnetica</i>	PL		+	

※ BEN: benthic; PL: planktonic; EPI: epiphytic

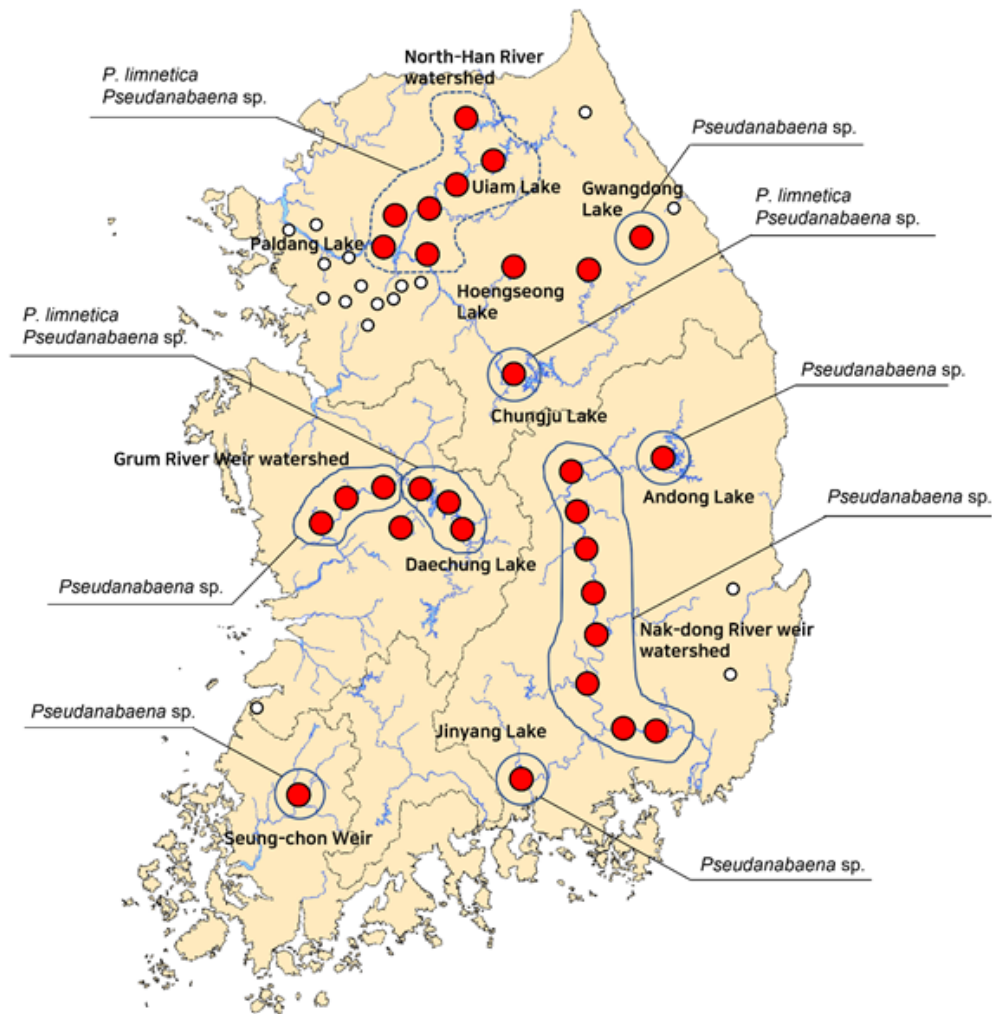


Fig. 1. Distribution of *Pseudanabaena* taxa in Korea based on records reported from 1998 to 2019. White circles indicate reservoir and red circles indicate rivers, large weirs in the mainstream of major rivers and lakes.

강 본류에서 보고되었으며 종명은 *Pseudanabaena* sp.로 기록되었다. 2012년에도 대청호에서 *Pseudanabaena* sp.가 우점하였으며, 2013년 5~11월에는 대청호, 세종보, 공주보, 백제보에서 *Pseudanabaena* sp.의 출현이 확인되었다(Lee, 1999; NIER, 2012).

영산강과 섬진강 수계에서는 *Pseudanabaena* 출현기록이 매우 적었다. 2014년과 2018년 승촌보(YSRWEMD, 2014; 2018)와 남강댐에서 *Pseudanabaena* sp.가 발견되었으며(K-water 2016), 2015년 전북 익산 봉암제 저수지에서 *O. limnetica* 세포가 발견되었다(YSRWEMD, 2014; 2015; 2018).

전국 4대강 본류 외에 여러 지천과 중·소규모 저수지에서도 *Pseudanabaena* 속 남조류가 출현하였다. 1998년 가을철에 광동호(강원도 삼척시 하장면)에서 *P. limnetica*가 우점종으로 출현하였으며, 2004~2005년 경기도 수원시에 분포하는 일월저수지, 일왕저수지, 서호, 원천리천, 황구지천, 2007년 충북 괴산의 인천강(주진천), 2008년 강원 강릉시 연곡천에서 *Pseudanabaena* sp. 또는 *O. limnetica* 세포가 발견되었다(Kim and Lee, 2011; Lee et al., 2008; Park et al., 2006). 또한 경기도 소재 일부 저수지(기흥지, 물왕지, 왕송지, 떡우지, 덕우지,

금광지, 동방지)에서 *Pseudanabaena* sp. 및 *P. limnetica*가 2018년 3~10월 기간에 출현하였다(GIHE, 2019).

3. Diversity of *Pseudanabaena* genus in Korea

최근까지 국내에서 발견된 대부분의 *Pseudanabaena* 속 남조류는 종의 동정이 정확하게 이루어지지 않았다. 즉, 출현한 *Pseudanabaena* 속 남조류들이 종수준까지 확인되지 못하고 대부분 'sp.'(species)로 보고되었다. 그간 여러 호소나 4대강 본류구간에 대한 조사에서도 *P. limnetica* 이외의 *Pseudanabaena* 속 남조류 종들은 보고서나 논문 등의 결과물에서 거의 거론된 적이 없었다. 이러한 결과에 기초할 때, 과거에 전국적으로 출현한 *Pseudanabaena* sp.가 모두 동일종이었던지에 대해서는 확인할 수는 없다.

남조류 *Microcystis* 세포를 둘러싸고 있는 점액성 물질(Sheath)에 부착하여 생활하는 *P. mucicola*는 생활특성이 명확하여 다른 *Pseudanabaena* 속의 다른 종들과 구분할 수 있으나, 이는 *P. mucicola*와 *Microcystis*가 함께 발견되었을 때

에만 가능하다. *P. mucicola*가 *Microcystis*의 점액질에서 분리된 상태로 발견되었을 때에는 다른 *Pseudanabaena* 속 남조류 종들과 형태적으로 구분하기가 어렵다. 더욱이 *P. galeata*, *P. limnetica*, *P. catenata* 등은 세포의 형태가 매우 유사하기 때문에(Fig. 2), 현장시료에서 현미경으로 종을 명확하게 동정하기는 매우 어렵다.

*P. galeata*를 비롯한 *Pseudanabaena* 속의 5개종은 모두 10개 이상의 단일세포가 연결되어 실모양의 긴 형태로 나타나며, 단일세포 사이에는 격벽(Cross wall)이 존재하며 협입되어 있다. *P. galeata* 단일세포의 평균크기는 2.5 mm(너비) × 5.8 mm(길이)이며 *P. yagii*와 *P. cinerea* 단일세포의 평균크기는 각각 1.5 mm(너비) × 2.7 mm와 2.2 mm(너비) × 4.3 mm(길이)로 3개 *Pseudanabaena* 종 사이의 세포 크기 차이는 0.5~2.5 mm로 매우 작기 때문에 *Pseudanabaena* 속의 종들을 현미경 하에서 명확히 동정하는 것은 매우 어렵다. 더욱이 북한강 수역에서 분리한 *P. yagii*와 *P. cinerea*의 단일세포 형태는 원통형으로 세포 폭이 길이보다 길고 너비(폭):길이의 비율이 최소 1.4배에서 최대 3.4배로 *P. galeata*와 매우 유사하였다(Table 2). 이외에도 *P. minima*와 *P. limnetica* 단일세포의 평균 크기는 각각 1.7~2.5 mm(너비) × 2.0~4.2 mm(길이)와 1.3~2.6 mm(너비) × 1.6~9.4 mm(길이)이며 이에 따른 세포의 너비와 길이 비율 또한 *P. minima*가 1.0~2.0, *P. limnetica*가 1.0~6.8로 세포의 길이 차이가 매우 큰 것으로 나타났다(Yu et al., 2015). 하지만 *Pseudanabaena* 속 남조류 단일세포의 형태와 크기는 성장환경에 따라서 다르게 나타나기

때문에 광학현미경의 증·고배율(200~400배)에서 *Pseudanabaena* 속 남조류를 구분하는 것은 매우 어렵다. 더욱이 *P. minima*와 *P. limnetica*의 세포 크기는 세포성장 단계에 따라서 *P. galeata*, *P. cinerea*, *P. yagii* 세포 크기와 매우 유사하며 실제 단일세포의 크기 차이는 3.0 mm보다 작다.

북한강 수계에서 2014년 가을부터 *P. limnetica*가 우점종으로 출현하였고 이와 함께 2-MIB의 농도도 증가하였다(Choi, 2017). 이로 인해 *P. limnetica*와 2-MIB의 연관성이 주목을 받았다(HRWEMD, 2012a; 2013a; 2014a; 2015a). 그 이전에는 염주말목 남조류인 *Dolichospermum circinale*(이전 명칭 *Anabaena circinalis*)가 가장 우점하였으며 특히, 2011년 11월부터 2013년 여름까지 이 종이 Geosmin 문제를 크게 야기하였다. *D. circinale*의 밀도는 2013년 태풍을 기점으로 급격히 감소하였다.

2014년 말부터 북한강 수계에서 우점하는 *Pseudanabaena* 속 남조류는 종 수준까지 정확히 동정되지 않았으며 *Pseudanabaena* sp. 혹은 *P. limnetica*로 주로 보고되었다. 이는 보고된 *Pseudanabaena* 종들 간의 형태학적 유사성으로 인해 현미경 상으로는 정확한 종 동정이 어려워 대부분 *Pseudanabaena* sp.로 기록된 것으로 판단된다(Fig. 2). 이와 마찬가지로, 2016년에 낙동강 수계의 남강댐에서도 *Pseudanabaena* 속 남조류와 2-MIB 간의 상관관계에 대하여 언급되었으나, 해당 종은 *Pseudanabaena* sp.로 보고되었을 뿐 정확한 종명이 제시되지 않았다(K-water, 2016). 또한 최근 북한강 수계에서는 *Pseudanabaena* 세포를 현장으로부터 분리

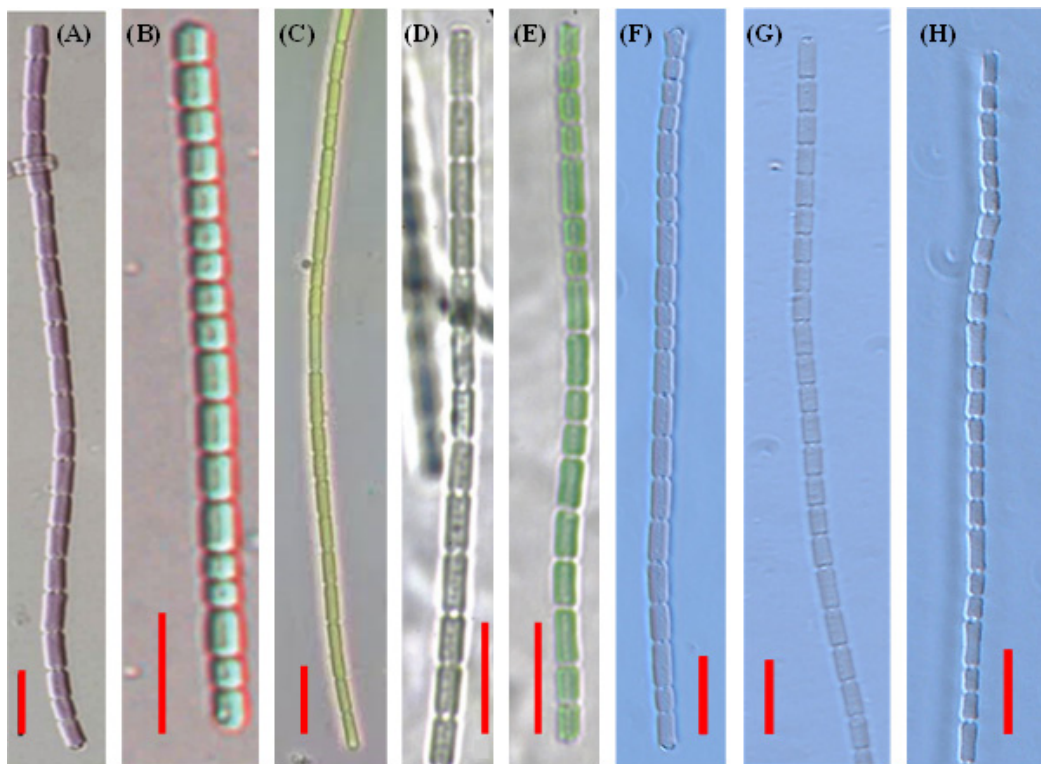


Fig. 2. Photos of *Pseudanabaena* strains; (A) *P. galeata*, (B) *P. minima*, (C) *P. limnetica*, (D) *P. cinerea*, (E) *P. yagii* (referred from Tuji and Niiyama (2018); Yu et al. (2015)), (F) *P. galeata*, (G) *P. cinerea*, (H) *P. yagii* strains isolated from the North Han River (Kim et al., 2020a). Scale bars indicate 10 μ m.

Table 2. Comparison of the morphological characteristics of *Pseudanabaena* strains isolated from the North-Han River system (Kim et al., 2020b)

	<i>Pseudanabaena mucicola</i>	<i>Pseudanabaena redekei</i>	<i>Pseudanabaena galeata</i>	<i>Pseudanabaena cienrea</i>	<i>Pseudanabaena yagii</i>	<i>Pseudanabaena catenata</i>
Cell shape	Cylindrical	Cylindrical, Straight or slight flexuous	Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical	Cylindrical
Ratio of width to length	1.6 ~ 3.0	2.0 ~ 2.5	1.9 ~ 2.8	1.7 ~ 2.3	1.4 ~ 3.4	0.9 ~ 1.9
No. of cells in a trichome	3 ~ 7 cells	12 ~ 20 cells	10 ~ 15 cells	10 ~ 11 cells	10 ~ 15 cells	8 ~ 15 cells
Cell size (μm) (width × length)	1.4 (±0.3) × 2.4 (±0.7)	2.8 (±0.1) × 4.5 (±0.6)	2.5 (±0.1) × 5.8 (±0.1)	2.2 (±0.1) × 4.3 (±0.2)	1.5 (±0.1) × 2.7 (±0.8)	1.63 (±0.02) × 2.67 (±0.44)
Apical cell size (μm) (width × length)	1.3 (±0.1) × 4.1 (±1.1)	2.5 (±0.2) × 4.1 (±0.4)	2.4 (±0.1) × 5.7 (±0.3)	1.9 (±0.2) × 3.9 (±0.2)	1.6 (±0.0) × 3.2 (±0.2)	1.62 (±0.02) × 3.21 (±0.30)

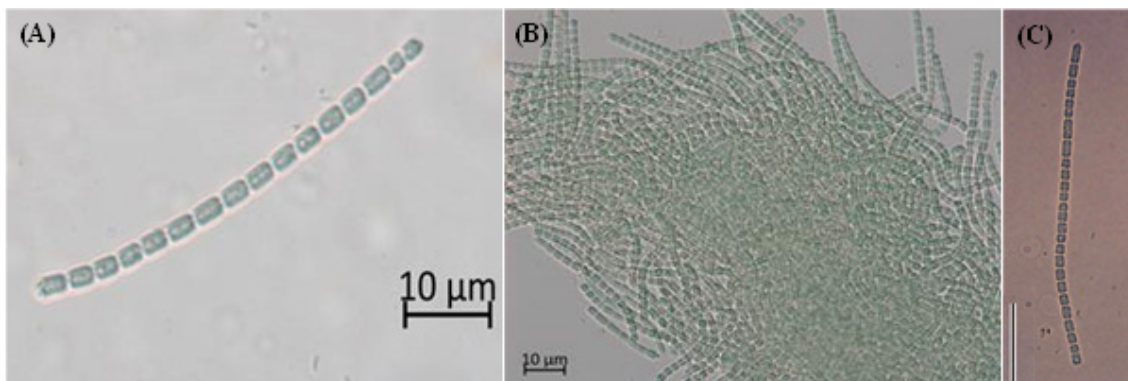
배양하여 확인하였음에도 불구하고 종명이 *Pseudanabaena* sp.로 기록된 사례도 있었다(Byeon et al., 2018).

2018년 가을 북한강 수계(청평호, 삼봉리, 팔당호)에서 100 ng/L 이상의 고농도 2-MIB가 검출되었으며 팔당취수장에서도 최대 168 ng/L가 검출되어 취수장 맛냄새 물질 관측 이래 최고치를 기록하였다(Byeon et al., 2018; HRWEMD, 2020). Jeong et al. (2020b)은 이 시기에 북한강하류 지역의 정수장에서 *Pseudanabaena* sp.의 세포를 분리하여 형태적 수준에서 뿐만 아니라 16S rDNA 유전자 염기서열을 기반으로 한 분자계통학 수준에서 종을 분석하였다. 그 결과, 이 종은 국내에서 보고된 적이 없었던 *P. yagii*로 동정되었으며, 이는 과거 낙동강에서 *P. limnetica*로 동정된 세포(NRWERC, 2000)와 형태적으로 동일하였다(Fig. 3). 이때 분리된 *P. yagii* 세포에서 2-MIB가 검출되었으며, 이를 통해 이 시기의 2-MIB 발생 원인생물이 *P. yagii*로 추정하였다(Jeong et al., 2020a). 또한 북한강 수계에서 2-MIB를 생산하는 *Pseudanabaena* 균주는 *P. yagii* 외에도 *P. cinerea*와 *P. galeata*가 존재하는 것으로 확인되었다(Kim et al., 2020a). 이 밖에도 *P. redekei* (*Limnothrix redekei*)와 *P. cinerea*는 2-MIB를 합성하는 균주와 합성하지 않는 균주가 모두 존재하는 것이 밝혀졌으며, *P. mucicola*와 *P. catenata*는 2-MIB를 생산하지 않는 균주로

확인되었다(Kim et al., 2020a). 이러한 연구결과는 북한강 수계에서 발생하는 *Pseudanabaena* 속에는 여러 종들이 존재하며, 이들이 수중의 2-MIB 발생 거동에 복합적으로 영향을 미친다는 것을 시사한다(HRWEMD, 2019; 2020).

*P. yagii*와 *P. cinerea*는 *P. galeata*로부터 2018년에 새롭게 명명된 종으로써, 두 종 모두 2-MIB 합성 유전자(mibC gene)를 보유한다(Tuji and Yuko, 2018). 16S rDNA, rbcL 유전자 및 2-MIB 합성 유전자 염기서열을 계통학적으로 분석하였을 때, 이들은 이제까지 국내에서 주로 보고되었던 *P. limnetica*와 서로 다른 계통으로 분리되었다(Fig. 4)(Jeong et al., 2020b; Shizuka et al., 2020).

2-MIB를 합성하는 *P. yagii*와 *P. cinerea*는 2020년 국내에서 처음 보고되었다(Jeong et al., 2020a; Jeong et al., 2020b). 이 두 종으로 분리, 명명되기 이전의 종명인 *P. galeata*의 출현에 대해서는 현재까지 국내에서 기록된 바가 없기 때문에, 2-MIB를 합성하는 *P. yagii*와 *P. cinerea*의 과거 분포를 확인할 수는 없다. 더욱이 2-MIB 합성 여부를 세포의 형태적 기준으로는 판단할 수 없기 때문에, 현미경 수준에서 파악된 *Pseudanabaena*에 대한 정보로부터 2-MIB를 합성하는 *P. yagii*와 *P. cinerea*의 분포를 판단하기는 불가능하다. 다만 현장에서의 2-MIB 농도와 *Pseudanabaena* 분포 간의 통계적 상

**Fig. 3.** *Pseudanabaena yagii* GIHE-NHR1 strain (A, B) isolated downstream of the North Han River, 2018 (Jeong et al., 2020a). (C) Photo of *P. limnetica* occurring in the Nakdong River (NRWERC 2000).

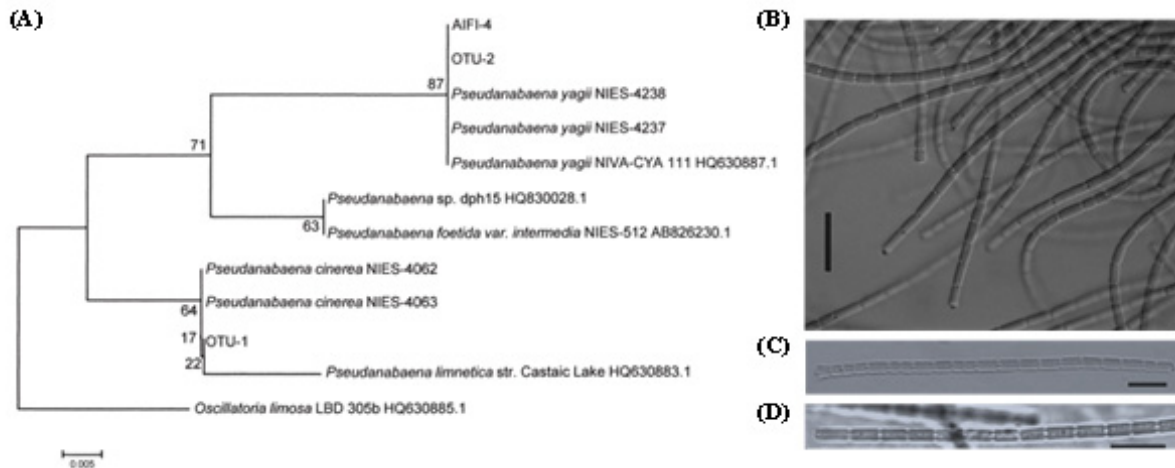


Fig. 4. (A) Neighbor-Joining (NJ) tree based on the amino acid sequences of MIB cyclase gene of *P. yagii* and *P. cinerea*. Numbers of branches are bootstrap values (Shizuka et al., 2020). (B) Microscopic photos of *P. limnetica* isolated from Castaic Lake in USA (Izaguirre et al., 1998). Bar = 10 μ m. (C) *P. cinerea* isolated from the North Han River in Korea (Kim et al., 2020a), (D) *P. cinerea* isolated in Japan (Tuji et al., 2018).

관성으로부터 가능성을 추정할 수는 있을 것이다. 예를 들면 2017년 북한강 수계 3개 댐(팔당댐, 청평댐, 의암댐)에서 출현한 *P. limnetica* 세포의 밀도는 2-MIB 농도와 통계적 상관성이 유의하지 않았다. 하지만 *Pseudanabaena* sp.로 동정된 세포의 밀도는 2-MIB 농도와 매우 유의한($p < 0.01$) 상관관계를 보여주었다(Table 3) (Byun et al., 2018). 이 결과를 기초로 할 때, 2017년에 출현한 *Pseudanabaena* sp.는 *P. yagii* 혹은 *P. cinerea*일 가능성이 있으며, 따라서 *P. yagii*와 *P. cinerea*는 이전에도 북한강 수계에서 존재하였을 것으로 추정된다.

본 연구에서 검토한 결과에 기초할 때, 현재까지 국내에서 출현하는 *Pseudanabaena* 속에 포함된 남조류는 총 7종으로써 *P. mucicola*, *P. limnetica*, *P. redekei*, *P. catenata*, *P.*

galeata, *P. yagii*, *P. cinerea*를 포함한다. 이들 중 대부분은 세포의 크기가 작고 모양이 유사하여 형태학적 특성에 의존하는 현미경적 알파분류법으로는 정확한 분류와 동정이 어려우므로 유전자를 이용한 계통분류적 연구의 필요성이 크다.

4. Molecular Ecological Research of Odor Materials by Cyanobacteria

남조류에 의한 이취미 물질의 생합성은 그와 관련된 유전자의 존재 여부와 그 종류에 따라서 결정된다(Boopathi and Ki, 2014; Moustafa et al., 2009; Vaitomaa et al., 2003; Vezie et al., 1998). 이취미 물질의 생산은 종(species) 수준에서만 아

Table 3. Spearman correlation coefficients among biological and physico-chemical variables of geosmin and 2-MIB from the North Han River System from April to October 2017 (Byun et al., 2018)

	WT	pH	EC	DO	BOD	DTN	DTP	Geosmin	2-MIB
<i>Dol. circinal</i>	0.439**	-0.065	0.058	-0.210	0.052	-0.111	0.008	0.243	-0.020
<i>Dol. flosaquae</i>	0.161	-0.097	0.058	-0.213	-0.039	0.251	0.251	0.097	0.040
<i>Dol. macrosporum</i>	0.264	-0.071	-0.097	-0.007	0.026	0.226	-0.155	0.259	0.167
<i>Mer. temissima</i>	-0.058	0.084	0.135	-0.058	0.187	0.019	0.084	0.181	0.040
<i>Mic. aeruginosa</i>	0.375*	-0.082	0.144	-0.331*	0.018	0.174	0.249	0.152	-0.089
<i>Pse. limnetica</i>	-0.200	-0.129	-0.148	-0.122	-0.233	-0.206	0.084	0.097	0.234
<i>Pse. sp.</i>	0.051	0.135	0.153	0.058	-0.034	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
Betaprobacteria	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

* $p < 0.05$, ** $p < 0.001$, Dol: Dolichospermum, Mer: Merismopedia, Mic: Microcystis, Pse: Pseudanabaena, T-: Total, WT: Water temperature, EC: Electric conductivity, DO: Dissolved oxygen, BOD: Biological oxygen demand, DTN: Dissolved total nitrogen, DTP: Dissolved total phosphate.

나라 동일한 종에 속하는 균주(strain) 수준에서도 차이가 있을 수 있기 때문에, 동일한 종 일지라도 이취미 물질의 생산 종과 비생산종으로 구분될 수 있다(Boopathi and Ki, 2014; Jüttner and Watson, 2007; Moustafa et al., 2009). 하지만 세포의 외관상으로 남조류 세포의 이취미 물질의 합성 여부를 확인하는 것은 불가능하며, 이러한 문제를 해결하고자 남조류의 이취미 물질 생합성 유전자에 대한 다양한 분자생태학적 연구가 진행되어 왔다(Komatsu et al., 2008; Wang et al., 2019; Wang et al., 2011).

2000년대에 들어와 생물기원 이취미 물질의 분자생태학적 연구는 주로 남조류의 이취미 물질 합성 유전자 구조(genotype)를 분석하여 분류군 사이의 이취미 물질 생합성 유전자 염기서열의 차이와 염기서열 계통구조를 확인하였다(Komatsu et al., 2008; Niiyama and Tuji, 2019; Niiyama et al., 2016; Tokuko et al., 2014; Zuo et al., 2009). 하지만 2010년대에 들어오면서 Real-time PCR(Quantification PCR: qPCR)을 이용한 남조류 기원 이취미 물질의 발생과 분포에 대한 연구가 주로 수행되었으며, 이와 함께 수생태계에 존재하는 환경유전자

(environmental DNA and RNA: eDNA, eRNA)를 이용하기 시작하였다(Chiu et al., 2016; Kim et al., 2013; Ludwig et al., 2007; Martins and Vasconcelos, 2011; Tsao et al., 2014; Wu and Duirk, 2013). 환경유전자는 세포에서 직접 분리된 유전자가 아니라 외부 환경에 존재하는 유전자들을 의미하는 것으로서 세포내(Intracellular) 형태와 세포외(Extracellular) 형태로 존재한다. 수환경 내에 존재하는 환경유전자로부터 남조류의 이취미 물질 합성 유전자를 확인한다면, 세포를 분리하지 않고도 수환경에 존재하는 이취미 물질 합성 남조류의 발생 상황을 파악할 수 있다(Taberlet et al., 2018; Thomsen and Willerslev, 2015; Yoccoz, 2012). 또한 이러한 결과를 바탕으로 수층에서 이취미 물질을 합성할 수 있는(혹은 합성하고 있는) 남조류의 분포를 추적할 수 있다(Barnes and Turner, 2016). 최근 중국과 북미에서 이취미 물질 합성 유전자를 정량할 수 있는 유전자 primer에 대한 연구가 진행되었다. 특히, 중국과 대만에서 대발생하는 Geosmin 합성 남조류의 발생과 분포를 모니터링하기 위해 Real-time PCR 전용 primer가 현장에 적용되었다(Chiu et al., 2016; Tsao et al., 2014; Wang

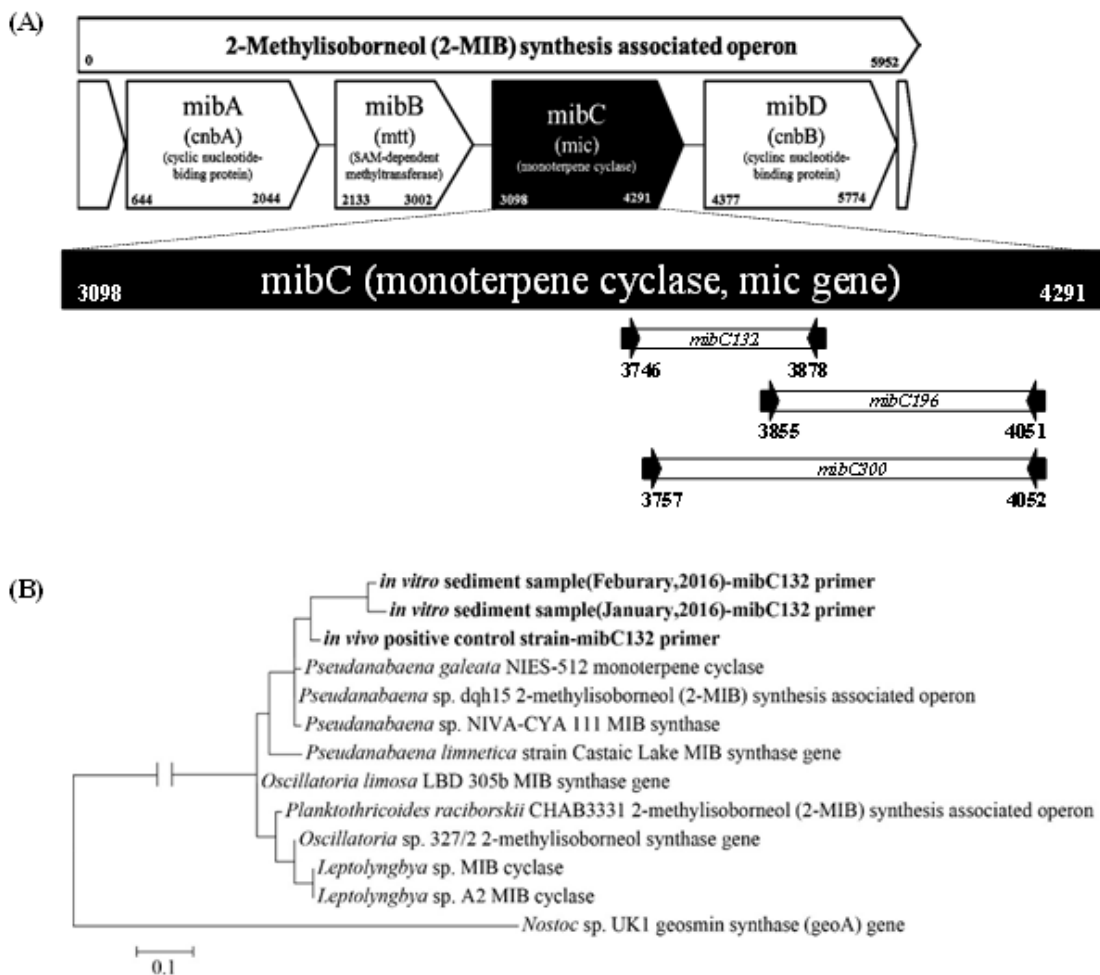


Fig. 5. (A) The diagram of 2-methylisoborneol (2-MIB) synthesis-associated operon and the positions of designed primers on *mibC* (Kim 2018). (B) Result of phylogenetic tree analysis of PCR product in the North Han River (Kim et al., 2020b). The *mibC* gene sampled from the sediment of Kong-ji stream was phylogenetically monophyly with *Pseudanabaena* sp. and paraphyly with *mibC* gene of *P. limnetica*.

et al., 2016). 국내에서도 최근 남조류의 2-MIB 합성 유전자를 정량적으로 분석하기 위한 primer가 개발되었으며(Fig. 5), 이를 이용하여 북한강 수계에서 발생하는 2-MIB 합성 남조류의 발생 및 분포를 파악한 바 있다(HRWEMD, 2019; 2020; Kim et al., 2020b).

차세대염기서열(Next Generation Sequence: NGS) 분석 방법이 등장하면서 이취미 물질을 합성하는 미생물뿐만 아니라 매우 적은 밀도로 나타나는 희소종(rare species)에 대해서도 그 잠재성을 분석할 수 있게 되었으며, 이를 통해 생물기원 이취미 물질 발생에 대하여 보다 세밀한 원인종 분석이 가능해졌다(Boopathi and Wang, 2018; Hotto et al., 2007; Hur et al., 2013; Muñoz-Martín et al., 2020; Otten et al., 2016). 현재까지 NGS를 활용한 연구는 주로 일본에서 수행되었으며(Shizuka et al., 2020), *Pseudanabaena* 속 남조류의 2-MIB 합성 유전자를 NGS-miseq 방법으로 분석하여 원인종을 파악하였다. 국내에서도 *mibC* 유전자를 NGS-miseq 법을 이용하여 북한강 수역에서 2-MIB를 합성하는 *P. yagii*와 *P. cinerea*의 존재가 확인되었으며 낮은 밀도로 존재하는 *Planktothricoides raciborskii*의 2-MIB 생합성 잠재성도 확인되었다(HRWEMD, 2020; Kim et al., 2020a).

세계적인 공공 염기서열 데이터베이스인 Genbank는 생물의 염기서열 데이터를 축적하여 제공하고 있으며, Genbank 내에는 2-MIB와 Geosmin과 같은 이취미 물질을 합성하는 생물들의 생합성 유전자 염기서열 정보가 100개 이상 존재한다(Sayers et al., 2020). 이취미 물질 생합성 유전자의 전체와 부분 염기서열 정보가 모두 존재하며, 부분 염기서열은 주로 300~5,000 bp 크기로 나타난다. 뿐만 아니라 8,000,000 bp 크기의 이취미 물질을 합성하는 생물(*P. yagii*, *Pseudanabaena*

sp. Dph15)들의 전체유전자(Complete genome) 염기서열 정보에 이취미 물질 생합성 유전자 구간이 포함되어 있는 경우도 존재한다(Sayers et al., 2020).

남조류의 2-MIB 생합성 유전자인 *mibC*(2-MIB synthase gene) 유전자를 Genbank에서 검색하면 22개의 염기서열 정보를 찾을 수 있다(Sayers et al., 2020; Schoch et al., 2020). *Pseudanabaena*, *Oscillatoria*, *Planktothrix*, *Planktothricoides*와 같은 남조류의 유전자 정보가 주로 존재하며, 이러한 남조류의 2-MIB 생합성 유전자 염기서열은 방선균의 2-MIB 생합성 유전자와 서로 다른 계통으로 구분된다(Fig. 6). 남조류의 2-MIB 생합성 유전자 염기서열을 탐색할 수 있는 유전자 primer에 대해서는 주로 중국과 일본, 북미에서 연구가 진행되었으며, 이로 인해 이들 국가에서 발생하는 남조류의 2-MIB 생합성 유전자 염기서열 정보가 Genbank에서 많은 비율을 차지하고 있다(Chiu et al., 2016; Kim et al., 2020a; Wang et al., 2015). 중국과 일본에서는 주로 *Pseudanabaena*와 *Planktothricoides*를 비롯하여 *Lynghya*(*Leptolynghya*)에서 2-MIB 생합성 유전자 염기서열의 계통을 분석하였으며, 북미에서는 *Oscillatoria*의 2-MIB 생합성 유전자 염기서열을 분석하여 분류군 사이의 계통차이를 분석하였다(Giglio et al., 2011; Izaguirre and Taylor, 2004; Niiyama et al., 2016; Tawong, 2017; Te et al., 2017; Zhang et al., 2016).

한편, Genbank에서 남조류의 Geosmin 생합성 유전자(*geoA*, *gys1*) 염기서열을 검색하였을 때 26개의 염기서열을 확인할 수 있다(Sayers et al., 2020; Schoch et al., 2020). 주로 *Anabaena ucrinica*와 *Dolichospermum circinale*(이전 명 *Anabaena circinalis*)를 비롯하여 *Aphanizomenon*, *Nostoc*, *Leptolynghya*, *Oscillatoria*, *Planktothrix* 등의 Geosmin 생합



Fig. 6. Phylogenetic tree based on 2-MIB synthase gene (*mibC* gene) nucleotide sequence (Kim, 2018). Each phylogenetic tree branch calculated by Neighbor-Joining (NJ) method.

성 유전자 염기서열이 존재한다(Fig. 7). Geosmin을 합성하는 남조류가 2-MIB를 합성하는 남조류보다 더 다양하며, 중국과 일본뿐만 아니라 동남아 지역에서도 Geosmin을 합성하는 남조류가 출현하였다(Jüttner and Watson, 2007; Zhao, 2012).

5. Status in Odor Material Occurrence and Research Trend in Korea Watershed

국내에서는 1980년 이후로 다양한 수계, 특히 상수원으로 이용하는 하천과 호수의 물에서 곰팡이 냄새를 유발시키는 이취미 문제가 발생하고 있다. 광주시의 상수원으로 이용하는 동북호에서 1980년에 이취미 문제가 발생한 이후, 1991년부터 봄과 여름에 지속적으로 이취미 발생이 보고되었다(Jin et al., 1998). 대전광역시를 비롯한 충청 지역의 주요 상수원인 대청호에서도 1986년 이래로 이취미 발생에 따른 문제가 제기되었으며, 이취미 발생의 주요 원인이 남조류인 것으로 확

인되었다(Uk et al., 1996). 서울시의 구의정수장에서도 1994~1995년에 이취미가 발생한 사례가 있었다(IHES, 2014).

1990년대에 들어오면서 전국적으로 남조류의 대발생에 대한 관심이 높아졌으며 국내 주요 상수원에서 조류 및 이취미 발생에 대한 연구가 본격화되었다(Bae et al., 1999; Baik, 2000; Cho, 1996; Jin et al., 1998; Jun et al., 1994; Uk et al., 1996). 2000년대 들어와서는 수도권 지역의 상수원인 팔당호에서 이취미 물질과 수질, 기상, 수리, 수문, 남조류의 상호 관련성에 대하여 다양한 연구가 진행되었다(Byun et al., 2014; Byun et al., 2018; Kim et al., 2006; Kim et al., 2014; Lee and Choi 2012; Oh et al., 2005). Oh et al. (2005)은 1999년부터 2004년까지 한강 원수에서 이취미 물질 농도는 남조류 밀도와 높은 상관성을 보이며, 남조류가 대량 발생하는 여름철을 제외하고 한강 원수의 pH와 유의한 상관성을 갖는다고 보고하였다. pH의 상승은 남조류의 광합성에 의해 나타난 결과로써 이취미 물질과는 간접적인 관계로 판단된다. Kim et al. (2006)은 여름철 호수에서 남조류 군집 구성(*Microcystis*, *Anabaena*,

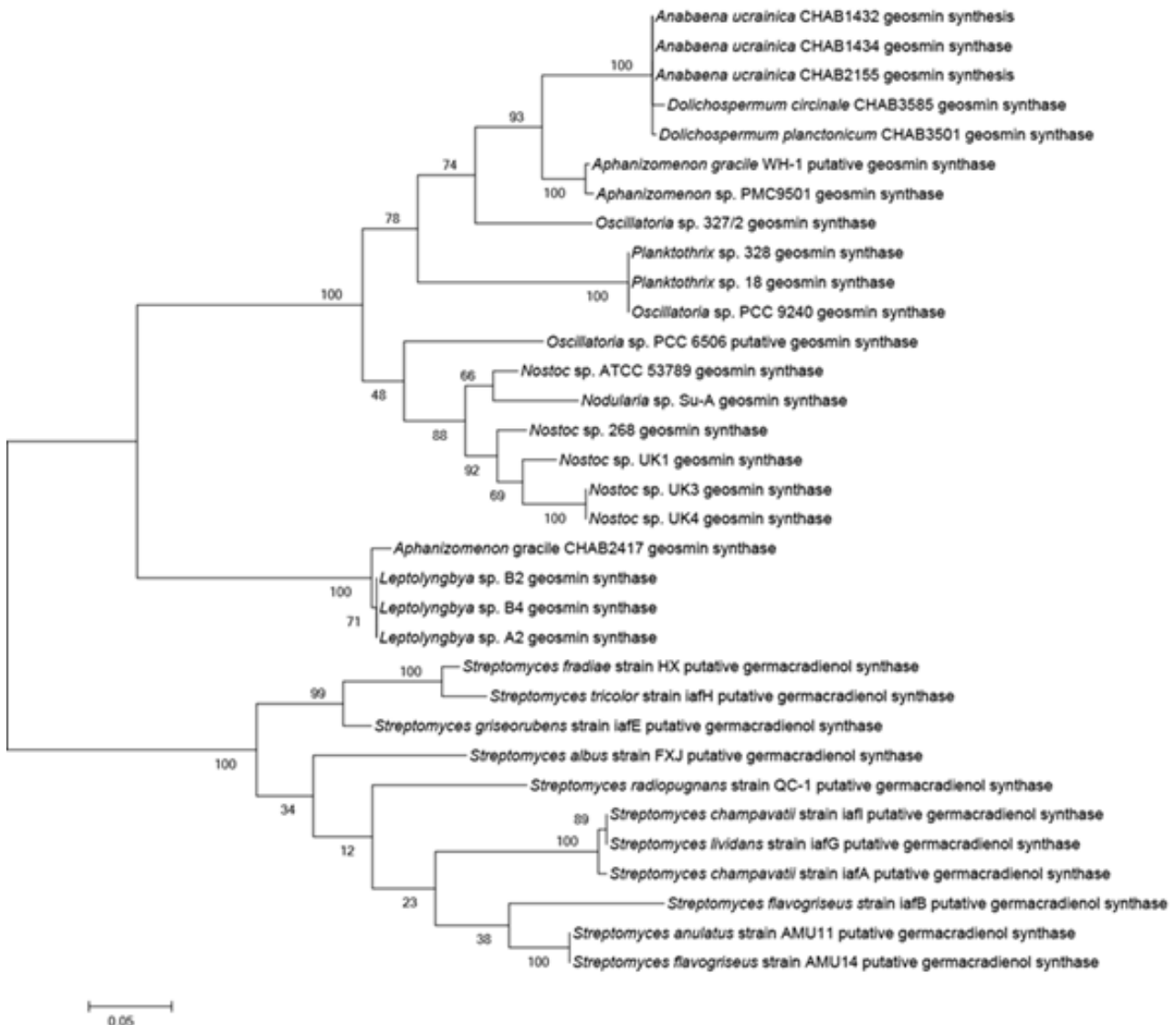


Fig. 7. Diversity of geosmin producing gene nucleotide sequence between cyanobacteria and streptomyces taxa (Kim, 2018).

Aphanizomenon, *Pseudanabaena*)에 따라서 서로 다른 이취미 물질(2-MIB와 Geosmin)의 발생을 보고하였으며, 2-MIB의 발생은 *Pseudanabaena* 군집의 발생과 상관성이 높았다. 이외에도, Lee et al. (2009)은 세포 내에 존재하는 Geosmin 농도와 세포로부터 배출되어 물속에 용존된 Geosmin의 농도를 분석하여, Geosmin발생이 남조류 밀도 변화와 높은 상관성이 있다는 것을 보고하였다. 이처럼 2000년대까지의 이취미 물질에 대한 연구는 주로 현장을 중심으로 하여 ‘이취미 물질 - 수질 - 남조류’ 간의 관계를 이해하는 측면에서 진행되었다.

2011년 겨울(11~12월)에 팔당호에서 이례적으로 최대 1,125 ng/L까지 대발생했던 Geosmin에 의한 냄새로 인해 수도권 주민들의 수도물 민원이 폭증하는 등 깨끗한 물로 인식되던 북한강 수계의 물관리에 있어 전국적인 관심과 우려가 나타났다. 이는 국내에서 이취미 물질 발생과 거동에 대한 보다 심도 있는 연구를 시작하게 되는 계기가 되었다. 특히 수온이 낮은 겨울철에 고농도의 Geosmin이 발생한 것은 국내에서 처음 있는 현상으로 기록되었다. 이 시기의 고농도의 Geosmin 발생은 *Dolichospermum*(*Anabaena*) 속의 남조류 대발생이 원인으로 확인되었으며, 2011년 겨울부터 2014년까지 매년 지속적으로

나타났다(You et al., 2013). 한편, 2014년 가을부터 Geosmin 농도는 크게 낮아지고 대신에 2-MIB 농도가 크게 증가하였으며, 2-MIB 농도는 *Pseudanabaena* 속 남조류 밀도와 상관관계가 가장 높은 것으로 분석되었다. 선행연구 결과에 의하면, 2-MIB 농도가 급격히 증가한 시점은 2015년 9월이었으며 북한강 상류 의암호에서 가장 높게 나타났다(HRWEMD, 2008; 2009; 2010; 2011; 2012b; 2013a; 2014a; 2015a; Kim, 2018).

2011년 겨울에 북한강 수계에서 발생한 이취미 문제의 원인을 이해하고자 2012~2015년간 ‘유해조류 분포 및 생리생태학적 발생 특성 연구’가 주요 담호(의암호, 청평호, 팔당호)에서 *Dolichospermum* 영양세포뿐만 아니라 휴면포자(Akinete)도 포함하여 수행되었다(HRWEMD, 2013a; 2014a; 2015a; Kim, 2018). 이를 통해 북한강 수계에 분포하는 주요 남조류의 이취미 물질 생산에 미치는 여러 가지 환경요인들이 분석되었다. Fig. 8은 북한강 수계에 서식하는 *Oscillatoria limosa*와 *Dolichospermum circinale*의 이취미 물질 생산에 대한 온도의 영향을 나타내는 결과이다. 2-MIB를 생산하는 *O. limosa*의 최적 성장 온도는 20~25°C인 반면, *D. circinale*는 25~30°C에서 더 잘 성장하였다. 총 이취미 물질 농도는 생물량(Chl-a)과

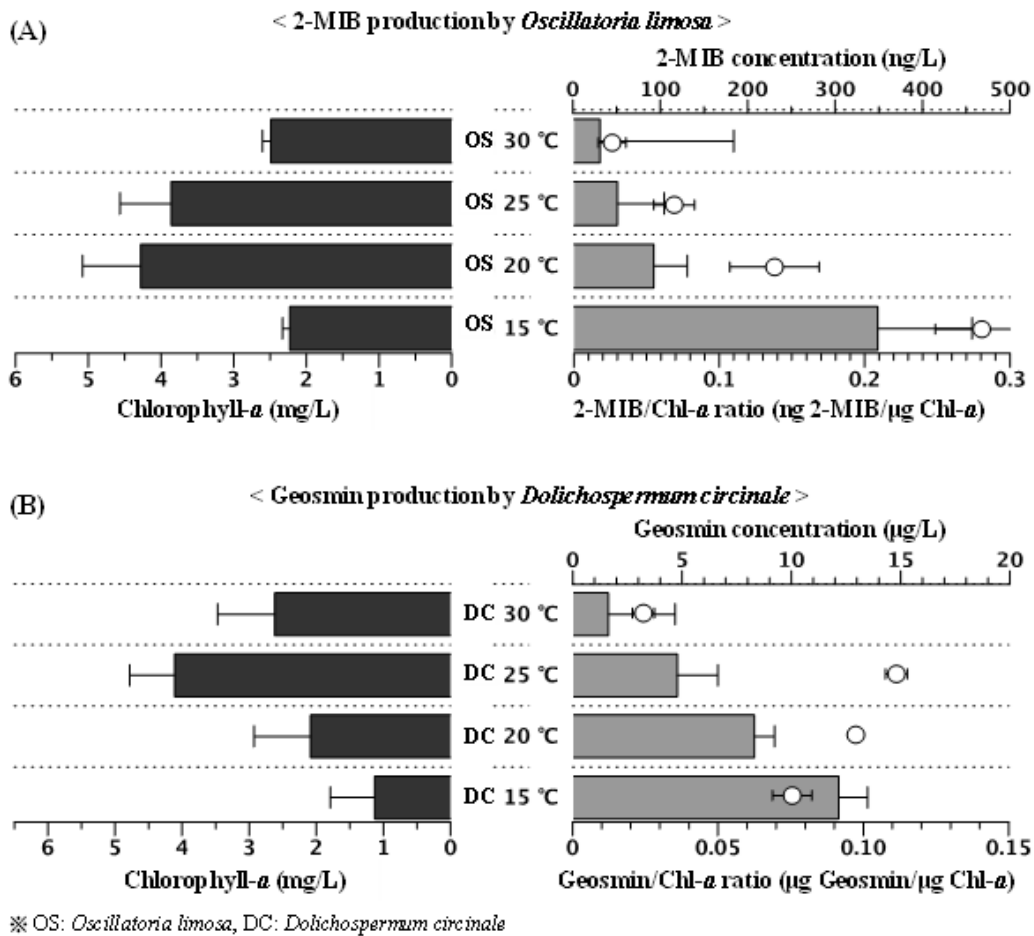


Fig. 8. (A) 2-MIB and (B) geosmin production by *Oscillatoria limosa* and *Dolichospermum circinale*, respectively, under different temperature conditions. Gray bars indicate total material concentrations produced by cyanobacteria. Circles indicate material production (i.e., material concentration produced per chlorophyll-a concentration) (Kim et al., 2018).

비례하는 경향을 보였으나, 단위 생물량당 이취미 물질 농도는 저온으로 갈수록 높아져 두 남조류 모두 15°C에서 가장 높았다. 이러한 결과는 저온기에 이취미를 생산하는 남조류가 발생할 경우 수중에 이취미 물질의 농도가 더 높아질 가능성이 있음을 보여주는 것이다(Kim et al., 2018).

의암호 수역에서 Geosmin에서 2-MIB로의 이취미 물질 발생 패턴의 변화는 2013년 7~8월에 태풍으로 인한 기록적인 폭우가 발생한 시기를 기점으로 나타났다(Choi, 2017). 폭우로 인한 대량 방류로 인해 의암호의 수체 체류 시간이 평균 9.4일에서 0.9일로 크게 감소하였고, 이와 함께 수층의 Geosmin 농도가 급격히 감소하였다. 2013년 여름의 집중 강우 이후 가을철에 의암담 앞에서 *Pseudanabaena* 세포밀도와 함께 2-MIB 농도가 증가하였으며 이후 매년 북한강 수역에서 지속적으로 출현하였다(HRWEMD, 2014b; 2015b; 2016; 2017). 의암호에서 우점했던 남조류가 *Dolichospermum*에서 *Pseudanabaena*로 바뀐에 따라 Geosmin과 2-MIB 발생 경향은 음의 상관관계를 나타냈다(Byun et al., 2015).

최근까지 국내에서 진행된 대부분의 이취미 물질 연구는 Geosmin을 합성하는 엽주말목(*Nostocales*) 남조류에 집중되었으며, 2-MIB를 합성하는 *Oscillatoria*와 *Pseudanabaena*의 이취미 물질 생산 및 거동에 대한 연구는 상대적으로 매우 미흡한 실정이었다. 다행히, 최근 북한강 수역에서 2-MIB 발생 원인생물과 발생기작을 파악하기 위한 연구가 진행 중에 있어(HRWEMD, 2019; 2020), 앞으로 보다 자세한 이해를 도모할 수 있을 것으로 기대된다.

6. Research Direction of Odor Material Dynamics and Causing Organism

일반적으로 이취미 물질 발생 거동과 원인 생물을 연구하는 주요 방법론은 직접적인 물질 분석과 현미경 분석법이다. 즉, 가스 크로마토그래피(Gas chromatography)를 이용하여 현장 시료 내에서 이취미 물질의 농도를 측정하고 통계적 분석을 통해 상관성이 가장 높은 남조류 종을 이취미 발생 원인종으로 판단한다(Byun et al., 2015; Byun et al., 2018; K-water 2016; You et al., 2013). 하지만 이러한 사후적인 분석방법으로는 정확한 이취미 발생 원인종을 파악하기 어려울 뿐만 아니라, 사전에 원인종과 이취미 물질의 발생 잠재성을 예측하기란 불가능하다. 이취미 물질의 생산력은 남조류 종에 따라 다르며 일부 균주는 환경조건에 따라 높은 농도의 이취미 물질을 생산할 수 있다(Huang et al., 2018; Kim et al., 2018; Lee et al., 2017; Zhang et al., 2019). 또한 하천 수역에서 물의 흐름에 의해 상류로부터 유입되는 용존성 이취미 물질로 인해 하류에서는 실질적인 원인생물을 판단하기 어려울 수 있다. 더욱이, 동일한 종 내에서도 이취미 물질을 합성할 수 있는 균주와 합성하지 못하는 균주가 동시에 존재할 수 있으며, 이취미 물질을 합성할 수 있는 유전자가 존재하지만 환경조건에 따라서 이취미 물질 합성 유전자가 발현되지 않을 수도 있다(Al-Tebrineh et al., 2010; Baker et al., 2013; Oikawa

et al., 2015; Saker et al., 2007; Shizuka et al., 2020).

이취미 물질을 생산하는 미생물을 보다 효율적이고 정확하게 탐색하기 위해서는 환경유전자 즉, eDNA를 이용한 유전자 수준의 접근이 매우 유용하다. 해당 수계의 수층과 퇴적층에서 eDNA에 존재하는 남조류의 이취미 물질 생합성 유전자를 탐색한다면 남조류에 의한 이취미 물질 발생 잠재성뿐만 아니라, 잠재적 원인생물의 분포까지도 파악할 수 있다(Kim, 2018; Kim et al., 2020b; Martins and Vasconcelos, 2011; Otten et al., 2016). 나아가, 수층에 분포하는 eRNA에서 남조류의 이취미 물질 생합성 과정에서 발생하는 RNA 단편을 탐색한다면 수층에서 실제로 이취미 물질을 합성하고 있는 균주의 분포를 파악할 수 있다. 또한 유전자 발현량과 이취미 물질 농도 간의 경험적 관계식을 통해 실제 남조류 세포 내부에서 생산되는 이취미 물질의 농도를 예측할 수 있다. 이처럼 eDNA와 eRNA를 이용한 분자생태학적 접근 방법은 이취미를 생산하는 원인생물을 신속히 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 유전자 수준에서 수중에 존재하는 이취미 물질의 농도를 예측함으로써 남조류 대발생 및 이취미 발생의 조기경보 기법으로 활용이 가능하다.

7. Conclusion and Prospects

본 논문은 수중에 불쾌한 냄새를 유발시켜 물의 이용과 관리에 어려움이 주는 이취미 물질 2-MIB를 생산하는 남조류 *Pseudanabaena* 속의 국내 발생과 종다양성 및 이에 대한 분자생태학적 연구의 동향에 대하여 소개하였다. 현미경을 이용한 남조류의 알파 분류법은 현재에도 종동정에 기본적으로 이용되고 있으나, 세포 크기가 작고 형태가 유사한 종들에 대해서는 동정의 오류가 발생할 수 있다. 더욱이 현미경적 방법으로는 실제로 특정종의 2-MIB 생산 여부를 판단할 수 없기 때문에, 현장에서 근본적인 발생 원인과 거동에 대한 이해가 제한적인 수밖에 없다. 2-MIB 발생과 관련하여 과거 국내에서 보고된 남조류들이 *Pseudanabaena* 속에 포함되었던 것은 확실하나, 정확한 종의 동정이 이루어지지 못하여 관련 연구의 발전에 어려움이 있었다. 그러나 최근 2-MIB 합성 유전자 정보를 이용한 계통분류 방법을 통해 북한강 수계에서만 해도 *Pseudanabaena* 속 내에 7종이 존재하며, 이 중 *P. yagii*와 *P. cinerea*가 2-MIB 문제의 주요 원인종으로 파악되었다. 북한강 수계를 넘어 *Pseudanabaena*의 전국적인 분포를 보다 세밀하게 분석한다면 국내에는 7종 이상이 존재할 가능성도 있다고 판단된다.

따라서 이취미 물질 발생 남조류를 보다 자세하게 연구하기 위해서는 유전자 수준의 이취미 물질 합성 잠재성과 이취미 물질 합성 유전자의 발현량에 대하여 파악할 필요가 있다. 또한 유전자 차세대염기서열 분석법을 활용하여 북한강 수계에서 이취미 물질을 만들어내는 원인생물이 무엇인지 보다 세밀하게 밝혀낼 수 있기 때문에 향후 수층에서 남조류에 의한 이취미 물질 발생 및 원인종을 파악함에 있어서 분자생태학적(유전자 기반) 분석법을 적극적으로 활용해야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgments

본 연구는 2021년 한강수계관리위원회 환경기초조사사업 (북한강수계 맛냄새물질 발생원인 조사 및 관리대책 수립)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Al-Tebrineh, J., Mihali, T. K., Pomati, F., and Neilan, B. A. (2010). Detection of saxitoxin-producing cyanobacteria and *Anabaena circinalis* in environmental water blooms by quantitative PCR, *Applied and Environmental Microbiology*, 76(23), 7836-7842.
- Bae, B. U., Kim, Y. I., Kim, H. Y., and Kim, G. N. (1999). Analysis of taste and odor compounds in drinking water supplies using CLSA (closed - loop stripping apparatus) and GC / MS, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 15, 479-487. [Korean Literature]
- Baik, K. H. (2000). *Occurrence and treatment of taste, odor and toxic material from algae in drinking water*, Ph.D, Seoul City University. [Korean Literature]
- Baker, L., Sendall, B. C., Gasser, R. B., Menjivar, T., Neilan, B. A., and Jex, A. R. (2013). Rapid, multiplex-tandem PCR assay for automated detection and differentiation of toxigenic cyanobacterial blooms, *Molecular and Cellular Probes*, 27(5-6), 208-214.
- Barnes, M. A. and Turner, C. R. (2016). The ecology of environmental DNA and implications for conservation genetics, *Conservation Genetics*, 17(1), 1-17.
- Berglund, L., Holtan, H., and Skulberg, O. (1983). Case studies on off-flavours in some Norwegian lakes, *Water Science and Technology*, 15(6-7), 199-209.
- Boopathi, T. and Ki, J. S. (2014). Impact of environmental factors on the regulation of cyanotoxin production, *Toxins*, 6(7), 1951-1978.
- Boopathi, T. and Wang, H. (2018). Seasonal changes in cyanobacterial diversity of a temperate freshwater Paldang reservoir (Korea) explored by using pyrosequencing, *Korean Journal of Environmental Biology*, 36(3), 424-437.
- Byeon, M. S., Byun J. H., Im, J. K., Jin, Y. H., Noh, H. R., Kim, G. S., Yu, M. N., Baek, J. S., Youn, S. J., Kim, H. N., Shim, Y. B., Ham, S. N., Jeon, G. H., Lee, S. H., Kim, G. H., Lee, H. J., and Yu, S. J. (2018). *Molecular biological characteristics of cyanobacteria originated off-flavor in water (I)*, 11-1480523-003620-01, Han-River Water Environment Research Center. [Korean Literature]
- Byun, J. H., Cho, I. H., Hwang, S. J., Park, M. H., Byeon, M. S., and Kim, B. H. (2014). Relationship between a dense bloom of cyanobacterium *anabaena* spp. and rainfalls in the North Han river system of South Korea, *Korea Journal of Ecology and Environment*, 47, 116-126. [Korean Literature]
- Byun, J. H., Hwang, S. J., Kim, B. H., Park, J. R., Lee, J. K., and Lim, B. J. (2015). Relationship between a dense population of cyanobacteria and odorous compounds in the North Han river system in 2014 and 2015, *Korea Journal of Ecology and Environment*, 48(4), 263-271. [Korean Literature]
- Byun, J. H., Yu, M., Lee, E., Yoo, S. J., Kim, B. H., and Byun, M. S. (2018). Temporal and spatial distribution of microbial community and odor compounds in the Bukhan river system, *Korea Journal of Ecology and Environment*, 51(4), 299-310. [Korean Literature]
- Catarina, C., Semedo-Aguiar, A. P., Silva, A. D., Pereira-Leal, J. B., and Leite, R. B. (2020). A novel cyanobacterial geosmin producer, revising GeoA distribution and dispersion patterns in bacteria, *Scientific Reports*, 10(1), 8679.
- Chiu, Y. T., Yen, H. K., and Lin, T. F. (2016). An alternative method to quantify 2-MIB producing cyanobacteria in drinking water reservoirs: Method development and field applications, *Environmental Research*, 151, 618-627.
- Cho, Y. K. (1996). Removal countermeasures of cyanobacteria that producing odor material in the drinking water source, *Symposium of Korean Society for Environmental Sanitary Engineers*, Korean Society for Environmental Sanitary Engineers. [Korean Literature]
- Choi, B. G. (2017). *Effects of meteorological fluctuation on water quality change and occurrence of cyanobacterial off-flavors in Euam reservoir, Korea*, Master, Konkuk University. [Korean Literature]
- Gagné, F., Ridal, J., Blaise, C., and Brownlee, B. (1999). Toxicological effects of geosmin and 2-methylisoborneol on rainbow trout hepatocytes, *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 63(2), 174-180.
- Gerber, N. and Lechevalier, H. (1965). Geosmin, an earthy-smelling substance isolated from actinomycetes, *Applied microbiology*, 13(6), 935-938.
- Giglio, S., Chou, W., Ikeda, H., Cane, D., and Monis, P. (2011). Biosynthesis of 2-methylisoborneol in cyanobacteria, *Environmental Science & Technology*, 45(3), 992-998.
- Gyeonggi-do Institute of Health environmental Research (GIHE). (2019) *Report on phytoplankton survey of major reservoirs in Gyeonggi-do in 2018*, 71-6410578-000050-01, Department of Water environmental research, 24-62. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2008). *Survey on the environment and ecosystem of lakes in the Han river system*, Hangang River Water Environment Research Center, 0-414. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2009). *Survey on the environment and ecosystem of lakes in the Han river system*, Hangang River Water Environment Research Center, 0-320. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2010). *Survey on the environment and ecosystem of lakes in the Han river system*, Hangang River Water Environment Research Center, 0-481. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2011). *Survey on the environment and ecosystem of lakes in the Han river system*, Hangang River Water Environment Research Center, 0-500. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2012a). *Distribution and eco-physiological characteristics of harmful algae in the North Han river*, Hangang River Water Environment Research Center, 0-255. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2012b). *Survey on the environment and ecosystem of lakes*

- in the Han river system, Hangang River Water Environment Research Center, 0-533. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2013a). *Investigation of causes of off-flavor material production by harmful algae and management strategy (1)*, Han River Watershed and Environment Management District, 0-330. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2013b). *Survey on the environment and ecosystem of lakes in the Han river system*, Hangang River Water Environment Research Center, 0-450. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2014a). *Investigation of causes of off-flavor material production by harmful algae and management strategy (2)*, Han River Watershed and Environment Management District, 0-620. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2014b). *Survey on the environment and ecosystem of lakes in the Han river system*, Hangang River Water Environment Research Center, 0-510. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2015a). *Investigation of causes of off-flavor material production by harmful algae and management strategy (3)*, Han River Watershed and Environment Management District, 0-348. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2015b). *Survey on the environment and ecosystem of lakes in the Han river system*, Hangang River Water Environment Research Center, 0-600. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2016). *Survey on the environment and ecosystem of lakes in the Han river system*, Hangang River Water Environment Research Center, 0-643. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2017). *Survey on the environment and ecosystem of lakes in the Han river system*, Hangang River Water Environment Research Center, 0-662. [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2019). *Investigation of the outbreak causes and management measures of the taste and odor compound (2-Methylisoborneol) in the North Han River water system(1)*, Han River Watershed and Environment Management District, 0-381 [Korean Literature]
- Hangang River Water Environment Research Center (HRWEMD). (2020). *Investigation of the outbreak causes and management measures of the taste and odor compound (2-Methylisoborneol) in the North Han River water system(2)*, Han River Watershed and Environment Management District, 0-327. [Korean Literature]
- Hotto, A., Satchwell, M., and Boyer, G. (2007). Molecular characterization of potential microcystin-producing cyanobacteria in lake Ontario embayments and nearshore waters, *Applied and environmental microbiology*, 73(14), 4570-4578.
- Huang, H., Xu, X., Shi, C., Liu, X., and Wang, G. (2018). Response of taste and odor compounds to elevated cyanobacteria biomass and temperature, *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 101(2), 272-278.
- Hur, M., Lee, I., Tak, B. M., Lee, H. J., Yu, J. J., Cheon, S. U., and Kim, B. S. (2013). Temporal shifts in cyanobacterial communities at different sites on the Nakdong river in Korea, *Water research*, 47(19), 6973-6982.
- Izaguirre, G. and Taylor, W. (2004). A guide to geosmin-and MIB-producing cyanobacteria in the United States, *Water Science and Technology*, 49(9), 19-24.
- Izaguirre, G. and Taylor, W. D. (1998). A *Pseudanabaena* species from Castaic lake, California, that produces 2-methylisoborneol, *Water research*, 32(5), 1673-1677.
- Jeong, J. Y., Lee, S. H., Yun, M. R., Oh, S. E., Hwang, S. M., Park, J. S., Hwang, C. W., Kim, T. H., Yun, M. H., and Park, H. D. (2020a). Molecular evidence for the cause of 2-Methylisoborneol (2-MIB) odor in North-Han River, South Korea, *Annual Meeting of the Microbiological society of Korea*, Korea society of Microbiology, 44.
- Jeong, J. Y., Lee, S. H., Yun, M. R., Oh, S. E., Kim, T. H., Yoon, M. H. and Park, H. D. (2020b). Draft genome sequence of putative 2-methylisoborneol-producing *Pseudanabaena yagii* strain GIHE-NHR1, isolated from the North Han river in South Korea, *Microbiology Resource Announcements*, 9(27), e00431-00420.
- Jin, B. S., Cho, Y. G., Lee, J. J., and Lee, J. J. (1998). Studies on algae causing tastes and odors in the Dongbok reservoir - Detection of taste and odor substances in culture fluids and natural waters -, *Journal of Environmental Engineers*, 14, 229-236
- Jørgensen, N. O., Poddaturi, R., and Burford, M. A. (2016). Relations between abundance of potential geosmin-and 2-MIB-producing organisms and concentrations of these compounds in water from three Australian reservoirs, *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 65(6), 504-513.
- Jun, H. B., Lee, T. Y., Lee, S. W., and Lee, K. S. (1994). Management and improvement for the reservoir water quality by using air lift circulation, *Conference of Korean society of environmental engineering*, Korean Society of Environmental Engineers 55-60. [Korean Literature]
- Jüttner, F. and Watson, S. B. (2007). Biochemical and ecological control of geosmin and 2-methylisoborneol in source waters, *Applied and environmental microbiology*, 73(14), 4395-4406.
- Kim, J., Lim, J., and Lee, C. (2013). Quantitative real-time PCR approaches for microbial community studies in wastewater treatment systems: Applications and considerations, *Biotechnology advances*, 31(8), 1358-1373. [Korean Literature]
- Kim, J. H., Kim, M. C., Kim, H. S., and Oh, G. S. (2006). Depth distribution and degradation of geosmin and 2-MIB in water supply reservoirs in the summer season, *Joint conference of Korean society of water environment and Korean society of water and wastewater*, Korean society of water environment and Korean society of water and wastewater. [Korean Literature]
- Kim, K. (2018). *Molecular genetic analysis of cyanobacterial harmful material production potential in the North Han River, Korea*, Ph.D, Konkuk University. [Korean Literature]
- Kim, K., Lee, S., Seo, K., and Hwang, S. J. (2020a). Molecular

- identification of *Pseudanabaena* strains and analysis of 2-MIB production potential in the North Han river system, *Korea Journal of Ecology and Environment*, 53(4), 344-354. [Korean Literature]
- Kim, K., Park, C., Yoon, Y., and Hwang, S. J. (2018). Harmful cyanobacterial material production in the North Han river (South Korea): Genetic potential and temperature-dependent properties, *International journal of environmental research and public health*, 15(3), 444.
- Kim, K., Yoon, Y., Cho, H., and Hwang, S. J. (2020b). Molecular probes to evaluate the synthesis and production potential of an odorous compound (2-methylisoborneol) in cyanobacteria, *International journal of environmental research and public health*, 17(6), 1933.
- Kim, K. H., Lim, B. J., You, K. A., Park, M. H., Park, J. H., Kim, B. H., and Hwang, S. J. (2014). Note: Identification and analysis of geosmin production potential of anabaena stain isolated from North Han river using genetic methods, *Environment and Ecology*, 47, 342-349. [Korean Literature]
- Kim, M. K., Moon, B. R., Kim, T. K., and Zoh, K. D. (2015). A study on production & removal of microcystin, taste & odor compounds from algal bloom in the water treatment processes, *Korean Journal of Public Health*, 52(1), 33-42. [Korean Literature]
- Kim, Y. J. and Lee, O. M. (2011). The phytoplankton community of Namdae-stream, Yeongok-stream and of Sacheon-stream in Gangwon-do, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 20(3), 281-297. [Korean Literature]
- Komatsu, M., Tsuda, M., Ōmura, S., Oikawa, H., and Ikeda, H. (2008). Identification and functional analysis of genes controlling biosynthesis of 2-methylisoborneol, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(21), 7422-7427.
- K-water. (2016). *Development of the predictive model and analysis of occurrence characteristics for T & Os in Nam gang reservoir Water-intake gate*, KIWE-WRRC-16-15, K-water. [Korean Literature]
- Lee, E. J. and Choi, I. H. (2012). Community shift of phytoplankton from the Han river watershed and analysis of taste and taste substances, *Joint conference of Korean society of water environment and Korean society of water and wastewater*, Korean society of water environment and Korean society of water and wastewater, 766-767. [Korean Literature]
- Lee, J., Rai, P. K., Jeon, Y. J., Kim, K. H., and Kwon, E. E. (2017). The role of algae and cyanobacteria in the production and release of odorants in water, *Environmental Pollution*, 227, 252-262.
- Lee, J. H. (1999). Dynamics of phytoplankton community in lake Daechung, Korea, *Journal of Ecology and Environment*, 32(4), 358-366. [Korean Literature]
- Lee, J. H., Park, J. G., and Kim, E. J. (2002). Trophic states and phytoplankton compositions of dam lakes in Korea, *Algae*, 17(4), 275-281.
- Lee, O. M., Yoo, M. S., Lee, B. I., and Lim, A. S. (2008). The distribution and standing crop of phytoplankton at the estuaries of Galgok stream and Incheon river in Jeollanam-do, *Algae*, 23(4), 257-268.
- Lee, S. T., Choi, I. H., Choi, J. W., Lee, G. C., Kim, H. C., Kim, Y. S., Bum, M. S., Jung, A. S., Kim, S. H., Hwang, S. O., and Jo, C. D. (2009). *Identification and analysis of unknown odor compounds in Paldang Reservoir (1st year)*, KIWE-WARC-09-04, K-water, 145. [Korean Literature]
- Li, Z., Hobson, P., An, W., Burch, M. D., House, J., and Yang, M. (2012). Earthy odor compounds production and loss in three cyanobacterial cultures, *Water research*, 46(16), 5165-5173.
- Ludwig, F., Medger, A., Börnick, H., Opitz, M., Lang, K., Göttfert, M., and Röske, I. (2007). Identification and expression analyses of putative sesquiterpene synthase genes in phormidium sp. and prevalence of geoA-like genes in a drinking water reservoir, *Applied and environmental microbiology*, 73(21), 6988-6993.
- Martins, A. and Vasconcelos, V. (2011). Use of qPCR for the study of hepatotoxic cyanobacteria population dynamics, *Archives of microbiology*, 193(9), 615.
- Moustafa, A., Loram, J. E., Hackett, J. D., Anderson, D. M., Plumley, F. G., and Bhattacharya, D. (2009). Origin of saxitoxin biosynthetic genes in cyanobacteria, *PLoS one*, 4(6), e5758.
- Muñoz-Martín, M. Á., Gómez, E. B., Perona, E., and Mateo, P. (2020). Analysis of molecular diversity within single cyanobacterial colonies from environmental samples, *Scientific Reports*, 10(1), 1-18.
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2012). *Occurrence and management of odor compounds produced by algae in the Geum river*, National Institute of Environmental Research, 0-55. [Korean Literature]
- Niiyama, Y. and Tuji, A. (2019). *Microcoleus pseudautumnalis* sp. nov. (Cyanobacteria, Oscillatoriales) producing 2-methylisoborneol, *Bulletin of the National Museum of Nature and Science, Series B (Botany)*, 45(3), 93-101.
- Niiyama, Y., Tuji, A., Takemoto, K., and Ichise, S. (2016). *Pseudanabaena foetida* sp. nov. and *P. subfoetida* sp. nov. (Cyanophyta/Cyanobacteria) producing 2-methylisoborneol from Japan, *Fottea*, 16(1), 1-11.
- Nakdong River Watershed Environmental Management District (NRWEMD). (2013). *Freshwater ecosystem monitoring of weir section in Nakdong river*, MONO1201520629 Nakdong River Environment Research Center, 1-349. [Korean Literature]
- Nakdong River Watershed Environmental Management District (NRWEMD). (2015a). *Status of the Nakdong river in first weeks June, 2015*, 20150626, Nakdong River Watershed and Environment Management District, 1. [Korean Literature]
- Nakdong River Watershed Environmental Management District (NRWEMD). (2015b). *Survey of lake environment and ecosystem in the Nakdong river system*, MONO1201520629, 1-378. [Korean Literature]
- Oh, H. J., Choi, Y. J., Hwang, T. M., and Nam, S. H. (2005). The water characterization of 2-MIB, geosmin and algae in Han river's raw water, *Joint conference of Korean society of water environment and Korean society of water and wastewater*, Korean society of water environment and Korean society of water and wastewater.
- Oikawa, T., Tsunoda, T., Nakahigashi, H., Shimoriku, M., Kanami, T., and Kimura, S. (2015). Musty odor producing

- benthic cyanobacteria in the Tama River (Japan) and identification of species by genetic analysis, *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 64(7), 839-846.
- Otten, T. G., Graham, J. L., Harris, T. D., and Dreher, T. W. (2016). Elucidation of taste-and odor-producing bacteria and toxigenic cyanobacteria in a midwestern drinking water supply reservoir by shotgun metagenomic analysis, *Applied and environmental microbiology*, 82(17), 5410-5420.
- Park, H. K., Shin, R. Y., Lee, H. J., Lee, K. L., and Cheon, S. U. (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(3), 286-294. [Korean Literature]
- Park, J. H., Moon, B. R., and Lee, O. M. (2006). The phytoplankton compositions and trophic states at several lakes of Suwon-si, Korea, *Algae*, 21, 217-228.
- Pham, T., Bui, M. H., Driscoll, M., Shimizu, K., and Motoo, U. (2020). First report of geosmin and 2-methylisoborneol (2-MIB) in Dolichospermum and oscillatoria from Vietnam, *Limnology*, 1-14.
- Saker, M. L., Vale, M., Kramer, D., and Vasconcelos, V. M. (2007). Molecular techniques for the early warning of toxic cyanobacteria blooms in freshwater lakes and rivers, *Applied microbiology and biotechnology*, 75(2), 441-449.
- Sayers, E. W., Beck, J., Brister, J. R., Bolton, E. E., Canese, K., Comeau, D. C., Funk, K., Ketter, A. and Kim, S. (2020). Database resources of the national center for biotechnology information, *Nucleic acids research*, 48(D1), D7-19.
- Schoch, C. L., Ciufó, S., Domrachev, M., Hotton, C. L., Kannan, S., Khovanskaya, R., Leipe, D., Mcveigh, R., O'Neill, K., and Robbertse, B. (2020). Database resources of the national center for biotechnology information, *Nucleic Acids Research*, 48(D1), D8-D13.
- Seoul Research Institute of Public Health and Environment (SRIPH). (2014). *Tap water supply: Safe and tasty tap water for Seoul cities*, Seoul Research Institute of Public Health and Environment. [Korean Literature]
- Shizuka, K., Ikenaga, M., Murase, J., Nakayama, N., Matsuya, N., Kakino, W., Taruya, H., and Maie, N. (2020). Diversity of 2-MIB-Producing cyanobacteria in lake Ogawara: microscopic and molecular ecological approaches, *Aquatic culture Science*, 68(1), 9-23.
- Song, K. G., Lee, B. K., Shin, J., and Chae, A. (2015). *Development and demonstration of control platform through alternative adsorbent and unit process development for algal T&O matters induced from algal bloom*, Korea Institute of Science and Technology. [Korean Literature]
- Sun, D., Yu, J., An, W., Yang, M., Chen, G., and Zhang, S. (2013). Identification of causative compounds and microorganisms for musty odor occurrence in the Huangpu River, China, *Journal of Environmental Sciences*, 25(3), 460-465.
- Taberlet, P., Bonin, A., Zinger, L., and Coissac, E. (2018). *Environmental DNA: For biodiversity research and monitoring*, Oxford University Press.
- Tawong, W. (2017). Diversity of the potential 2-Methylisoborneol-producing genotypes in Thai strains of Planktothricoides (Cyanobacteria), *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 60, e17160567.
- Te, S. H., Tan, B. F., Boo, C. Y., Thompson, J. R., and Gin, K. Y. H. (2017). Genomics insights into production of 2-methylisoborneol and a putative cyanobactin by Planktothricoides sp. SR001, *Standards in genomic sciences*, 12(1), 35.
- Thomsen, P. F. and Willerslev, E. (2015). Environmental DNA—An emerging tool in conservation for monitoring past and present biodiversity, *Biological conservation*, 183, 4-18.
- Tokuko, T., Hirokazu, N., Taku, K., and Tomo, O. (2014). Genetic analysis of 2-methylisoborneol - Producing cyanobacterium Sampled from the upper reaches of the Tama river, *Journal of Japan Society on Water Environment*, 37(1), 9-13.
- Tsao, H. W., Michinaka, A., Yen, H. K., Giglio, S., Hobson, P., Monis, P., and Lin, T. F. (2014). Monitoring of geosmin producing Anabaena circinalis using quantitative PCR, *Water research*, 49, 416-425.
- Tuji, A. and Niiyama, Y. (2018). Two new Pseudanabaena (Cyanobacteria, Synechococcales) species from Japan, Pseudanabaena cinerea and Pseudanabaena yagii, which produce 2-methylisoborneol, *Phycological Research*, 66(4), 291-299.
- Uk, B. B., Kim, Y. I., Lim, B. S., Ahn, C. J., and Lee, T. Y. (1996). Natural decay of algae - related odor in Daechung dam, *Journal of Environmental Engineers*, 20, 1161-1170.
- Vaitoomaa, J., Rantala, A., Halinen, K., Rouhiainen, L., Tallberg, P., Mokolke, L., and Sivonen, K. (2003). Quantitative real-time PCR for determination of microcystin synthetase E copy numbers for microcystis and anabaena in lakes, *Applied and environmental microbiology*, 69(12), 7289-7297.
- Vezie, C., Briant, L., Sivonen, K., Bertru, G., Lefevre, J. C., and Salkinoja-Salonen, M. (1998). Variation of microcystin content of cyanobacterial blooms and isolated strains in lake Grand-Lieu (France), *Microbial ecology*, 35(2), 126-135.
- Wang, Z., Shao, J., Xu, Y., Yan, B., and Li, R. (2015). Genetic basis for geosmin production by the water bloom-forming cyanobacterium, Anabaena ucrainica, *Water*, 7(1), 175-187.
- Wang, Z., Song, G., Li, Y., Yu, G., Hou, X., Gan, Z., and Li, R. (2019). The diversity, origin, and evolutionary analysis of geosmin synthase gene in cyanobacteria, *Science of The Total Environment*, 689, 789-796.
- Wang, Z., Song, G., Shao, J., Tan, W., Li, Y., and Li, R. (2016). Establishment and field applications of real-time PCR methods for the quantification of potential MIB-producing cyanobacteria in aquatic systems, *Journal of Applied Phycology*, 28(1), 325-333.
- Wang, Z., Xu, Y., Shao, J., Wang, J., and Li, R. (2011). Genes associated with 2-methylisoborneol biosynthesis in cyanobacteria: isolation, characterization, and expression in response to light, *PLoS one*, 6(4), e18665.
- Watson, S. B., Monis, P., Baker, P., and Giglio, S. (2016). Biochemistry and genetics of taste-and odor-producing cyanobacteria, *Harmful Algae*, 54, 112-127.
- Whangchai, N., Pimpimon, T., Sompong, U., Suwanpakdee, S., Gutierrez, R., and Itayama, T. (2017). Study of geosmin and 2-methylisoborneol (MIB) producers in Phayao lake,

- Thailand, *International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics*, 7(3), 177-184.
- Wu, D. and Duirk, S. E. (2013). Quantitative analysis of earthy and musty odors in drinking water sources impacted by wastewater and algal derived contaminants, *Chemosphere*, 91(11), 1495-1501.
- Yoccoz, N. G. (2012). The future of environmental DNA in ecology, *Molecular Ecology*, 21(8), 2031-2038.
- You, K. A., Byeon, M. S., Youn, S. J., Hwang, S., and Rhew, D. H. (2013). Growth characteristics of blue-green algae (*Anabaena spiroides*) causing tastes and odors in the North-Han river, Korea, *Korea Journal of Ecology and Environment*, 46, 135-144.
- Yeong-San River Watershed Environmental Management District (YSRWEMD). (2014). *Aquatic ecosystem monitoring in weirs of the Yeongsan river*, Yeongsan River Water Environment Research Center, 0-303. [Korean Literature]
- Yeong-San River Watershed Environmental Management District (YSRWEMD). (2015). *Aquatic ecosystem monitoring in weirs of the Yeongsan river*, Yeongsan River Water Environment Research Center, 0-400. [Korean Literature]
- Yeong-San River Watershed Environmental Management District (YSRWEMD). (2018). *Aquatic ecosystem monitoring in weirs of the Yeongsan river*, Yeongsan River Water Environment Research Center, 0-359. [Korean Literature]
- Yu, G., Zhu, M., Chen, Y., Pan, Q., Chai, W., and Li, R. (2015). Polyphasic characterization of four species of *Pseudanabaena* (Oscillatoriales, Cyanobacteria) from China and insights into polyphyletic divergence within the *Pseudanabaena* genus, *Phytotaxa*, 192(1), 1-12.
- Yu, J. J., Lee, H. J., Lee, K. L., Lyu, H. S., Whang, J. W., Shin, L. Y., and Chen, S. U. (2014). relationship between distribution of the dominant phytoplankton species and water temperature in the Nakdong river, Korea, *Korea Journal of Ecology and Environment*, 47(4), 247-257.
- Zhang, R., Qi, F., Liu, C., Zhang, Y., Wang, Y., Song, Z., Kumirska, J., and Sun, D. (2019). Cyanobacteria derived taste and odor characteristics in various lakes in China: Songhua Lake, Chaohu Lake and Taihu Lake, *Ecotoxicology and environmental safety*, 181, 499-507.
- Zhang, T., Zheng, L., Li, L., and Song, L. (2016). 2-Methylisoborneol production characteristics of *Pseudanabaena* sp. FACHB 1277 isolated from Xionghu reservoir, China, *Journal of Applied Phycology*, 28(6), 3353-3362.
- Zhao, Q. (2012). *Treatment of taste and odor compounds in Oklahoma surface water*, Bachelor, Oklahoma State University.
- Zuo, Y., Li, L., Wu, Z., and Song, L. (2009). Isolation, identification and odour-producing abilities of geosmin/2-MIB in actinomycetes from sediments in Lake Lotus, China, *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 58(8), 552-561.