

## 의암호와 공지천 하류에서 남조류와 냄새물질의 발생 특징

윤석제<sup>a</sup> · 임종권<sup>b</sup> · 변명섭<sup>c,\*</sup> · 유순주<sup>d</sup>

국립환경과학원 한강물환경연구소

## Characteristics of Cyanobacteria and Odorous Compounds Production in Lake Uiam and Lower Gonji Stream

Seok Jea Youn<sup>a</sup> · Jong Kwon Im<sup>b</sup> · Myeong-Seop Byeon<sup>c,\*</sup> · Soon Ju Yu<sup>d</sup>

Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research  
(Received 26 November 2018, Revised 30 January 2019, Accepted 8 February 2019)

### Abstract

The objective of this study was to investigate the relationship between the biomass of cyanobacteria and the concentration of 2-methylisoborneol (2-MIB) in the lower Gongji stream. The investigation was done using a field study that was conducted from 2015 to 2017. The 2-MIB concentration in the lower Gongji stream ranged from 0 to 153 ng/L, while the upper stream had 0 2-MIB concentration. 3 genera (*Oscillatoria*, *Phormidium*, *Pseudanabaena*) of cyanobacteria were detected in the lower Gongji stream with 2-MIB concentration. Among these 3 genera, an increase in *Phormidium*, *Pseudanabaena* biomass was associated with an increase in 2-MIB concentration. Accordingly, *Phormidium*, *Pseudanabaena* were regarded as the biological source of 2-MIB in that area. In October 2017, although planktonic cyanobacteria occurred less frequently, many benthic cyanobacteria mats were observed on the surface of the water body. Therefore, the high 2-MIB concentration, which exceeded 110 ng/L, can likely be attributed to the benthic cyanobacteria. In a laboratory experiment, individual *Oscillatoria* filaments were aggregated to form a colony with a higher density. This colony tended to float on the water surface. Cyanobacteria mats after floating aggregated mats were distributed in a net shape on the bottom.

**Key words** : 2-MIB, Benthic cyanobacteria, Cyanobacteria, *Oscillatoria*, *Pseudanabaena*

<sup>a</sup> 전문위원(Researcher), cooker45@korea.kr, <http://orcid.org/0000-0003-1045-4754>

<sup>b</sup> 연구사(Researcher), limjkk80@korea.kr, <http://orcid.org/0000-0003-3994-5127>

<sup>c,\*</sup> Corresponding author, 연구관(Researcher), zacco@korea.kr, <http://orcid.org/0000-0003-0997-2415>

<sup>d</sup> 소장(Director), ysu4205@naver.com, <http://orcid.org/0000-0002-1860-131X>

## 1. Introduction

Geosmin과 2-MIB는 독성을 지니고 있지는 않지만 감지되는 임계값이 낮고 광범위한 발생범위로 인해 위험 인자가 될 수 있으며(Paerl and Millie, 1996), 상수원, 친수활동과 양식장, 상업지역에서 냄새와 맛으로 인해 경제적 손실을 초래하는 생물학적 물질이다(Hosaka et al., 1995; Watson et al., 2003; Watson, 2004). 상수원이나 정수장에서는 이러한 이취미 물질을 감소하기 위하여 다양한 방법이 연구되고 있지만 완전한 무기화에 한계가 있다(Lee et al., 2017; Persson et al., 2007; Yuan et al., 2013).

이취미 문제는 물을 마실 때 가장 처음 인지하는 요소이기 때문에 수도물 관리에 매우 중요한 부분이 된다(Bowmer et al., 1992; Ishida and Miyaji, 1992). 또한 발생한 이취미 문제를 해결하기 위해서는 많은 사회적 비용이나 노력이 필요하다. 미국 텍사스 Waco시에서는 2002년부터 2012년 사이 수도물에서 발생한 이취미 문제를 완화하기 위해 70만 달러의 비용이 발생하였으며, 인근 지역에 수도물 공급의 감소로 인해 잠정적으로 6.9만 달러에서 10.3만 달러의 손해를 잃은 것으로 추정되고 있다(Dunlap et al., 2015). 미국 Cheney 저수지에서는 *Anabaena* 또는 *Aphanizomenon* 등과 같은 남조류 생물량 증가로 이취미와 관련된 많은 민원이 발생하였다(Smith et al., 2002). 최근 국내에서도 상수원인 팔당호 북한강 수계에서 2011, 2014~2015년에 발생한 남조류 원인 이취미 물질 농도가 높아져 상수원을 이용하는 수도권 주민들에 불편을 초래하였다(You et al., 2013; Youn et al., 2018).

호수나 하천에서 2-MIB의 발생 원인은 남조류나 방선균에 의한 것으로 보고되었으며, 남조류 중 주로 *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Pseudanabaena*에 의한 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2013; Watson, 2003). 2-MIB는 남조류와 동반되어 발생되며, 실험실 내 실험에서도 남조류와의 관계가 많이 연구되었다(Hosaka and Otsuhata, 1988; Kim et al., 2015; Sugiura et al., 1986).

이취미 물질은 부유성 남조류뿐만 아니라 *Oscillatoria* 등과 같은 저서성 남조류에서도 많이 발생한다. 남조류 매트 는 서로 응집하여 고밀도의 군체를 이루어 부상할 수 있으며(Biddanda et al., 2015; Hoiczky, 2000), 저서성 남조류 매트가 부상한 후 이취미 물질이 크게 증가할 수 있다(Kim et al., 2014). Wang and Li (2015)는 저서성 남조류가 사멸한 뒤에 이취미 물질의 농도가 증가한다고 보고하였으며, 사상성 부착 남조류에 의해 생산된 이취미 물질은 하류에도 영향을 미칠 수 있는 잠재력을 지니고 있다(Izaguirre and Taylor, 1995). 그러나 매트를 형성하는 저서성 남조류의 생리적 특성과 이취미 물질의 관계에 대한 연구는 많이 진행되지 않았으며, 이들에 대한 분포 및 생리적 특성에 대한 조사도 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 냄새 물질의 발생 특성과 원인 남조류를 규명하기 위해 의암호의 2-MIB 발생량을 조사하였으며, 공지천 하류에서 발생한 냄새 물질(2-MIB)과 원인 남조류

에 대해 연구하였다. 또한 저서성 남조류의 특징을 연구하여 냄새물질을 효율적으로 제어하기 위한 사전자료를 제공하고자 하였다.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 연구대상 지역

의암호는 1967년에 다목적댐 건설로 생긴 인공호로 의암호 좌안에 위치한 하수처리장 방류수에 의해 수질이 악화되고 있는 실정이며, 지속적으로 녹조 발생이 빈번한 지역으로 알려져 있다(Lee, 2005). 공지천 유입부는 의암호 남조류의 근원지로 지목되었으며, 2011년에 남조류는 의암호 내의 공지천 유입부부터 하류의 팔당호까지 나타나 발생지역이 하류로 확산되는 특성을 보였다(Lee et al., 2016; You et al., 2013). 연구대상 지역은 이취미 발생이 예상되는 의암호의 9개 지점을 선정하여 조사하였으며(Fig. 1), 부상한 저서성 남조류 매트 분포 조사는 수심이 2~3 m인 공지천 하류 지점인 U7과 U8 지점에서 수행하였다.

### 2.2 조사 기간 및 방법

공지천 하류 U8 지점은 2015년 3월 10일부터 2017년 12월 11일(2015년 12월 21일~2016년 3월 1일, 2017년 1월 2일~2017년 2월 20일; 결빙으로 인한 결측)까지 조사하였으며, 시료는 주 1회 채수하였다. 의암호 9개 지점에 대한 조사는 2017년 10월 16일에 실시하였다. 시료의 채수는 플라스틱 수질 채수기(4L, Wildco., USA)로 수심 0.5 m에서 하였다. 이취미 물질 분석용 시료채수는 현장에서 20 mL의 유리재질 병에 공기가 들어가지 않게 하였으며, 남조류 분석 시료채수는 200 mL의 플라스틱 병을 사용하여 Lugol's 용액으로 최종농도 2%가 되도록 첨가·고정하였다. 현장에

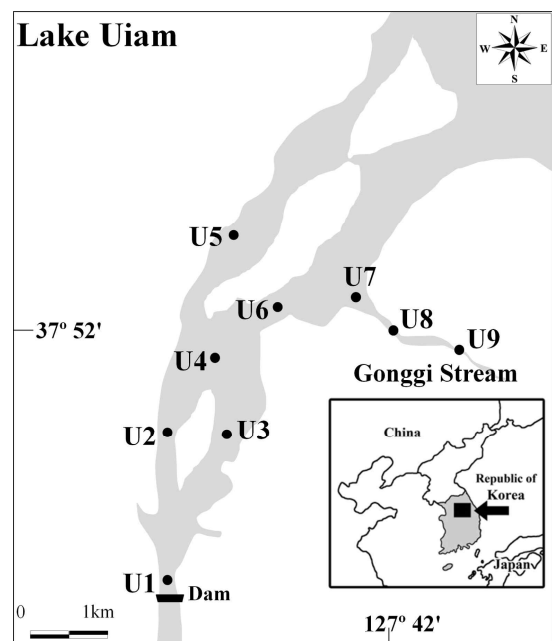


Fig. 1. Study area and sampling sites in Lake Uiam.

서 4°C 암-냉 조건에서 보관한 채수 시료는 실험실로 운반하여 분석하였다.

### 2.3 2-MIB 및 남조류 분석

2-MIB는 먹는물 수질감시항목 운영지침(ME, 2015)에 따라 GC/MS (Gas chromatography mass spectrometry, 450GC/320MS, Bruker, USA)를 이용하여 HS-SPME (Headspace soild phase micro extraction)법으로 분석하였다. 남조류의 종조성과 출현량을 조사하기 위하여 고정된 시료는 남조류의 밀도에 따라 그대로 사용하거나 농축 또는 희석하여 사용하였다. 시료의 분석은 1 mL을 Sedgwick-Rafter counting chamber에 넣고 15분 이상 방치하여 남조류를 가라앉힌 후 검경하였다. 시료의 정확도를 높이기 위해 3회 이상을 반복하였으며, 총 50줄(strip)을 검경하였다. 남조류 세포수는 위상차 현미경(Eclipse 80i, Nikon, Japan)으로 100~200배율에서 찾은 후 400배율에서 계수하였다. 구별이 힘든 일부 남조류 사상체들은 1,000배율에서 관찰하여 종을 동정하였다. 종에 대한 분류는 Hirose et al. (1997), John et al. (2002)를 참고하였다.

### 2.4 *Oscillatoria* 응집 및 부상 특징 관찰

실험에 사용된 *Oscillatoria*는 U7와 U8 지점에서 부상한 남조류 매트에서 채집하였으며, 유리 재질의 500 mL 병에 현장수와 함께 담아 암-냉 보관하여 실험실로 이동하였다. 남조류 매트는 배양액(BG11, Sigma, USA) 450 mL이 들어 있는 유리 재질의 1 L 병에 옮겨 배양하였다. *Oscillatoria* 사상체들의 응집 및 부상을 관찰하기 위해 20 L의 BG11 배양액이 들어 있는 유리 수조(30×30×30)에 약 30 g (습중량) 정도의 *Oscillatoria* 사상체들을 골고루 분산시켜 배양하였다. 배양 조건은 25°C, 40 μmol photons/m<sup>2</sup>·S (light:dark = 16:8) 조건으로 하였으며, 광원은 수조 중앙에 위치하였다. 사상체들이 응집 및 부상되는 사진은 옆면에서 시간을 두고 순차적으로 촬영하였다.

## 3. Results and Discussion

### 3.1 지점 간 2-MIB 발생량 조사

의암호 내 2-MIB의 분포를 알아보기 위해 2017년 10월에 의암호 내 6개 지점, 공지천 3개 지점을 조사하였다. 공지천 지점에서 2-MIB는 0~153 ng/L의 범위로 조사되었다 (Table 1). 의암호로 합류되는 공지천 하류인 U7 지점은 2-MIB 농도가 153 ng/L로 상류인 공지천교(U8 지점; 108 ng/L)보다 높았으며, 하천 조사지점 중 가장 상류인 U9 지점에서는 검출되지 않았다. 따라서 공지천의 2-MIB 농도는 공지천 상류에 영향을 받은 것이 아니라 하수처리장 방류수의 오염물질이 원인이 되어 공지천 하류(U7)지점에서 높게 발생한 것으로 판단되었다. 호 내 지점에서 2-MIB의 농도는 U3 지점(147 ng/L)을 제외하고 18~99 ng/L로 하천 지점보다 낮았다. 이와 같은 결과는 공지천 하류가 정체구역이며, 하수처리장 방류수로 인해 영양염류가 높아 남조류

발생이 증가되어 의암호 내보다 2-MIB 농도가 높은 것으로 판단된다. U3 지점은 중도 좌안부터 중도 하류, 붕어섬 좌안의 경우 가래류의 수초지대가 형성되어 있었고, 낮은 수온으로 인하여 검정말이 고사하여 표층에 부유하고 있는 것이 관찰되었다. 수초에는 많은 남조류가 부착하여 생육하고 있었으며, 수초의 2-MIB 농도를 조사한 결과 270 ng/L 이상이 검출되어(미발표 자료) U3 지점의 높은 2-MIB는 주변 수초 지대에 영향을 받은 것으로 보인다.

### 3.2 2-MIB 발생과 원인 남조류 분석

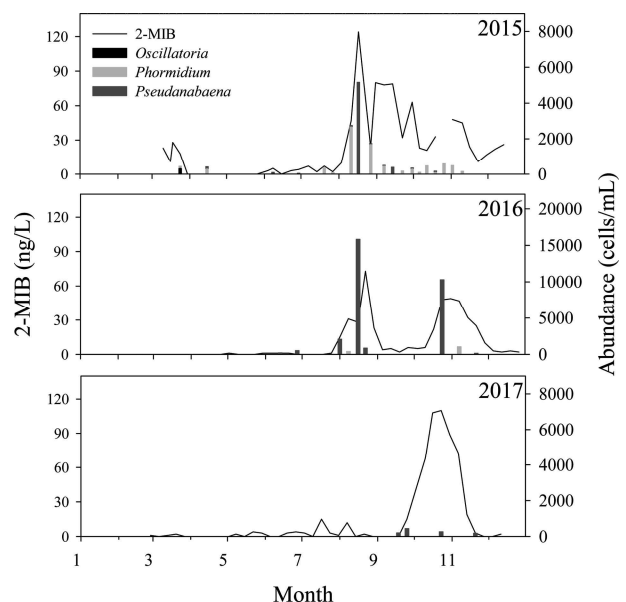
공지천의 U8 지점에서 2015년 3월부터 2017년 12월까지 3년간 2-MIB 농도와 냄새 유발 부유성 남조류를 조사하였다(Fig. 2). 조사된 남조류는 모두 5속이었다. 조사된 5속 중 3속(*Oscillatoria*, *Phormidium*, *Pseudanabaena*)은 2-MIB를 발생하는 남조류였다. 공지천 하류에서 2-MIB 농도는 2015년 8월에 최대값(124 ng/L)을 나타내었으며, 매년 8월과 10월에 두 번 최대값을 보였다. 냄새유발 남조류 3속 중 *Pseudanabaena*는 최대 15,000 cells/mL 이상으로 생물량이

**Table 1.** Pearson's correlation coefficients between the abundance of three genus cyanobacteria and 2-MIB concentration at U8 site

Year	<i>Oscillatoria</i>	<i>Phormidium</i>	<i>Pseudanabaena</i>	Cya. sum
2015	-	-	0.602**	0.632**
2016	-	0.378*	0.350*	0.373*
2017	-	-	-	-

\**p* < 0.05, \*\**p* < 0.01

Cya. sum; Sum of three cyanobacteria (*Oscillatoria*, *Phormidium*, *Pseudanabaena*)



**Fig. 2.** 2-MIB concentration in contrast with abundance of three genus (*Oscillatoria*, *Phormidium*, *Pseudanabaena*) cyanobacteria at U8 site between 2015 and 2017 (different scale).

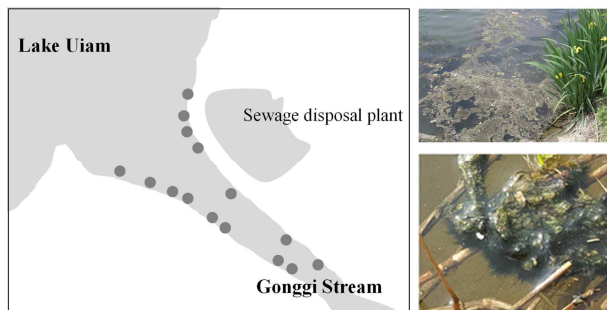
가장 많았으며, 2015년 8월과 2016년 8월, 10월에 많은 세포수가 조사되었다. *Phormidium*은 2015년 8월에 2,700 cells/mL 이상으로 생물량이 최대였으며, *Oscillatoria*는 400 cells/mL 이하의 생물량으로 출현량이 적었다(Fig. 2). 남조류와 2-MIB의 상관관계는 남조류 속별로 상이한 결과를 드러냈다. *Pseudanabaena*는 2-MIB와 2015년( $r=0.602, p<0.01$ )과 2016년( $r=0.350, p<0.05$ )에 양의 상관관계를 가졌으며, *Phormidium*는 2015년( $r=0.378, p<0.05$ )에 상관관계를 나타내었다. 반면에 발생이 적었던 *Oscillatoria*는 2-MIB와 상관관계가 없는 것으로 조사되었다(Table 2). 남조류의 발생이 증가하면 냄새물질의 농도 상승이 동반되며, 본 연구에서 조사된 *Oscillatoria, Phormidium, Pseudanabaena*는 수체 내에서 냄새물질을 유발하는 원인생물로 알려져 있다(Watson, 2003). 미국 캘리포니아 Castaic 호에서 *Pseudanabaena*의 생물량이 증가했을 때 2-MIB 농도가 150 ng/L까지 증가하였으며(Izaguirre and Taylor, 1998), Kim et al. (2015)은 팔당호 수역에서 2-MIB 발생 원인 조류를 *Oscillatoria, Phormidium, Pseudanabaena*로 보고하였다. 공지천 하류에서 *Phormidium, Pseudanabaena*이 많이 발생한 시기인 8월과 10월에 2-MIB의 농도 역시 높게 상승하여 이 시기에 발생한 2-MIB의 농도 증가는 *Phormidium, Pseudanabaena* 등의 남조류 영향인 것으로 판단된다. 다만 방선균에 의한 2-MIB 발생을 예상할 수 있으나 방선균은 주로 봄철인 3월경(Kim et al., 2013)이나 추운 계절(Klausen et al., 2005)

에 증식하는 것으로 알려져 있어 8월과 10월에 발생한 2-MIB 농도와 연관성이 적을 것으로 예상된다.

2015년과 2016년에 발생한 2-MIB는 앞서 언급한 대로 남조류 3속과 동반되어 발생되었다. 반면에 2017년은 수체 내에 *Oscillatoria, Phormidium, Pseudanabaena*의 발생과 생물량이 적었으나 10월에 2-MIB 농도가 110 ng/L 이상으로 크게 증가하였다(Fig. 2). 또한 2017년 2-MIB 농도는 냄새유발 남조류 3속과 상관성이 없는 것으로 조사되었다(Table 2). 부유성 남조류의 생물량은 적었지만 2-MIB 농도가 높았던 2017년 10월에 공지천 하류(U7과 U8 지점)에서 매트 형성을 저서성 남조류가 부상한 모습이 관찰되었다(Fig. 3). 부상한 매트는 짙은 녹색을 띄고 있으며, 하천 퇴적물이 함께 부착되어 떠올라 있었다. 공지천 하류에 분포한 매트는 주로 하천 중앙보다는 수면에 넓게 분포하였으며 하류로 갈수록 군체의 수나 크기가 커져서 물의 흐름에 의해 매트가 중첩된 것으로 판단되었다. 부상한 매트 각각의 크기는 6~10 cm 정도이나 매트들이 모여 큰 덩어리를 이루었으며, 1 m 이상의 크기도 관찰되었다. 부상한 매트의 종 구성은 99% 이상 저서성 남조류인 *Oscillatoria*로 조사되었다. 공지천 하류에서 부상한 남조류 매트(5 cm<sup>2</sup>)를 증류수 400 mL에 희석하여 2-MIB를 분석한 결과 299 ng/L의 높은 농도로 검출되었다. 2-MIB와 같은 냄새 물질을 발생하는 남조류는 부유성 남조류뿐만 아니라 *Oscillatoria* 등과 같은 저서성 남조류도 많이 존재한다. 호수 내 2-MIB의 농도는 저서성 남조류의 성장으로 인하여 짧은 시간 안에 60 ng/L 이상으로 증가될 수 있으며(Izaguirre and Taylor, 2007), Chen et al. (2010)은 호소에서 부유성 남조류의 발생이 적어도 저서성 남조류에 의해 이취미 물질의 농도 증가가 유발될 수 있다고 보고하였다. 따라서 2017년 10월에 높게 측정된 2-MIB 농도는 저서성 남조류에 의한 것으로 추정된다. 다만 자연 서식지에서 저서성 남조류의 정성적인 분석은 가능하나, 퇴적물 표면에서 남조류의 발생을 정량적으로 분석하기는 힘들기 때문에(Pentecost, 1984) 저서성 남조류 생물량과 2-MIB 농도 간의 정량적 상관성 평가는 한계가 있는 것으로 판단된다.

**Table 2.** Comparison of 2-MIB concentration at lake (6 sites) and stream (3 sites) in October, 2017

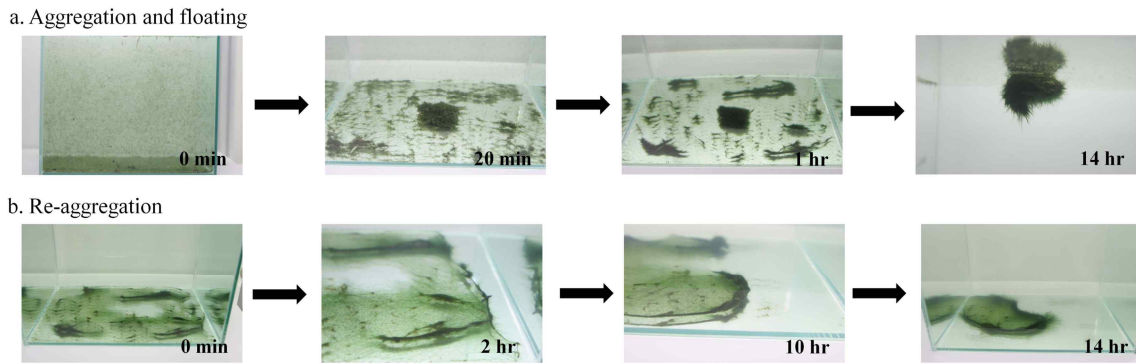
Section	Site	2-MIB (ng/L)
Lake	U1	84
	U2	99
	U3	147
	U4	99
	U5	18
	U6	88
Stream	U7	153
	U8	108
	U9	0



**Fig. 3.** Observed spots of cyanobacteria mats at Gonggi stream (left) and close-up photo of floating mats (right).

### 3.3 남조류 매트의 응집 및 부상

*Oscillatoria*의 응집 및 부상을 관찰하기 위해 BG11 배지가 들어 있는 유리 수조안에 *Oscillatoria* 사상체들을 넣고 분산시킨 후 원형으로 저은 후 가라앉혔다. 정치한지 20분이 지난 후 사상체들은 부드러운 덩어리를 형성하며 응집하기 시작하였다. 사상체들은 실험 시작 1시간이 지난 후에 고밀도의 군체를 형성하고 8~14시간 후에 수면 위로 부상하는 모습을 관찰할 수 있었다(Fig. 4a). 수조 바닥에는 군체가 부상 후에도 많은 양의 *Oscillatoria* 매트가 전체적으로 유리 수조 바닥에 남아 있었다(Fig. 4b). 망상형 구조로 퍼진 사상체들은 재응집하기 시작하였으며, 수조 중앙을 향해 이동하였다. 사상체들은 약 14시간 후 유리 수조 중앙부에 다시 고밀도의 군체를 형성하였다. 배양 실험에서 2-MIB의 농도는 저서성 남조류의 매트가 부상한 이후 높



**Fig. 4.** Aggregation, floating (a) and re-aggregation (b) of *Oscillatoria* in a glass tank (30 × 30 × 30) of BG11 medium under room temperature (25 °C) and light condition (L:D=16:8).

아지는 경향성이 연구되었으며(Kim et al., 2014), 부상한 매트는 냄새물질의 확산에 결정적인 역할을 할 수 있다(Sabater et al., 2003). 실내 실험에서 냄새물질에 대한 실험은 진행되지 않았지만 앞선 결과와 함께 살펴보면 남조류 매트는 서로 응집하여 부상할 수 있으며, 부상한 남조류 매트는 수체 내에 냄새물질을 발생할 가능성을 지닌다. 또한 Fig. 4(b)와 같이 매트가 부상 후에도 바닥면에는 많은 남조류가 존재하여 지속적으로 냄새물질을 유발하는 인자가 될 수 있다.

따라서 의암호의 반복적으로 발생하는 냄새물질을 해결하기 위해서는 수체 내에서 발생한 남조류에 대한 정기적인 조사와 하수처리장 방류수의 오염물질 제어 및 냄새 유발 남조류 발생 시에 상류 댐 방류량을 증가시키는 등 적절한 제어조치가 있어야 한다. 또한 부유성 남조류뿐만 아니라 수체 내가 아닌 하천 바닥층에 서식하는 저서성 남조류도 함께 연구 및 관리되어야 한다.

#### 4. Conclusion

의암호와 공지천 하류에서 발생한 2-MIB와 남조류 생물량과의 관계를 분석하고 저서성 남조류의 생리적 특징을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 공지천 하천 구간에서 발생한 2-MIB의 농도는 0 ~ 153 ng/L의 범위를 보였다. 공지천 상류는 2-MIB가 발생하지 않았으나 의암호와 합류되는 공지천 하류가 153 ng/L로 높은 농도가 검출되어 공지천의 2-MIB는 상류에 영향을 받은 것이 아니라 공지천 하류에서 발생한 것으로 보인다.
- 2) 2015년부터 2017년까지 3년간 공지천 하류에서 출현한 2-MIB 발생 남조류는 3속(*Oscillatoria*, *Phormidium*, *Pseudanabaena*)이었다. 이 3속 중 *Phormidium*, *Pseudanabaena*는 생물량이 많아진 시기에 2-MIB가 증가하며 2-MIB와 상관관계가 높아 공지천 하류의 2-MIB 발생원인 생물로 판단된다.
- 3) 2017년 공지천 하류에서 2-MIB는 110 ng/L 이상 높은 농도가 조사되었으나 부유성 남조류의 발생이 적었다. 반면에 2-MIB 농도가 증가할 시기에 수변에 고농도의 2-MIB 농도를 지닌 저서성 남조류 매트가 조사되어 수체 내에 남

조류의 발생이 없어도 저서성 남조류에 의해 냄새물질이 유발될 가능성이 조사되었다.

- 4) 매트의 부상은 냄새 물질의 발생 신호가 될 수 있으며, 매트의 부상 후에도 바닥면에 많은 저서성 남조류가 존재하므로 냄새 물질을 제어하기 위해 수체 내 남조류뿐만 아니라 저서성 남조류의 관리도 필요한 것으로 판단된다.

#### Acknowledgement

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다(NIER-2018-01-01-074).

#### References

Biddanda, B. A., McMillan, A. C., Long, S. A., Snider, M. J., and Weinke, A. D. (2015). Seeking sunlight: rapid phototactic motility of filamentous mat-forming cyanobacteria optimize photosynthesis and enhance carbon burial in lake Huron's submerged sinkholes, *Frontiers in Microbiology*, 6, 930.

Bowmer, K. H., Padovan, A., Oliver, R. L., Korth, W., and Ganf, G. G. (1992). Physiology of geosmin production by *Anabaena circinalis* isolated from the Murrumbidgee river, Australia, *Water Science and Technology*, 25(2), 259-267.

Chen, Y. M., Hobson, P., Burch, M. D., and Lin, T. F. (2010). In situ measurement of odor compound production by benthic cyanobacteria, *Journal of Environmental Monitoring*, 12(1), 769-755.

Dunlap, C. R., Sklenar, K. S., and Blake, L. J. (2015). A costly endeavor: addressing algae problems in a water supply, *Journal American Water Works Association*, 107(5), 255-262.

Hirose, H. M., Akiyama, T., Imahori, K., Kasaki, H., Kumano, S., Kobayasi, H., Tajahashi, E., Tsumura, T., Hirano, M., and Yamagishi, T. (1977). *Illustrations of the Japanese freshwater algae*, Uchidarokakuho Publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan.

Hoiczuk, E. (2000). Gliding motility in cyanobacteria: observations and possible explanations, *Archives of Microbiology*, 174(1), 11-17.

Hosaka, M., Murata, K., Iikura, Y., Oshimi, A., and Udagawa, T. (1995). Off-flavor problem in drinking water of Tokyo arising from the occurrence of musty odor in a downstream

- tributary, *Water Science and Technology*, 31(11), 29-34.
- Hosaka, M. and Otsuhata, M. (1988). Isolation of 2-methylisoborneol producing two species and geosmin producing one species of attached blue-green algae from Saka river, *Japanese Journal of Water Treatment Biology*, 24(2), 1-11.
- Ishida, H. and Miyaji, Y. (1992). Biodegradation of 2-methylisoborneol by oligotrophic bacterium isolated from a eutrophied lake, *Water Science and Technology*, 25(2), 269-276.
- Izaguirre, G. and Taylor, W. D. (1995). Geosmin and 2-methylisoborneol production in a Major Aqueduct System, *Water Science and Technology*, 31(11), 41-48.
- Izaguirre, G. and Taylor, W. D. (1998). A *Pseudanabaena* species from Castaic lake, California, that produces 2-methylisoborneol, *Water Research*, 32(5), 1673-1677.
- Izaguirre, G. and Taylor, W. D. (2007). Geosmin and MIB events in a new reservoir in Southern California, *Water Science and Technology*, 55(5), 9-14.
- John, D. M., Whittonand, B. A., and Brook, A. J. (2002). *The freshwater algal flora of the British Isles*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kim, J., Kim, G., Yun, C., Park, H., Jung, E., Cha, D., Choi, J., and Son, H. J. (2013). A study on the correlation between odorous compounds, Actinomycetes and algae in drinking water source of Nakdong river, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 35(3), 213-219. [Korean Literature]
- Kim, Y. J., Youn, S. J., Kim, H. N., Hwang, M. Y., Park, J. R., Lee, B. C., and Lee, J. K. (2015). Formation of phytoplankton community and occurrences of odorous compounds for sediment incubation by water temperature, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(5), 460-467. [Korean Literature]
- Kim, Y. J., Youn, S. J., Kim, H. N., Park, E. R., Hwang, M. Y., Park, J. R., Lee, B. C., and Lee, J. K. (2014). Formation of phytoplankton community and occurrences of odorous compounds by sediment iIncubation, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(6), 658-664. [Korean Literature]
- Klausen, C., Nicolaisen, M. H., Strobel, B. W., Warnecke, F., Nielsen, J. L., and Jørgensen, N. O. (2005). Abundance of *actinobacteria* and production of geosmin and 2-methylisoborneol in Danish streams and fish ponds, *FEMS Microbiology Ecology*, 52(2), 265-278.
- Lee, G. H. (2005). *Study of primary production prediction and control for water quality management in lake Euiam*, Ph. D. Thesis, Kangwon National University. [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, S. J., Lim, B. C., Lee, G. H., Jeong, W. G., Hur, B. N., and Hur, I. R. (2016). Long term monitoring for the control of cyanobacterial blooms in lake Uiam, *Journal Korean Society for Environmental Analysis*, 19(2), 109-118. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2015). *Drinking water quality monitoring guideline*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Paerl, H. W. and Millie, D. F. (1996). Physiological ecology of toxic aquatic cyanobacteria, *Phycologia*, 35(6), 160-167.
- Pentecost, A. (1984). Effects of sedimentation and light intensity on mat-forming *oscillatoriaceae* with particular reference to *microcoleus iynghbyaceus* Gomont, *Journal of General Microbiology*, 130, 983-990.
- Persson, F., Heinicke, G., Hedberg, T., Hermansson, M., and Uhl, W. (2007). Removal of geosmin and MIB by biofiltration - An investigation discriminating between adsorption and biodegradation, *Environmental Technology*, 28(1), 95-104.
- Sabater, S., Vilalta, E., Gaudes, A., Guasch H., Muñoz, I., and Romani, A. (2003). Ecological implications of mass growth of benthic cyanobacteria in rivers, *Aquatic Microbial Ecology*, 32(2), 175-184.
- Smith, V. H., Sieber-Denlinger, J., deNoyelles, F., Campbell, S., Pan, S., Randtke, S. J., Blain, G. T., and Strasser, V. A. (2002). Managing taste and odor problems in a eutrophic drinking water reservoir, *Lake and Reservoir Management*, 18(4), 319-324.
- Sugiura, N., Yagi, O., and Sudo, R. (1986). Musty odor from blue-green alga, *Phormidium tenue* in lake Kasumigaura, *Environmental Technology*, 7, 77-86.
- You, K. A., Byeon, M. S., Youn, S. J., Hwang, S. J., and Rhew, D. H. (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(1), 135-144. [Korean Literature]
- Youn, S. J., Kim, Y. J., Kim, H. N., Kim, J. Y., Yu, M. N., Lee, E. J., and Yu, S. J. (2018). Geosmin and morphological characteristics of *anabaena circinalis*, obtained from the Bukhan river, *Journal of Environmental Science International*, 27(1), 27-38. [Korean Literature]
- Yuan, B., Xu, D., Li, F., and Fu, M. (2013). Removal efficiency and possible pathway of odor compounds (2-methylisoborneol and geosmin) by ozonation, *Separation and Purification Technology*, 117, 53-58.
- Wang, Z. and Li, R. (2015). Effects of light and temperature on the odor production of 2-methylisoborneol-producing *Pseudanabaena* sp. and geosmin-producing *Anabaena ucrainica* (cyanobacteria), *Biochemical Systematics and Ecology*, 58, 219-226.
- Watson, S. B. (2003). Cyanobacteria and eukaryotic algal odour compounds: Signals or by-products? A review of their biological activity, *Phycologia*, 42(4), 332-350.
- Watson, S. B. (2004). Aquatic taste and odor: A primary signal of drinking-water integrity, *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 67, 1779-1795.
- Watson, S. B., Ridal, J., Zaitlin, B., and Lo, A. (2003). Odours from pulp mill effluent treatment ponds: the origin of significant levels of geosmin and 2-methylisoborneol (MIB), *Chemosphere*, 51(8), 765-773.