Korean Journal of Environmental Agriculture

Korean J Environ Agric. 2015;34(1):14-20. Korean
Published online 2015 February 21. http://dx.doi.org/10.5338/KJEA.2015.34.1.04

Online ISSN: 2233-4173
Print ISSN: 1225-3537

Research Article

Open Access

대청호에서 Geosmin, 2-MIB의 시간적 · 공간적 분포 특성

김교영[1], 간종범[1], 최인찬[1], 홍선화[1], 이준배[1], 이수형[1], 이재정[1*]

[1]국립환경과학원 금강물환경연구소

Temporal and Spatial Distribution of Geosmin and 2-MIB in the Daecheong Reservoir

Kyo-Young Kim[1], Jong-Beom Khan[1], In-Chan Choi[1], Seoun-Hwa Hong[1], Jun-Bae Lee[1], Soo-Hyung Lee[1] and Jay-Jung Lee[1*] ([1]Geum River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Okcheon-gun 373-804, Korea)

Received: 27 August 2014 / Revised: 17 December 2014/ Accepted: 16 February 2015
Copyright ⓒ 2015 The Korean Society of Environmental Agriculture

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, provided the original work is properly cited.

Abstract

BACKGROUND: Contamination of source water by odorous compounds are one of the problems related to the water quality management, especially in Korea where surface water is used as drinking water. Geosmin (1, 10-*trans*-dimethyl-*trans*-9-decalol) and 2-MIB (2-methyl isoborneol : 1,2,7,7-tetramethyl-exo-bicycloheptan-2-ol) are commonly recognized earthy-musty odor compounds produced by algae causing serious problems to the drinking water purification facilities.

METHODS AND RESULTS: In this study, spatial and temporal distribution of the odor compounds, geosmin and 2-MIB were investigated along with the development of phytoplankton in the Daechung reservoir from July 2012 to October 2013.

CONCLUSION: Concentrations and frequencys of detection of both compounds increased from April to October which were related to cyanobacterial bloom periods. However, concentrations of odor compounds were not related to the number of cyanobacteria. Concentrations of both cyanobacteria and geosmin showed similar trends with depth. Pearson correlation analyses showed that geosmin concentration exhibited significant correlation with the count of *Anabaena macrospora* and *Aphanizomenon flos-aquae*. On the other hand, 2-MIB concentration showed a significant correlation with the count of *Anabaena smithii*.

Key words: Cyanobacteria, Geosmin, Odor compound, 2-MIB

*Corresponding author: Jay-Jung Lee
Phone: +82-43-730-5624; Fax: +82-43-733-9408;
E-mail: picoline@korea.kr

서 론

우리나라는 산업화와 도시화에 따른 물부족 현상을 해결하기 위하여 대청호와 같은 인공호수를 만들었는데 체류시간의 증가, 인간활동에 의한 오염물질 유입으로 조류 발생 등 부영양화가 심화되고 있다(Jeong *et al.*, 2011). 호소의 부영양화로 인해 하절기에 호소생태계의 이화학적, 생물학적 환경변화뿐 아니라 식물플랑크톤의 생장촉진과 함께 독소나 용존 유기화합물이 생성된다. 수중생태계에서 이러한 용존 유기화합물의 생산과 소비는 직 간접적으로 수중 생태계의 생산성에 관련되기 때문에 중요한 생태적 과정이다. 특히 국민 보건의 입장에서 용존 유기화합물이 높은 물은 냄새를 유발한다(Park, 2000).

먹는물에서 발생하는 냄새는 크게 흙·곰팡내, 비린내, 약품내 등 8가지 부류의 냄새로 분류한다(Mallevialle and Suffet, 1987). 이러한 분류는 발생 빈도에 기초하였으며, 냄새의 원인 규명에 소요되는 시간을 최대한 줄이고 해결방안을 찾도록 도와준다. 이 중 2-MIB (2-methylisoborneol)와 Geosmin(1,10-*trans*-dimethyl-*trans*-9-decalol)은 흙곰팡이 냄새로 발생빈도가 가장 많고, 극히 낮은 농도에서 강한 냄새를 유발하며, 전염소투입, 응집, 침전, 여과와 같은 일반적인 정수처리 공정에 의해서는 잘 제거되지 않아 주된 관심의 대상이 되고 있다(Burchet *et al.*, 2004; Watson, 2004).

2-MIB와 Geosmin은 독성물질 및 미량 유해물질 등과 같이 사람에게 유해하지는 않지만 수돗물에 대한 불신감을 초래하고 신뢰를 떨어뜨린다(Tung *et al.*, 2004; Mochida, 2009). 또한 남조세균 발생으로 인한 남조세균 기원의 독성물질 존재를 예측할 수 있다(Watson, 2004). 따라서 수돗물에 대한 소비자 신뢰와 만족도 향상을 위하여 환경부에서는 2009년부터 2-MIB와 Geosmin 항목을 먹는물 수질감시항목으로 추가하였으며, 2010년부터는 권고기준을 20 ng/L 이하로 설정하여 관리 중이다.

원수에서 2-MIB와 Geosmin의 발생 원인으로 조류, 방선균, 수생곰팡이, 점액세균 등이 있으나 대부분 조류에 의한 것이며(Pollak and Berger, 1996), 조류 중 남조세균이 유일하게 2-MIB와 Geosmin을 생성한다고 알려져 있다(Jüttner, 1995).

국내에서는 1991년 연초댐에서 조류에 의한 맛·냄새가 처음 보고되었으며, 1995년 이후에는 주로 흙곰팡이 냄새가 문제가 되고 있다(Bae *et al.*, 2007). 조사 지역인 대청호는 수체의 체류시간이 길고 오염물질이 장기간 체류되어 매년 부영양화 현상이 반복적으로 일어나고, 하절기 남조세균의 발생이 계속되고 있어 높은 농도의 냄새 물질이 분포할 것으로 보인다. 하지만 대청호 원수에서 맛 냄새에 관한 연구는 전무한 실정이다.

본 연구는 냄새 물질의 발생 특성 및 발생 원인을 파악하기 위하여 2012년 7월 2일부터 2013년 10월 29일까지 대청호에서 Geosmin과 2-MIB의 시간적 공간적 분포에 대하여 분석하였다. 특히 남조세균 개체수를 조사하여 남조세균 발생이 Geosmin과 2-MIB의 농도에 미치는 영향을 분석하였다.

재료 및 방법

연구지역

조사지점으로 대청호 상류인 St.1, 매년 하절기에 조류 대발생이 일어나는 St.2, 중류에 위치한 St.3, 대전취수탑이 위치한 St.4, 대청댐이 위치한 St.5 및 청주취수탑이 위치한 St.6 지점을 선정하였다. 조사기간은 2012년 7월 2일～2013년 10월 29일까지 매주 1회 이상 표층을 대상으로 현장 조사 및 시료 채수를 실시하였다.

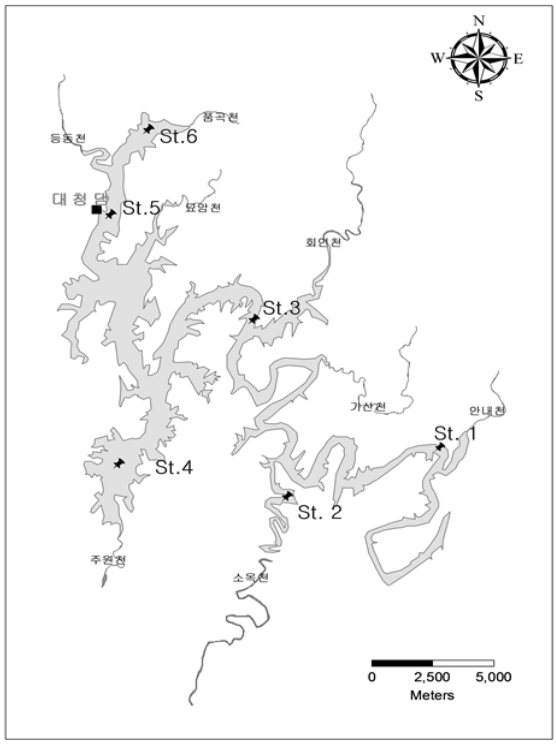

Fig. 1. Map showing sampling stations in the Daecheong Reservoir.

연구방법

Geosmin과 2-MIB는 Varian사의 CP-3800 model의 가스크로마토그래프와 사중극자형(Quadrupole)의 1200 L 질량분석기, CTC Analytics AG사의 COMBI PAL을 사용하여 HS-SPME(Headspace solid phase micro extraction)법으로 분석하였다. SPME fiber는 Supelco사의 fiber(2 ㎝-50/30 ㎛ DVB/Carboxen/PDMS Stableflex)를 270℃에서 1시간 이상 헬륨가스를 흘려 활성화하였고, 염화나트륨(NaCl, Wako)은 450℃ 전기로에서 4시간 동안 가열한 것을 사용하였다. 시료 10 mL를 3 g의 염화나트륨이 들어있는 20 mL vial에 넣고, 내부표준용액(1,2-Dichloro benzene-d4 0.01 ㎍/mL) 20 μL를 첨가한 후 분석하였다.

식물플랑크톤의 현존량은 현장에서 Lugol's solution으로 고정하였으며, 광학현미경(Carl Zeiss, DE/Axio skop 20) 하에서 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 100～200배에서 Sedgwick -Rafter Cell의 방법으로 계수하여 현존량을 단위 체적 당 세포수(cells/mL)로 나타내었다.

결과 및 고찰

계절별 발생 특성

대청호 6개 지점에서 2012년 7월 2일부터 2013년 10월 29일까지 총 395회 조사하였다. 월별로 1월부터 12월까지 12회～60회 조사하였다. St.1, St.2, St.5는 동절기에 12월은 1

Table 1. Monthly summation of concentrations of Geosmin and 2-MIB

Sampling Time	Sampling Number	Geosmin (ng/L)			2-MIB (ng/L)		
		Detection number	Average Concentration	Maximum Concentration	Detection number	Average Concentration	Maximum Concentration
January	14	ND[1)]	ND	ND	1	7	7
February	12	1	4	4	ND	ND	ND
March	21	5	4	6	ND	ND	ND
April	30	14	9	31	8	17	73
May	24	15	13	21	8	18	35
June	24	15	100	963	14	8	18
July	60	42	14	148	11	8	23
August	54	37	39	303	10	13	26
September	57	46	33	249	20	11	29
October	60	49	13	42	25	16	50
November	24	3	3	4	4	7	8
December	15	ND	ND	ND	ND	ND	ND

[1)] ND : not detected

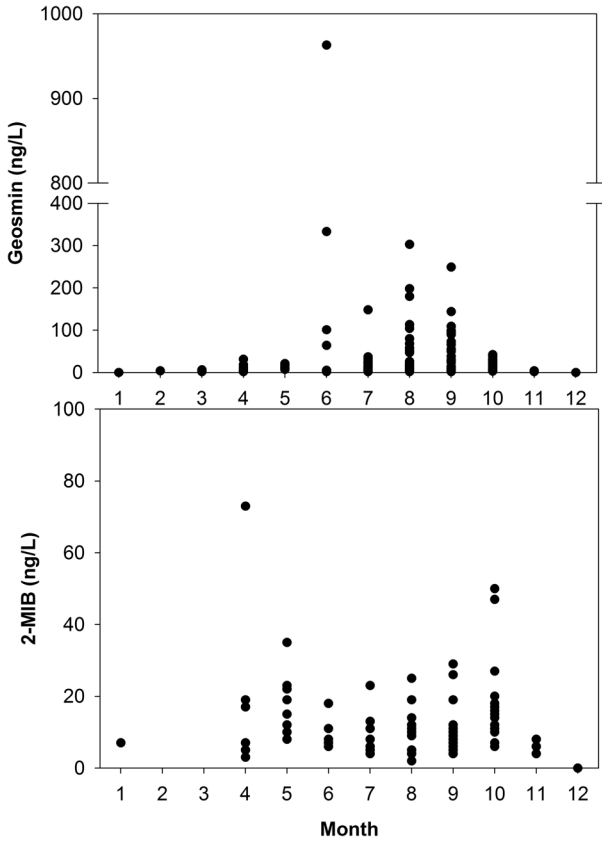

Fig. 2. Geosmin and 2-MIB concentrations monthly.

회, 1월과 2월은 결빙으로 인해 측정하지 않았다. 수온이 낮은 1, 2, 3, 11, 12월에는 86회 조사에서 Geosmin은 9회, 2-MIB는 5회로 검출횟수가 적었다. 검출농도는 Geosmin은

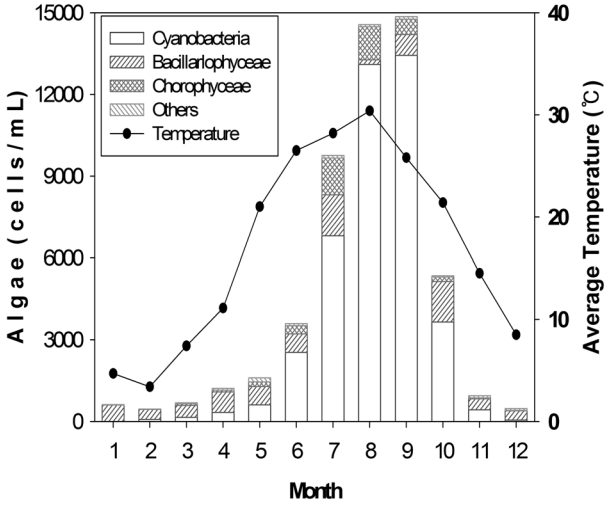

Fig. 3. Algae cell density change monthly.

불검출~4 ng/L, 2-MIB는 불검출~7 ng/L로 낮았다. 수온이 증가하기 시작하는 4월부터 수온이 하락하는 10월까지 냄새 물질의 농도는 권고기준인 20 ng/L를 크게 초과하였다. 이 시기에 Geosmin의 최고농도는 21 ng/L~963 ng/L, 2-MIB의 최고농도는 18 ng/L~73 ng/L를 보였다. 특히 Geosmin은 수온이 20℃ 이상인 6월, 8월, 9월에 평균농도가 권고기준을 초과하였다(Table 1, Fig. 2, Fig. 3).

조사기간 동안 월별 조류개체수의 평균을 구하였다. 총 조류개체수는 6월~10월 높았으며, 남조세균은 4월부터 증가하기 시작하여 11월까지 증식하였다. 남조류 발생 시기에 Geosmin, 2-MIB가 빈번히 발생하였다(Fig. 2).

Geosmin 검출농도는 남조세균의 개체수가 가장 많았던

Table 2. Summation of concentrations of Geosmin and 2-MIB in sampling stations

Sampling Station	Sampling Number	Geosmin (ng/L)			2-MIB (ng/L)		
		Detection number	Average Concentration	Maximum Concentration	Detection number	Average Concentration	Maximum Concentration
St. 1	57	35	6	13	19	10	35
St. 2	57	32	58	963	23	10	25
St. 3	75	38	15	113	15	12	50
St. 4	74	45	19	99	17	19	73
St. 5	57	35	29	144	15	12	20
St. 6	75	42	37	303	14	12	23

8, 9월보다 6월이 더 높았다. Izaguirre 등(1983)은 식물플랑크톤에서 냄새를 발생시키는 것은 최우점종이 아닌 관심의 대상에서 벗어난 종들이 원인일 수 있음을 밝혔다. 따라서 가장 많은 수를 나타낸 조류라고 해서 원인종으로 추정할 수 없다. 하절기 대청호는 일반적으로 *Microcystis* sp.이 우점하고 있지만, *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp, *Oscillatoria* sp., *Phomidium* sp., *Pseudanabaena* sp., *Aphanocapsa* sp., *Aphanothece* sp., *Chroococcus* sp., *Coelospaerium* sp., *Lyngbya* sp., *Merismopedia* sp.이 발생한다. 이 중 일부 종이 냄새물질을 발생하는 것으로 보인다.

지점별 발생 특성

대청호 6개 지점에서 Geosmin이 검출 된 횟수는 211회로 조사횟수의 53% 였다. 2-MIB가 검출 된 횟수는 82회로 Geosmin에 비해 더 낮은 빈도로 검출되었다. Geosmin 검출농도는 St.2에서 평균 58 ng/L의 농도로 가장 높았으며, St.5와 St.6은 평균 29 ng/L, 37 ng/L로 권고기준인 20 ng/L보다 높은 농도를 보였다. 특히, St.2는 2013년 6월 18일 963 ng/L로 최고 검출농도를 보였다. 대청호 유입지점인 St.1을 제외한 모든 지점에서 권고기준을 초과하였다. 2-MIB의 평균값은 감시기준인 20 ng/L을 초과하지 않았다. 하지만 일별로는 13회 감시기준을 초과하였으며, 2013년 4월 23일 St.3은 73 ng/L로 최고값을 기록했다(Table 2). 지점에 상관없이 Geosmin과 2-MIB가 수시로 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

수심별 발생특성

조류 발생시기에 수심에 따른 2-MIB와 Geosmin의 분포 변화를 알아보기 위해 2012년 남조세균의 발생이 많았던 8월 13일 St. 3과 8월 27일 St. 6의 수질과 냄새물질의 농도를 수심별로 조사하였다.

8월 13일 St.3의 경우 수심별로 식물플랑크톤 계수를 실시하였는데, 표층에서 수심 6m 까지는 높은 남조세균 개체수를 유지하다가 수심 9m 이후 급격히 감소하는 것을 알 수 있다(Fig. 4). 엽록소-a와 Geosmin 농도 역시 남조세균 개체수와 비슷하게 감소하는 경향을 보여 이때 발생한 Geosmin은 남조세균 기원성임을 추정할 수 있다. *Microcystis* sp.이 우점 하

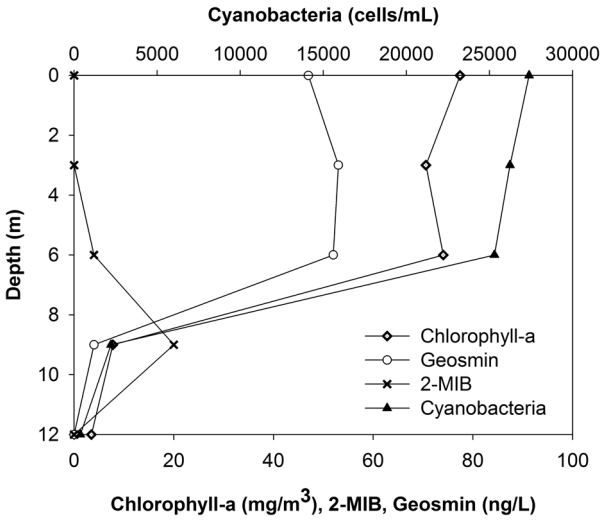

Fig. 4. Vairations of cyanobacteria, cholorophyll *a*, Geosmin and 2-MIB concentrations with depth in St. 3.

였으며, 이와 함께 *Phormidium* sp.의 남조세균이 일부 관찰되었다. Jüttner(1984)는 *Microcystis wesenbergii* 대발생 시기와 *M.aeruginosa*의 배양 시 여러 가지 화합물 중 담배 냄새가 나는 monoterpene을 보고하였고, 다양한 비린내의 원인이 된다고 하였지만 Geosmin과 2-MIB를 생성한다는 보고는 없었다. Ludwig 등(2007)은 Saxonian 강 물에서 *Phormidium* sp.을 분리하였으며, 실험실 조건에서 Geosmin을 생산하는 것을 확인하였다. Iwase와 Abe(2010)는 *Phormidium* 6종을 배양하여 *P.*M-71에서 Geosmin을 생산됨을 보고하였다. 문헌을 통해 *P.amoneum*, *P.breve*, *P.calcicola*, *P.formosum*, *P.inundotum*에서 Geosmin이 생성된다고 보고되었다. 8월 13일 St.3에서 발생한 *Phormidium* sp.은 상층부터 700, 1108, 408, 116 cells/ mL의 개체수가 계수되었다. 이 시기에 발생한 Geosmin은 *Phormidium* sp.이 원인인 것으로 보인다.

2-MIB 농도의 경우 표층과 3m 지점에서는 검출되지 않았고, 6 m에서 증가하기 시작하여 9 m에서 최대 농도를 보였다. 따라서 2-MIB는 남조세균이 아닌 다른 원인에 의해 형성된 것으로 추정된다.

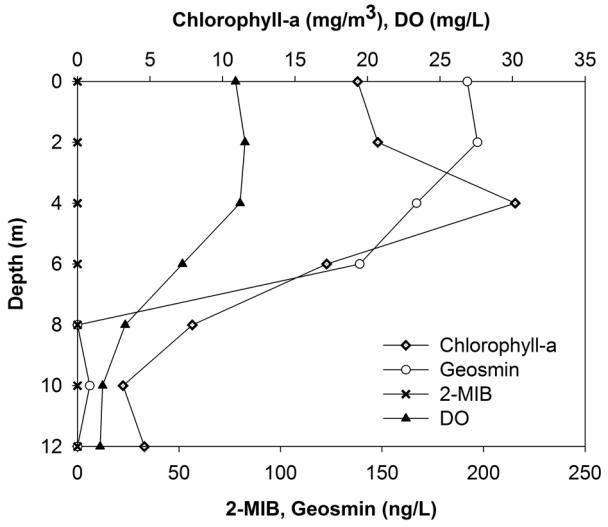

Fig. 5. Vairations of DO, cholorophyll-*a*, Geosmin and 2-MIB concentrations with depth in St. 6.

8월 29일 St. 6 조사에서 수심별 조류속 조사는 실시하지 않았는데, 표층수에는 남조세균이 우점 하였고 *Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Oscillatoria* sp.이 주로 관찰되었다. 수심별로 엽록소-a 농도는 4 m에서 가장 높게 나타났고 그 아래로는 점차 감소하는 경향을 보였다. Geosmin 농도는 표층과 2 m에서 가장 높게 형성되었으며, 6 m까지 점차 감소하다가 8 m 이하에서는 거의 검출되지 않았다(Fig. 5). 따라서 이 경우에도 이전 St.3 조사와 마찬가지로 발생된 Geosmin은 *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp., *Oscillatoria* sp. 등의 남조세균에 의한 것임을 추정할 수 있다. 8월 29일 St.6 조사에서는 2-MIB는 검출되지 않았다.

Table 3. Cyanobacteria species observed in Daecheong reservoir

Algae	Occurrence Species
Anabaena sp.	*A.crassa, A.flos-aquae, A.macrospora, A.smithii, A.aphanizomenoides,* A.sp.
Aphanizomenon sp.	*A.issatschenkoj, A.flos-aquae*
Microcystis sp.	*M.aeruginosa, M,novacekii, M.flos-aquae, M.smithii, M.viridis, M.wesenbergii, M.*sp.
Osicillatoria sp.	*O.limosa, O.tenuis*

담수생태계에서 냄새 물질은 일반적으로 조류 분류군 중 남조세균에 의해 생성되는 것으로 알려져 있다. Geosmin과 2-MIB는 남조세균이 매우 미량으로 생산하는 이차 대사물질이기 때문에 남조세균 중에서도 냄새 물질을 생산하는 종이 있고 비생산종이 있으며, 생산종이라고 하더라도 생육조건이나 환경요인에 따라 생산여부와 생산량에 차이가 있다 (Geum River Environment Research Center, 2012). 하지만 남조세균은 Geosmin과 2-MIB의 주요한 발생원으로 알려져 있으며, 냄새 생산능이 밝혀져 있으므로 냄새물질 농도와 남조세균 수와의 관계에 의해 원인 생물을 추정하는 것이 충분히 가능하다.

2013년 4월 9일에서 2013년 10월 29까지 대청호에서 많이 발생하는 *Microcystis* sp., *Anabaena* sp., *Osicillatoria* sp.,

Table 4. Correlation coefficients between Geosmin, 2-MIB and cyanobacteria species

Cyanobacteria species	N	2-MIB	Geosmin
Microcystis aeruginosa	54	-0.123	-0.084
Microcystis novacekii	31	-0.175	-0.174
Microcystis flos-aquae	40	-0.029	-0.026
Microcystis smithii	13	0.020	-0.116
Microcystis viridis	2	-	-
Microcystis wesenbergii	31	-0.031	-0.172
Microcystis sp.	46	-0.172	-0.036
Anabaena crassa	2	-	-
Anabaena flos-aquae	77	-0.069	0.445
Anabaena macrospora	35	0.006	0.819**
Anabaena smithii	30	0.716**	-0.021
Anabaena aphanizomenoides	27	-0.142	-0.117
Anabaena sp.	7	-0.226	-0.322
Oscillatoria limosa	59	-0.289*	0.171
Oscillatoria tenuis	1	-	-
Aphanizomenon issatschenkoj	39	-0.241	-0.035
Aphanizomenon flos aquae	77	0.197	0.579**

** P<0.01, * P<0.05

Aphanizomenon sp.에 대하여 종 조사를 실시하였다. 대청호에서 동정된 종을 Table 3에 나타냈다.

선행 연구에서 Hishida 등(1988)은 일본 Yodo 강의 정체수역에서 *Anabaena macrospora*에 의해 Geosmin이 발생하였다고 보고하였다. Aoyama 등(1990)은 1987년 8월 Mikawa 호수에서 발생한 냄새물질의 원인을 찾기 위해, 호수에서 분리한 *Anabaena macrospora*를 배양하여 Geosmin 발생을 확인하였다. 1년 후 Aoyama 등(1991)은 bacteria free 상태의 배지에서 *Anabaena macrospora*를 배양하여 Geosmin 생성능을 확인하였다. Van der Ploeg 와 Boyd (1992)는 양어장에서 Geosmin의 발생은 *Anabaena* sp. 4종과 *Aphanizomenon flos-aquae*와 상관관계가 있다고 보고하였다.

본 연구에서 실시한 상관분석은 선행 연구와 일치하였다. 0.01이하의 유의수준에서 *Anabaena macrospora*(0.819), *Aphanizomenon flos-aquae*(0.579)와 유의한 상관성이 있었다(Table 4). 2-MIB도 *Anabaena smithii*(0.716)와 유의한 상관관계가 있으나, 문헌을 통해 확인 할 수 없었으며, 분리 배양을 통해 확인해야 할 것으로 보인다.

결 론

본 연구는 대청호에서 Geosmin과 2-MIB의 시간적 공간적 분포 특성 및 발생 원인을 분석하였다. 계절별로 Geosmin과 2-MIB의 발생은 남조세균이 발생하는 4월～10월에 검출횟수와 농도가 증가하였고, 수온이 낮은 11월～3월에는 검출횟수와 농도가 현저히 감소하였다. 지점에 상관없이 남조세균 발생 시기에 수시로 발생하였다. 냄새 검출 농도는 남조세균의 개체수와 크게 관계가 없었으며, 남조세균 중에 특정 종이 증식할 때 발생하였다. 수심별로는 Geosmin 농도와 남조세균 개체수가 하층으로 갈수록 유사한 경향을 보여, 이 시기에 발생한 Geosmin은 남조세균 기원성임을 예측할 수 있었다. Geosmin 농도는 *Anabaena macrospora*, *Aphanizomenon flos-aquae*의 개체수와, 2-MIB 농도는 *Anabaena smithii*의 개체수와 유의한 상관관계를 보여 냄새물질의 원인종으로 추정할 수 있었다.

References

Aoyama, K., Tomita, B., & Chaya, K. (1990). Growth characteristic and geosmin production of Anabaena macrospora. Japanese Journal of Toxicology and Environmental Health. 36(1), 21-27.

Aoyama, K., Tomita, B., Chaya, K., & Saito, M. (1991). Isolation and Geosmin Production of bacteria-Free Anabaena macrospora, Japanese Journal of Toxicology and Environmental Health, 37(2), 132-136.

Bae, B. U., Shin, H. S., & Choi, J. J. (2007). Taste and odour issues in South Korea's drinking water industry. Water Science & Technology, 55(5), 203-208.

Bruchet, A., Duguet, J. P., & Suffe, I. H. (2004). Role of oxidants and disinfectants on the removal, masking and generation of tastes and odours. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 3(1), 33-41.

Hishida, Y., Ashitani, K., & Fujiwara, K. (1988). Occurrence of musty odor in the Yodo River. Water Science & Technology, 20(8-9), 193-196.

Iwase, S., & Abe, T. (2010). Identification and change in concentration of musty-odor compounds during growth in blue-green algae. Journal of the College of Marine Science and Technology, Tokai University (Japan).

Izaguirre, G., Hwang, C. J., Krasner, S. W., & McGuire, M. J. (1983). Production of 2-methyliso-borneol by two benthic cyanophyta. Water Science & Technology, 15(6-7), 211-220.

Jeong, D. H., Lee, J. J., Kim, K. Y., Lee, D. H., Hong, S. H., Yoon, J. H., Hong, S.Y., & Kim, T. S. (2011). A study on the management and improvement of alert system according to algal bloom in the Daecheong Reservoir. Journal of Environmental Impact Assessment, 20(6), 915-925.

Jüttner, F. (1984). Dynamics of the volatile organic substances associated with cyanobacteria and algae in a eutrophic shallow lake. Applied and environmental microbiology, 47(4), 814-820.

Jüttner, F. (1995). Physiology and bioche-mistry of odorous compounds fron fresh-water cyanobacteria and algae. Water Science Technology, 31(11), 69-78.

Ludwig, F., Medger, A., Börnick, H., Opitz, M., Lang, K., Göttfert, M., & 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.

Mallevialle, J., & Suffet, I. H. (1981). Identification and treatment of tastes and odors in drinking water. In Identification and treatment of tastes and odors in drinking water. AWWA.

Mochida, K. (2009). Evalution of the cytotoxicity of geosmin and 2-methyliso borneol using cultured human, monkey, and dog cells. Biocontrol Science, 14(1), 35-38.

Park, D. K., Oh, H. M., Ahn, C. Y., & Maeng, J. (2000). Effect of selected environmental factors on the production of geosmin in Phormidium sp. The Korean Journal of Microbiology, 36(1), 52-57.

Ploeg, M., & Boyd, C. E. (1991). Geosmin production by cyanobacteria (blue-green algae) in fish ponds at Auburn, Alabama. Journal of the World Aquaculture

Society, 22(4), 207-216.

Pollak, F. C., & Berger, R. G. (1996). Geosmin and Related Volatiles in Bioreactor-Cultured Streptomyces citreus CBS 109.60. Applied and Environmental Microbiology, 62(4), 1295-1299.

Tung, S. C., Lin, T. F., Liu, C. L., & Lai, S. D. (2004). The effect of oxidants on 2-MIB concentration with the presence of cyanobacteria. Water Science & Technology, 49(9), 281-288.

Watson, S. B. (2004). Aquatic taste and odor: a primary signal of drinking-water integrity. Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A, 67(20-22), 1779 -1795.