

경남지역 상수 원·정수의 냄새물질 발생 특성 평가

박미애[†] · 이정준 · 최형섭

경상남도보건환경연구원

Evaluation of 2-Methyl Isoborneol and Geosmin Concentrations of Source and Tap Water from Water Supply Plants in Gyeongnam Area

Mia-e Park[†], Jung-joon Lee, and Hyoung-sub Choi

Gyeongsangnam-do Institute of Health and Environment, Changwon 641-825, Korea

Received September 25, 2014/Revised October 13, 2014/Accepted November 12, 2014

Geosmin and 2-methyl isoborneol (2-MIB) levels in tap water and source water were estimated by comparing algal species and populations for about one year from January to December 2013. The detected concentrations of geosmin ranged from the method detection limit (MDL) to 274.0 (± 17.0) ng/L. The highest level of geosmin was found in the source water of Jinyang-ho lake during the first week of August. The highest level of 2-MIB was observed in the source water of Changam water intake station in September, in the range of MDL to 386.0 (± 46.0) ng/L. Myeongdong and Shindosi water supply plants in Kimhae and Yangsan had good performance with as much as 100% removal efficiencies of odorous substances achieved in September, when odorous substances usually reach the highest level during the year. Chilsu water supply plant was found to require additional care to remove odorous substances because it had a similar level of 2-MIB with that of secondary drinking water regulations. Jinju water supply plant, which did not have activated carbon filtration and ozonation facilities, showed a geosmin level of 40.0 (± 11.7) ng/L, higher than that of secondary drinking water regulations. Cyanobacteria accounted for 47.9%, 48.3%, and 93.4% in Chilsu, Changam, and Mulgeum plants when 2-MIB concentrations were between 56.0 and 386.0 ng/L in September. Standing stocks of the dominant *Microcystis aeruginosa* were also found different depending on the sampling sites: Chilsu, Changam, and Mulgeum showed 18,000, 6,400, and 4,150 cells/mL, respectively. Further studies will be needed to better understand the mechanisms of 2-MIB microbial production because it is still not clear if the dominance of *Microcystis aeruginosa* leads to the highest level of 2-MIB directly.

Key words: 2-MIB, Algae, *Anabena* sp., Chlorophyll-a, Cyanophta, Geosmin, *Microcystis* sp.

1. 서 론

최근 기후 변화에 따른 영향으로 부족한 강수량과 일조시간의 증가 등 환경요인이 변화되어 수돗물의 냄새 발생에 원인이 되는 녹조 현상이 빈번해 지고 있다.¹⁾ 하절기 뿐만 아니라 11월 초겨울까지 유해 남조류의 대량번식과 2차 생산물질에 대한 영향이 증가하고 있다. 현재까지 수계에서 연구된 가장 일반적인 냄새유발 물질인 geosmin, 2-MIB (2-methyl isoborneol)은 보통

사람들이 10 ng/L 이하의 저농도에서도 쉽게 냄새를 감지할 수 있고,^{2,4)} 이러한 냄새 유발물질들의 제거는 응집, 침전 및 여과와 같은 재래식(conventional) 정수 처리 공정에서 처리효율이 아주 낮은 것으로 보고되고 있어,^{5,6,8)} 수돗물의 민원발생의 가장 큰 원인이 되고 있다. Geosmin, 2-MIB 등 냄새물질의 발생은 특정 원인에 기인하기 보다는 복합적으로 발생하는 경우가 대부분이며, 50여종 이상의 남조류에 의한 것으로 알려져 있다.^{7,9)}

[†]To whom correspondence should be addressed.

환경부에서 발표한 ‘2012년 상수도 통계’에 따르면 경상남도 급수인구 3,059,316명이며, 49개 정수장에서 연간 265,065,707 m³를 취수하여 정수하고 있다. 전체 취수량 중 주요 3개 취수원이 (하천표류수 67%, 하천복류수 18%, 댐이나 호소수 24%) 약 91% 이상 차지하고 있다.¹⁰⁾ 경남지역은 상수원으로 오염도가 높은 낙동강수계를 70% 이상 이용하고 있어 냄새물질의 제거에 많은 투자와 관심을 기울여 왔다.¹¹⁾ 49개 정수장 중 낙동강수계 원수를 사용하는 대규모 8개의 정수장에는 이미 고도정수처리 시설이 설치되어 있으나, 진양호를 취수원으로 하는 진주 제1, 제2정수장은 일 생산량이 5만 톤 이상의 대형 정수장이지만 고도정수처리 시설이 설치되어 있지 않고 있다. 또한 하천복류수나 강변여과수를 취수원으로 하는 소규모 정수장에도 고도정수처리시설은 설치되어 있지 않기 때문에 취수원 수 수계별 조류와 냄새물질 발생특성에 대하여 조사하여 보다 효율적이고 과학적인 관리가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 조류의 대량발생으로 정수에서 흙냄새와 곰팡이냄새를 유발하는 geosmin, 2-MIB를 도내 정수장의 정수와 수계별 원수를 대상으로 체계적으로 모니터링하여, 조류종과 발생량에 따른 냄새물질 발생특성과 영향인자와의 상관성을 조사하여 수

돗물의 품질향상을 위한 효율적이고 과학적인 관리에 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사대상 및 조사지점

본 연구는 도내 수계별 8개 정수장의 정수와 원수를 조사대상으로 Fig. 1에 나타내었다.

낙동강수계는 창원 칠서정수장과 취수장, 김해 명동정수장과 창암 취수장, 양산 신도시 정수장과 물금 취수장의 6개 지점으로 선정하였다. 호소수계는 진주 제2정수장과 진양호 취수장, 의령 우곡 정수장과 취수장, 창녕 노단이 정수장과 취수장의 6개 지점을 조사하였다. 하천복류수계는 창원 대산6만 정수장과 취수장, 밀양 교동 정수장과 취수장의 4개 지점을 대상으로 2013년 1월부터 12월까지 월 1회 이상 시료를 채수하였다.

2.2. 냄새물질, 수환경요인 및 식물성 플랑크톤 분석

주요 측정항목 중 pH, DO, 전기전도도 및 수온 등은 현장에서 측정하고, 조류종, 클로로필-a, 식물플랑크톤 현존량, Geosmin, 2-MIB, T-N, T-P 영양염류 등 총 11개 항목을 분석하였다. Geosmin, 2-MIB는 먹는

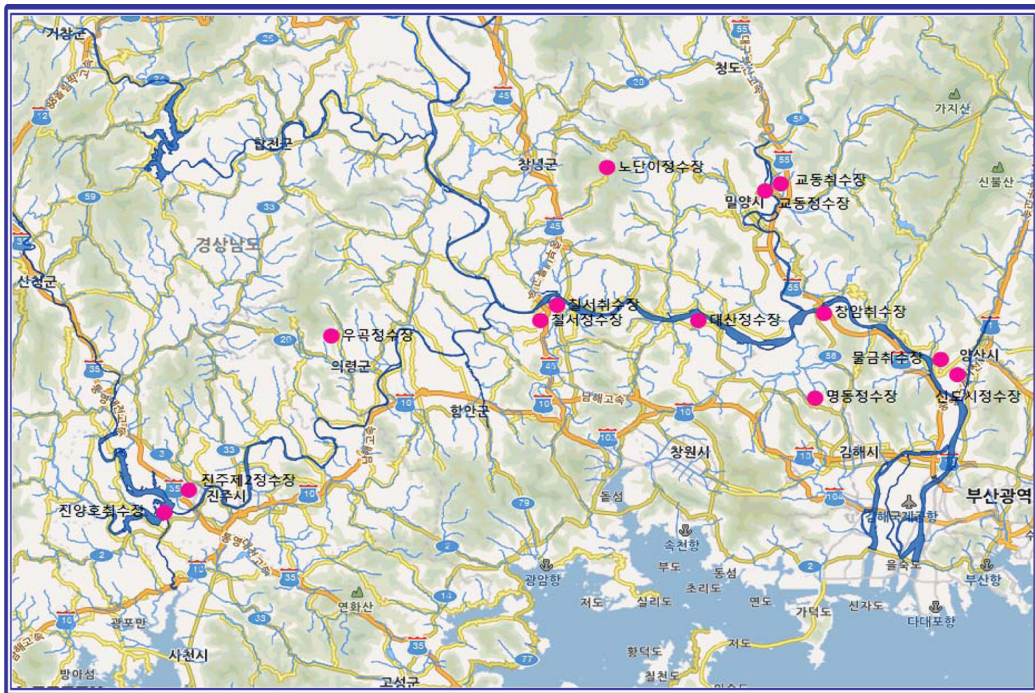


Fig. 1. Sampling Location of the running and source water.

Table 1. Sampling sites of the purification plant and intake station

Site	Water source	Sampling point	Investigation period
Chilseo	River	1 from intake pipe, 1 from post-chlorination	Jan. to Dec. 2013 (Once or more a month)
Changam			
Mulgeum			
Jinyangho			
Nodani			
Ugok	Underground water		
Gyodong			
Daesan			

Table 2. Analytical methods and instruments for each item

Items	Analytical method & instruments
pH, Temperature	pH Metter Method (Orion)
Dissolved oxygen	(Nippon Denshoku, JP/WA-2200K)
electric conductivity	pH Metter Method (Orion)
Algal	Plate Count Method
Chlorophyll-a	Absorptiometric analysis Method (UV/Visible Spectro-photometer (Uvikon 941 plus)
T-N, T-P	Automated Water Analyzer Method (BLTec, AACS-)
Geosmin, 2-MIB	Gas Chromatography Method-MS (Agilent, 6890N/5973, GC-MSD)
TOC	Automated Water Analyzer Method (Elementar, Vario TOC CUBE)

물 수질감시항목 시험방법(14.3 지오스민 및 2-MIB-HS-SPME/기체크로마토그래프-질량분석법)절차에 따라 HS-SPME법으로 분석하였다. 클로로필-a, TOC, T-N, T-P 등은 수질오염공정시험방법에 준하여 Table 2와 같은 방법 및 장비로 분석하였다.^{12,13)}

2.3. 냄새물질 분석 정도관리

환경부에서 고시한 수질오염공정시험기준의 정도보증/정도관리(QA/QC) 방법에 따라 분석방법의 정도관리를 위한 직선성, 방법검출한계, 정량한계, 정확도 및 정밀도 실험을 수행하였다.^{12,13)}

3. 결과 및 고찰

3.1. 상수 원수의 클로로필-a 및 조류 개체수 변화

식물성플랑크톤을 나타내는 클로로필-a의 농도와 출현

조류종별 개체수의 월별 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

2013년 클로로필-a의 농도는 규조류가 우점을 이루었던 3월과 남조류가 우점을 이루었던 8월과 9월에 높은 농도를 나타내었다. 수원별로는 낙동강 표류수가 취수원인 칠서, 창암, 물금은 클로로필-a의 농도가 2.8~77.6 mg/m³로 가장 높았고, 남강수계 진양호는 2.6~27.4 mg/m³ 수준으로 같은 호소수인 노단이와 우곡의 클로로필-a농도 1.6~7.3 mg/m³보다 약 2.4~4.0배 정도 높은 연평균 농도를 나타내었다. 밀양강수계 복류수인 교동원수의 농도는 1.3~6.9 mg/m³ 수준으로 낮은 농도를 나타내었으며, 낙동강 강변여과수인 대신은 0.3~1.3 mg/m³로 조류의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났다.

Table 4의 월별 우점 조류종과 세포수를 비교하여 보면, 3월에 낙동강 수계에 가장 높은 클로로필-a 농도를 나타낸 이유는 갈수기 낙동강에 대량 증식하는 식물플

Table 3. The accuracy and precision results for the analysis of 2-MIB and geosmin

Compounds	2-MIB	Geosmin
Conc. range (ng/L)	0.5~500	0.5~200
Linearity (r2)	0.999	0.998
Method detection limits (ng/L)	0.08	0.07
Limit of quantitation (ng/L)	0.26	0.22
Accuracy (%)	95.5	95.3
Precision (%)	3.5	2.0

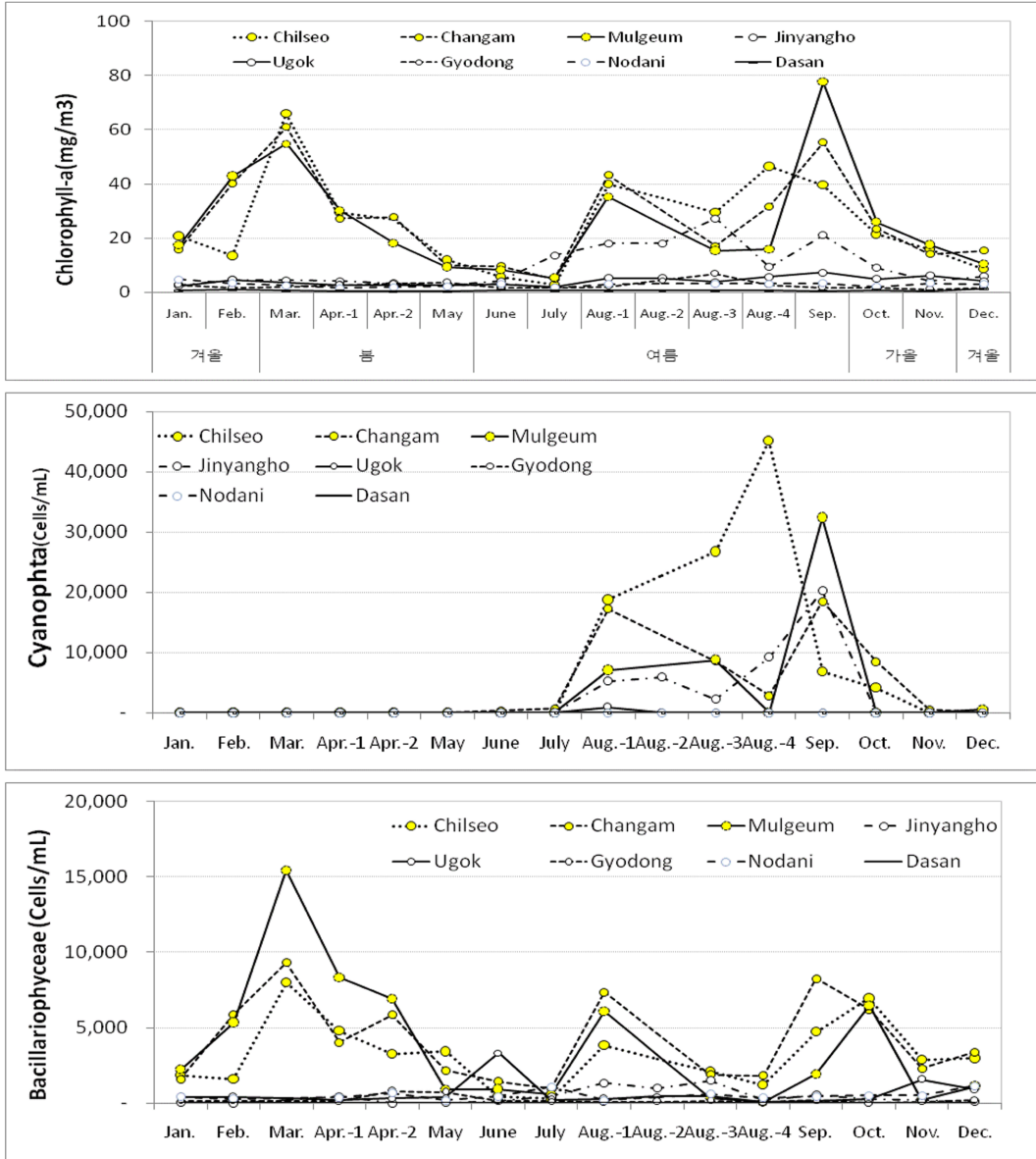


Fig. 2. Cell quantity of major algae types based on monthly data.

랑크톤 중 규조류(현존량이 4,020~8,320 cells/mL로 *Stephanodiscus* 속의 규조류 인 *Cyclotella* sp.가 약 76~88% 구성비)의 원인으로 판단된다. 9월에는 물금에서 가장 높은 클로로필-a 농도를 나타내었으며, 하절기 대량증식한 남조류에 의한 것으로 조사되었다. 이때 남조류 현존량이 6,890~32,480 cells/mL 이었다. 조류종은 *Aphanocapsa* sp. 가구성비 53%로 가장 높았고, *Microcystis aeruginosa*가 41%였으며, 이들은 모두 남

조류로 그 구성비가 약 93%를 나타내었다.

진주 진양호는 봄철 규조류의 영향은 적으나 8월 첫째 주부터 나타난 남조류 *Anabaena flos-aquae*와 *Anabaena planctonica* 영향으로 클로로필-a 농도가 5 mg/m³에서 18.1 mg/m³로 상승하였으며, 8월 셋째 주에는 전체 조류 현존량이 4,290 cells/mL에서 클로로필-a 27.4 mg/m³로 가장 높은 농도를 나타내었다. 9월 첫째 주에는 전체조류 현존량이 23,110 cells/mL로 최

Table 4. Cell quantity of major algae types based on monthly data

									(Unit: cells/mL)
Site Month	Chilseo	Changam	Mulgeum	Jinyangho	Ugok	Nodani	Gyodong	Daesan	
Jan.	<i>Cyclotella</i> sp. 64.9%, 1,260	<i>Cyclotella</i> sp. 44.7%, 850	<i>Cyclotella</i> sp. 36.6%, 930	<i>Monoraphidiu</i> <i>m arcuatum</i> 35.4 % 40	<i>Asterionella</i> <i>formosa</i> 170	<i>Synedra acus</i> 210	<i>Encyonema</i> <i>silesiaca</i> 60		ND
Feb.-1	<i>Cyclotella</i> sp. 51.4%, 940	<i>Cyclotella</i> sp. 65.3%, 4,170	<i>Cyclotella</i> sp. 56.5%, 3,380	<i>Cyclotella</i> sp. 52.3%, 460	<i>Synedra acus</i> 31.9%, 150	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua</i> , 80 18.6%, 80	<i>Encyonema</i> <i>silesiaca</i> 41.2%, 70		ND
Feb.-2	<i>Cyclotella</i> sp. 79.3%, 5,720	<i>Cyclotella</i> sp. 72.9%, 5,300	<i>Cyclotella</i> sp. 73.1%, 6,880	<i>Cyclotella</i> sp. 69.1%, 1,210	<i>Synedra acus</i> 36.8%, 140	<i>Dinobryon</i> <i>divergens</i> 45.9%, 280	<i>Cymbella</i> sp. 70.3%, 450		ND
Mar.-1	<i>Cyclotella</i> sp. 81.36%, 6,960	<i>Cyclotella</i> sp. 76.1%, 5,900	<i>Cyclotella</i> sp. 74.4%, 6,320	<i>Cyclotella</i> sp. 70.5%, 980	<i>Cymbella</i> sp. 24.3%, 90	<i>Cymbella</i> sp. 40.0%, 120	<i>Cymbella</i> sp. 58.4%, 450		-
Mar.-2	<i>Cyclotella</i> sp. 84.5%, 13,600	<i>Cyclotella</i> sp. 70.4%, 7,080	<i>Cyclotella</i> sp. 75.7%, 6,620	-	-	-	-		-
Apr.-1	<i>Cyclotella</i> sp. 65.6%, 6,240	<i>Cyclotella</i> sp. 51.5%, 3,180	<i>Cyclotella</i> sp. 49.4%, 3,560	<i>Cyclotella</i> sp. 30.6%, 300	<i>Cyclotella</i> sp. 19.7%, 140	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 42.4%, 140	<i>Cymbella</i> sp. 23.1%, 280		ND
Apr.-2	<i>Cyclotella</i> sp. 56.6%, 5,070	<i>Cyclotella</i> sp. 64.7%, 4,500	<i>Cyclotella</i> sp. 44.0%, 2,060	-	-	-	-		-
May	<i>Fragilaria</i> <i>crotonensis</i> 26.6%, 970	<i>Fragilaria</i> <i>crotonensis</i> 37.5%, 930	<i>Cyclotella</i> sp. 48.3%, 700	<i>Rhodomonas</i> sp. 63.4%, 450	<i>Dinobryon</i> <i>divergens</i> 29.5%, 280	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua m.</i> <i>spiralis</i> 34.2%, 130	<i>Cyclotella</i> sp. 61.0%, 500		ND
June	<i>Pediastrum</i> <i>duplex</i> 30.5%, 320	<i>Fragilaria</i> <i>crotonensis</i> 17.5%, 520	<i>Rhodomonas</i> sp. 29.0%, 970	<i>Rhodomonas</i> sp. 49.6%, 660	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 86.5% , 2,800	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua m.</i> <i>spiralis</i> 49.1%, 260	<i>Navicula</i> sp. 56.3%, 90		ND
July	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua</i> 33.3%, 100	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua</i> 24.4%, 410	<i>Aulacoseira</i> <i>granulata</i> 28.0%, 260	<i>Cryptomonas</i> <i>ovata</i> 16.0%, 240	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 56%, 140	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 50.9%, 550	<i>Navicula</i> sp. 38.5%, 50		ND
Aug.-1	<i>Aphanizomeno</i> <i>n flos-aquae</i> 60.9%, 15,500	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i> 47.8%, 12,540	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i> 27.3%, 4,450	<i>Anabaena flos-</i> <i>aquae</i> 35.9%, 2,560	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i> 68.3%, 950	<i>Cyclotella</i> sp. 50.0%, 100	<i>Scenedesmus</i> <i>ecornis</i> 88.9%, 960		ND
Aug.-2	-	-	-	<i>Anabaena flos-</i> <i>aquae</i> 71.0%, 5,180	<i>Cyclotella</i> sp. 40.5%, 320	-	-		-
Aug.-3	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i> 58.3%, 18,800	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i> 52.2%, 6,400	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i> sp. 43.7%, 4,150	<i>Anabaena flos-</i> <i>aquae</i> 49.0%, 2,100	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 26.0%, 200	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 48.4%, 300	<i>Scenedesmus</i> <i>ecornis</i> 85.7%, 960		ND
Aug.-4	<i>Pseudanabaen</i> <i>a limnetica</i> 70.7%, 35,060	<i>Aphanocapsa</i> sp. 30.6%, 1,970	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i> 43.7%, 4,150	<i>Anabaena</i> <i>crassa</i> 33.9%, 3,350	<i>Eutetramorus</i> <i>globosus</i> 81.1%, 600	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 50.0%, 220	<i>Scenedesmus</i> <i>ecornis</i> 98.6%, 6,120		ND
Sep.	<i>Aulacoseira</i> <i>granulata</i> 23.3%, 3,360	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i> 41.7%, 12,600	<i>Aphanocapsa</i> sp. 52.6%, 18,280	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i> 77.0%, 17,800	<i>Staurastrum</i> sp. 74.1%, 1,000	<i>Cyclotella</i> sp. 89.4%, 420	<i>Scenedesmus</i> <i>ecornis</i> 45.7%, 160		ND
Oct.	<i>Aphanocapsa</i> sp. 33.5%, 4,200	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i> 29.5%, 4,800	<i>Aulacoseira</i> <i>granulata</i> 28.6%, 2,140	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 37.1%, 650	<i>Staurastrum</i> sp. 30.4%, 240	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 55.8%, 290	<i>Scenedesmus</i> <i>ecornis</i> 80.0%, 160		ND
Nov.	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua m.</i> <i>spiralis</i> 33.1%, 1,250	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua m.</i> <i>spiralis</i> 42.4%, 1,390	<i>Rhodomonas</i> sp. 28.1%, 360	<i>Rhodomonas</i> sp. 44.3%, 430	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 63.3%, 1,120	<i>Cyclotella</i> sp. 49.1%, 260	<i>Rhodomonas</i> sp. 35.7%, 50		ND
Dec.	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua m.</i> <i>spiralis</i> 24.8%, 1,170	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua m.</i> <i>spiralis</i> 21.5%, 860	<i>Rhodomonas</i> sp. 22.2%, 560	<i>Aulacoseira</i> <i>alpigena</i> 37.9%, 830	<i>Cyclotella</i> sp. 35.5%, 430	<i>Aulacoseira</i> <i>ambigua</i> 44.0%, 550	<i>Synedra acus</i> 22.2%, 60		ND

고 농도를 나타낸 반면에 클로로필-a 농도는 21.2 mg/m³로 떨어졌다. 이와 같은 결과는 세포체적에 관한 연구결과에서 클로로필-a와 세포 체적과의 상관계수가 0.957로 높은 상관성을 갖기 때문으로¹⁴⁾ 출현 조류종의 개체수 보다는 체적과 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 즉 *Microcystis aeruginosa* 속의 평균체적 58.2 μm³/cell 대비 *Anabaena* sp. 속의 평균체적은 252.2 μm³/cell로 약 4배 이상 크기 때문에 *Anabaena* sp. 속의 클로로필-a 기여도가 높아진 것으로 설명할 수 있다.

3.2. 수계별 Geosmin, 2-MIB 발생농도 비교

도내 수계별 8개 정수장의 geosmin과 2-MIB농도를 Table 5과 6에 나타내었다. 낙동강수계는 geosmin ND~48.3(±9.2) ng/L, 2-MIB ND~386.0(±60.5) ng/L 수준으로 검출되었으며, geosmin은 칠서에서, 2-MIB는 창암에서 9월이 가장 높은 농도를 나타내었다. 호소수계는 geosmin ND~274.0(±57.4) ng/L, 2-MIB ND~16.3(±3.3) ng/L 수준으로 검출되었으며, geosmin, 2-MIB 모두 진양호에서 8월 둘째 주가 가장 높은 농도를 나타내었다. 하천복류수계는 geosmin ND~7.3(±1.4) ng/L, 2-MIB ND~3.0(±1.0) ng/L 수준으로 검출되었으며, geosmin, 2-MIB 모두 교동에서 가장 높은 농도를 나타내었다. 전체 수계별로 평가해 보면 geosmin은 호소수계인 진양호에서, 2-MIB는 낙동강수계의 창암에

서 가장 높은 농도 분포를 나타내었다. 하천복류수계 중 강변여과수를 취수원수로 하는 창원 대신6만 정수장은 geosmin, 2-MIB 모두 검출되지 않아 냄새물질에 대하여 가장 깨끗하고 안전한 원수로 조사되었다.

진주 제2 정수장 정수의 geosmin ND~40.0(±11.7) ng/L, 2-MIB ND~8.0(±3.1)수준으로 8월 첫째 주가 가장 높은 농도를 나타내었으며, 먹는물 수질감시항목 권고기준(20 ng/L)을 초과하였다. 8월 첫째 주 정수의 2-MIB농도는 8.0 ng/L를 나타낼 때 같은 날 원수의 농도가 3.0 ng/L로 낮게 나타난 이유는 진양호 취수장에서 정수과정을 거치는 동안 체류 시간이 발생하게 되므로, 정수처리되기 전 원수의 수질이 더 높을 경우 정수의 농도가 원수의 2-MIB농도보다 높게 나타날 수도 있다. 제2정수장은 비교적 원수의 수질이 좋은 남강댐을 상수원으로 이용하기 때문에 1일 생산량 5만 톤 이상의 정수장 중 활성탄여과 및 오존처리 등 고도정수처리시설이 설치되어 있지 않은 정수장의 급속여과시설만으로는 geosmin과 2-MIB의 제거가 어려웠다. 진양호 원수는 낙동강 하천수계에 비하여 T-N, T-P 등의 수질이 상대적으로 좋긴 하나 이미 조류가 성장하기에 적합한 부영양화 조건이 모두 갖추어진 호수이기 때문에 하절기 수회현상을 막기 어려우므로 냄새물질에 대한 관리 방안이 필요하다. 특히 유해 남조류가 대량번식하는 하절기에는 체계적인 진양호 수질관리가 필요하고 나아

Table 5. Concentration of geosmin and 2-MIB in source water

(Unit: ppt)

site days	Chilseo		Changam		Mulgeum		Jinyangho		Nodani		Ugok		Gyodong		Daesan	
	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.
1/24	ND	1.8	ND	1.8	ND	1.8	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2/13	ND	1.0	ND	1.8	ND	1.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3/19	3.0	16.0	3.6	19.4	2.2	18.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4/3	ND	4.8	ND	5.1	ND	3.6	ND	1.5	ND	ND	ND	ND	ND	7.3	ND	ND
4/16	3.4	9.1	2.7	6.3	ND	7.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5/8	4	11	2	11	ND	9.0	ND	3.3	ND	ND	ND	4.0	ND	2.1	ND	ND
6/4	2.2	5.9	4.3	6.5	4.5	5.9	ND	2.4	ND	ND	ND	4.9	2.4	1.0	ND	ND
7/10	2.4	2.7	ND	5.0	2.8	4.9	2.1	4.4	5.3	ND	ND	1.3	ND	ND	ND	ND
8/7	10	3.0	27	13	29.0	5.0	3	274	3.0	1.0	ND	ND	3.0	1.0	ND	ND
8/13	-	-	-	-	-	-	5.1	217	2.4	1.1	-	-	-	-	-	-
8/21	47.1	48.3	78.8	19.9	103	22.3	4.0	191	3.4	ND	ND	ND	2.7	ND	ND	ND
8/28	18.7	32.1	6.0	4.6	6.6	5.0	16.3	60.8	3.2	ND	ND	ND	2.1	ND	ND	ND
9/11	56	19	386	6.0	135	4.0	8.0	6.0	ND	ND	ND	3.0	ND	ND	ND	ND
10/11	7.0	3.0	23	6.0	14	3.0	9.0	4.0	ND	ND	ND	1.0	ND	ND	ND	ND
11/7	9.0	6.5	2.7	8.8	2.6	10.1	ND	5.3	9.7	ND	ND	ND	2.3	2.1	ND	ND
12/4	3.8	2.8	8.4	1.6	9.0	2.1	ND	5.0	6.9	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Mean	12.8	11.2	36.4	7.8	20.8	6.9	3.6	37.7	2.7	0.4	0.2	1.2	1.1	1.2	ND	0
Max	56	48.3	20	19.9	135	22.3	16.3	274	9.7	1.1	2	4.9	3.0	7.3	0.5	0.4

Table 6. Concentration of geosmin and 2-MIB in tap water

site days	(Unit: ppt)															
	Chilseo		Myeongdong		Sindosi		Jinju 2		Nodani		Ugok		Gyodong		Daesan	
	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.	2-MIB	Geos.
1/24	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2/13	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
3/19	3.0	10.2	ND	1.5	ND	ND	ND	4.0	-	-	-	-	-	-	-	-
4/03	ND	2.3	ND	ND	ND	ND	ND	1.4	ND	ND	ND	ND	ND	7.3	ND	ND
4/16	4.5	5.9	ND	ND	ND	ND	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5/08	3.0	5.0	ND	ND	ND	ND	ND	3.7	ND	4.0	ND	ND	ND	7.1	ND	ND
6/04	ND	2.0	ND	ND	ND	ND	ND	2.4	ND	1.7	6.1	ND	ND	2.0	ND	ND
7/10	ND	2.4	ND	ND	ND	ND	ND	2.5	3.6	ND	ND	3.0	1.0	2.6	ND	ND
8/07	ND	2.0	ND	ND	ND	ND	8.0	40.0	ND	ND	2.2	1.2	2.0	3.0	ND	ND
8/13	-	-	-	-	-	-	3.2	18.8	-	-	-	-	-	-	-	-
8/21	16.3	1.9	ND	ND	ND	ND	5.5	27.0	ND	ND	2.3	ND	3.0	2.2	-	-
8/28	7.8	1.4	ND	ND	ND	ND	7.2	5.0	ND	ND	2.7	ND	ND	ND	ND	ND
9/11	19.0	1.0	ND	ND	ND	ND	5.0	3.0	ND	ND	ND	ND	ND	2.0	ND	ND
10/11	2.0	1.0	ND	ND	ND	ND	8.0	3.0	ND	1.0	ND	ND	ND	2.0	ND	ND
11/07	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.6	1.8	ND	ND	9.3	ND	ND	1.2	ND	ND
12/04	2.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.9	ND	ND	6.4	ND	ND	1.0	ND	ND
Mean	3.9	2.3	0.2	0.1	ND	ND	2.6	7.6	ND	0.6	2.4	ND	1.1	2.1	ND	ND
Max	19.0	10.2	0.9	1.5	0.8	0.3	8.0	40.0	ND	4.0	9.3	1.2	3.0	7.1	ND	ND

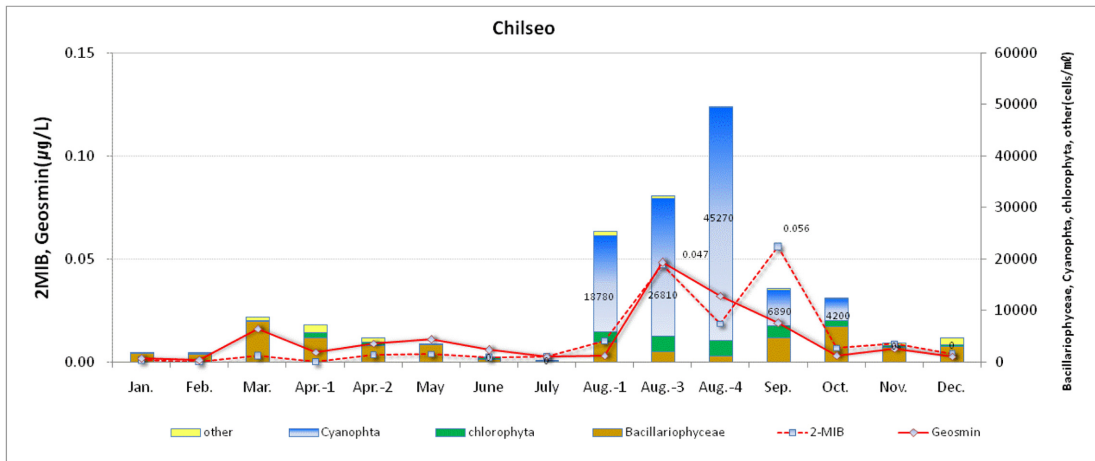


Fig. 3. Variations of geosmin, 2-MIB, algae types and cell quantity in Chilseo.

가 고도정수처리시설의 설치도 고려되어야 한다.

3.2.1. 낙동강수계의 조류발생과 Geosmin, 2-MIB 농도 변화

1) 칠서 취수장

창원 칠서취수장 원수의 조류발생에 따른 geosmin과 2-MIB농도를 Fig. 3에 나타내었다. Geosmin은 8월 셋째 주에, 2-MIB는 9월에 가장 높은 농도를 나타내었다.

8월 셋째 주의 우점 조류종은 *Microcystis aeruginosa* 종으로 전체 출현 조류현존량의 약 58.3%를 나타내었으며, 냄새물질의 원인 조류로 알려진 남조류가 83%, geosmin의 생성 원인조류로 알려진 *Anabaena* sp.종은 7.5%의 구성비를 나타내었다. 2-MIB가 56.0 ng/L로 가장 높았던 9월은 규조류 *Aulacoseira granulata* 종이 3.360 cell/mL, 23.3% 우점 조류종으로 다른 지역과 다른 양상을 나타내었다. 그리고 남조류의 현존량이 최

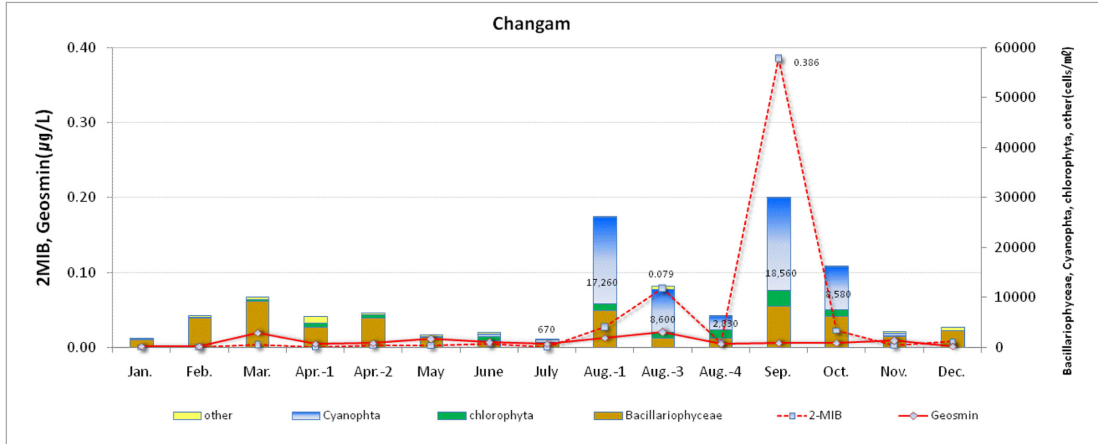


Fig. 4. Variations of geosmin, 2-MIB, algae types and cell quantity in Changam.

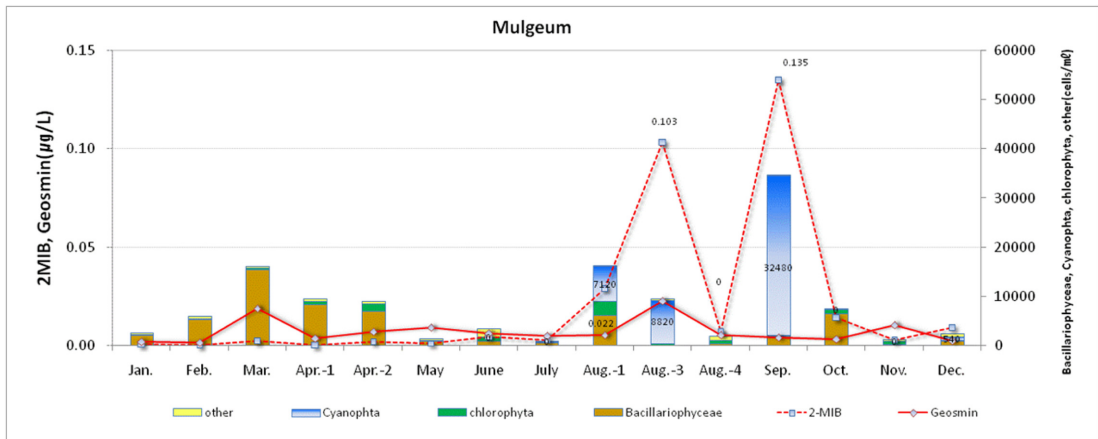


Fig. 5. Variations of geosmin, 2-MIB, algae types and cell quantity in Mulgeum.

고였던 8월 넷째 주와 비교하면 현저하게 떨어진 것을 알 수 있다. 특히 *Pseudanabaena limnetica*는 전주에 35,060 cell/mL에서 1,790로 감소하였고, *Aphanizomenon gracile*은 2,900 cell/mL에서 1,000 cell/mL로 감소하였다. 이는 8월 말 경남지역에 약 10mm 정도 내린 강수의 영향으로 수온이 낮아지고 남조류의 생육 환경이 나빠지면서 냄새물질인 2-MIB 생산량은 높아진 것으로 판단된다.⁹⁾ 그러나 2-MIB의 원인 조류종을 찾는 데는 조류에 대한 더 많은 조사와 연구가 필요하며, 월별 조류종별 개체수와 이취미물질의 농도를 살펴보면 남조류의 개체수는 8월이 가장 높은 것으로 나타났으나, 2-MIB는 조류의 개체수와 상관없이 9월에 높게 나

타나 냄새의 강도가 남조류의 개체수와 항상 일치하는 것은 아니라는 선행연구의 주장과 유사한 것으로 조사되었다.^{15,16,18)}

2) 창암 취수장

김해 창암취수장 원수의 조류발생에 따른 geosmin과 2-MIB농도를 Fig. 4에 나타내었다. Geosmin은 8월 셋째 주에, 2-MIB는 9월에 가장 높은 농도를 나타내었으며, 칠서 원수와 마찬가지로 남조류에 기인하여 하절기에 강한 냄새물질이 생성되는 것으로 조사되었다. 일반적으로 냄새물질과 관련된 조류로 알려진 남조류는 8월 셋째 주에 70.2%, 9월에 48.3%로 8월이 높았으나 전체 조류 현존량은 9월이 30,200 cells/mL로 8월 셋

째 주보다 약 2.5배 이상 높았으며, 남조류의 개체수도 약 2.2배 이상 많아 냄새 물질도 9월이 가장 높아 칠서와 차이를 나타내었다. 9월은 *Microcystis aeruginosa* (현존량 12,600 cells/mL, 구성비 32.8%), *Aphanocapsa* sp.(현존량 4,560 cells/mL, 구성비 11.9%), *Oscillatoria* sp.(현존량 1,240 cells/mL)등 모두 5종의 남조류가 전체 조류 현존량의 약 48.3%로 낮은 구성비를 나타내므로 고농도 2-MIB가 남조류에서 기인한다고 단순 추정할 수 없기 때문에 2-MIB 발생 메카니즘에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 고도정수처리시설이 설치된 명동정수장은 고농도 2-MIB농도(386.0 ng/L)가 유입되어도 정수처리 시 냄새물질이 100% 제거되었으므로 냄새물질 관리가 우수한 것으로 조사되었다.

3) 물금 취수장

양산 물금취수장의 원수의 조류발생에 따른 geosmin과 2-MIB농도를 Fig. 5에 나타내었다. Geosmin은 8월 셋째 주에, 2-MIB는 9월에 가장 높은 농도를 나타내었다. 칠서, 창암과 마찬가지로 남조류에 기인하여 하절기에 강한 냄새물질이 생성되는 것으로 조사되었다. 물금원수의 조류 최대 냄새물질농도를 나타낸 9월은 남조류의 우점율이 93.4%로 가장 높았으며, 조류종의 경우는 Fig. 5에 나타낸 그래프에서와 같이 8월 넷째 주에는 남조류가 나타나지 않았다. 이때의 출현 조류종은 *Aphanocapsa* sp. 종이 최대 우점조류로 구성비가 약 52.6%로 나타났다. 이와 같은 결과는 2012년 국립환경과학원에서 발표한 금강본류 3개 지점의 geosmin과 2-MIB는 *Aphanocapsa* sp. 종과 상관도가 높다는 조사결과와 유사한 것으로 나타났다. 물금의 경우 만약

Aphanocapsa sp. 종이 냄새의 원인 조류종이라 추정한다면 geosmin 보다는 2-MIB와 관련이 있는 것으로 추정할 수 있다.¹⁶⁾

3.2.2. 호소수계의 조류발생과 Geosmin, 2-MIB 농도 변화

1) 진양호 취수장

진주 진양호 취수장 원수의 조류발생에 따른 geosmin과 2-MIB농도를 Fig. 6에 나타내었다. Geosmin은 8월 첫째 주에 고농도 발생이 있었고, 2-MIB는 낙동강수계와 달리 고농도 사례는 발생하지 않았다. 8월 첫째 주의 주요 출현 조류종은 *Anabaena flos-aquae*가 우점종으로 2,560 cells/mL이었으며, *Anabaena planctonica* 1,380 cells/mL 등 남조류가 74.1%의 구성비를 나타내었다. *Anabaena* sp. 종의 구성비가 8월 첫째 주가 55.2%, 둘째 주는 81.9%, 셋째 주는 54.1%, 넷째 주는 94% 이상으로 *Anabaena* sp. 종은 geosmin의 원인물질로 추정할 수 있으나,^{16,17)} 9월 초에는 남조류 개체수가 가장 높은 반면에 geosmin의 농도는 오히려 6.0 ng/L로 감소하였다. 이와 같은 현상은 냄새물질이 단순히 남조류의 개체수에 비례하지 않고 남조류의 성장단계에 따라 다르게 나타나고, 남조류가 발생하여 유도기를 거쳐 지수성장기와 정체기, 그리고 사멸기 등 성장단계에 따라 냄새물질 발생에 영향을 준다고 보고된 바있다.^{9,22)} *Anabaena* sp.종은 최고 농도이나 geosmin 농도는 낮아지는 결과는 팔당댐을 대상으로 낙동강물환경연구소의 선행연구에서도 찾아볼 수 있었다.¹⁶⁾ 이와 같이 냄새 물질 발생조건은 여전히 불명확한 점이 많

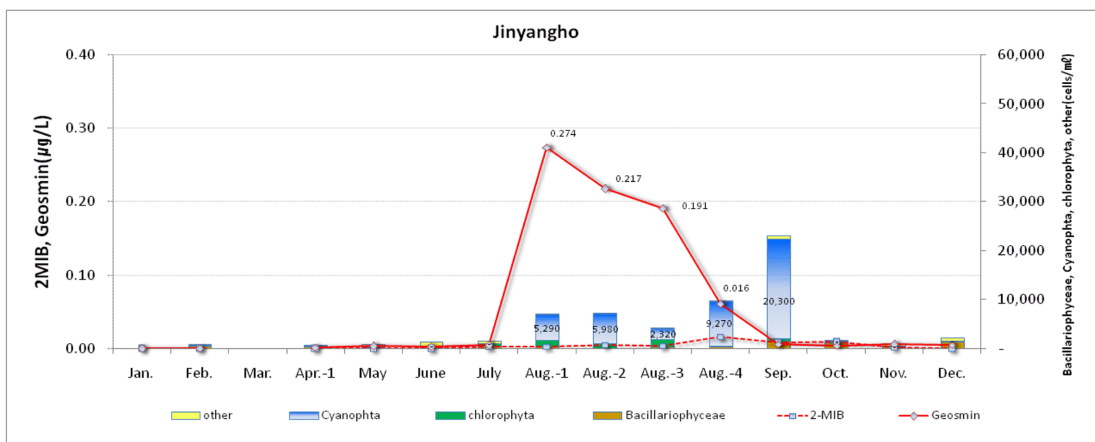


Fig. 6. Variations of geosmin과 2-MIB, algae types and cell quantity in Jinyangho.

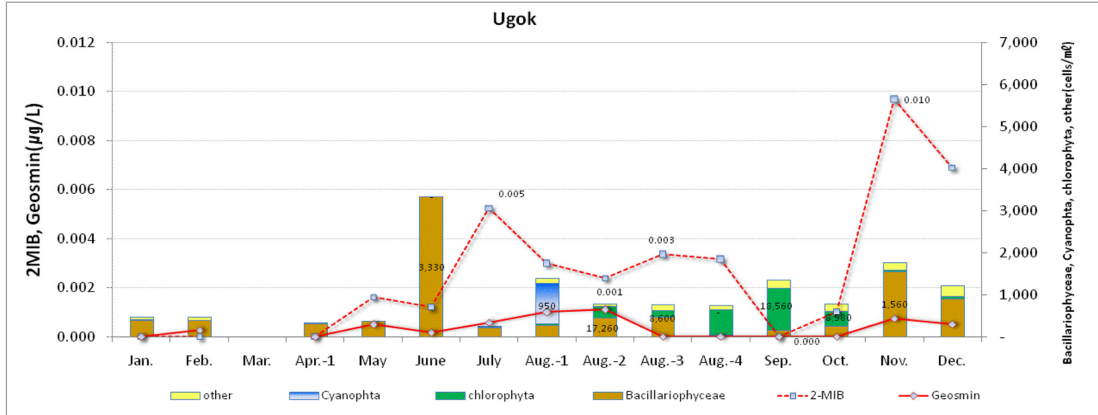


Fig. 7. Variations of geosmin과 2-MIB, algae types and cell quantity in Ugok.

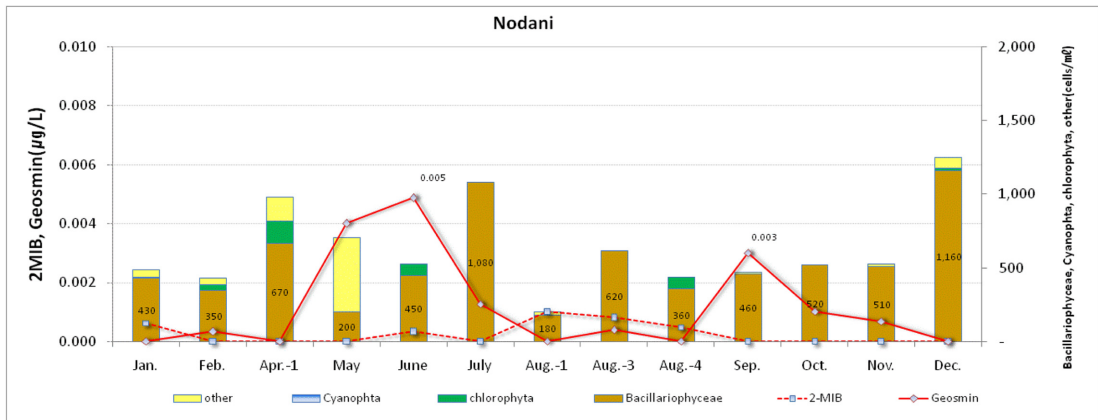


Fig. 8. Variations of geosmin과 2-MIB, algae types and cell quantity in Nodani.

다. 냄새물질 발생에 대한 보다 명확한 규명을 위해서는 원인생물의 생태적 특성 및 이취물질 발생메카니즘 등에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

2) 우곡 취수장

우곡 취수원수의 조류발생에 따른 geosmin과 2-MIB 농도 변화를 Fig. 7에 나타내었다.

우곡은 주로 규조류 *Aulacoseira alpigena*가 주로 우점하였으며, 6월에 3,330 cells/mL로 가장 높은 조류 개체수를 나타내었으나 냄새물질의 농도에 영향을 미치지 않았다. 냄새물질의 주원인으로 알려진 남조류도 8월 첫째 주에만 발생하였다. 10월에 2-MIB가 10 ng/L로 가장 높게 나타난 이유는 조류의 생육환경이 나빠질수록 냄새물질의 생산량이 증가한다는 기존의 연구와 일치하는 것으로 나타났다.⁹⁾

3) 노단이 취수장

노단이 취수원수의 조류발생에 따른 geosmin과 2-MIB의 농도변화를 Fig. 8에 나타내었다. 노단이 원수는 하절기의 최고 수온이 20.8로 낮았기 때문에 남조류의 서식은 없었으며, *Aulacoseira alpigena* 종과 *Cyclotella* sp. 종이 우점하였으나 그 개체수는 매우 적은 것으로 나타났다.

3.2.3. 하천복류수계의 조류발생과 Geosmin, 2-MIB 농도변화

고동취수장은 수온이 높은 하절기에도 냄새물질의 원인 조류인 남조류는 검출되지 않았으며, 4월에 geosmin 7 ng/L로 가장 높은 농도를 나타내었고, 2-MIB의 농도도 연중 3 ng/L를 초과하지 않았다. 강변여과수를

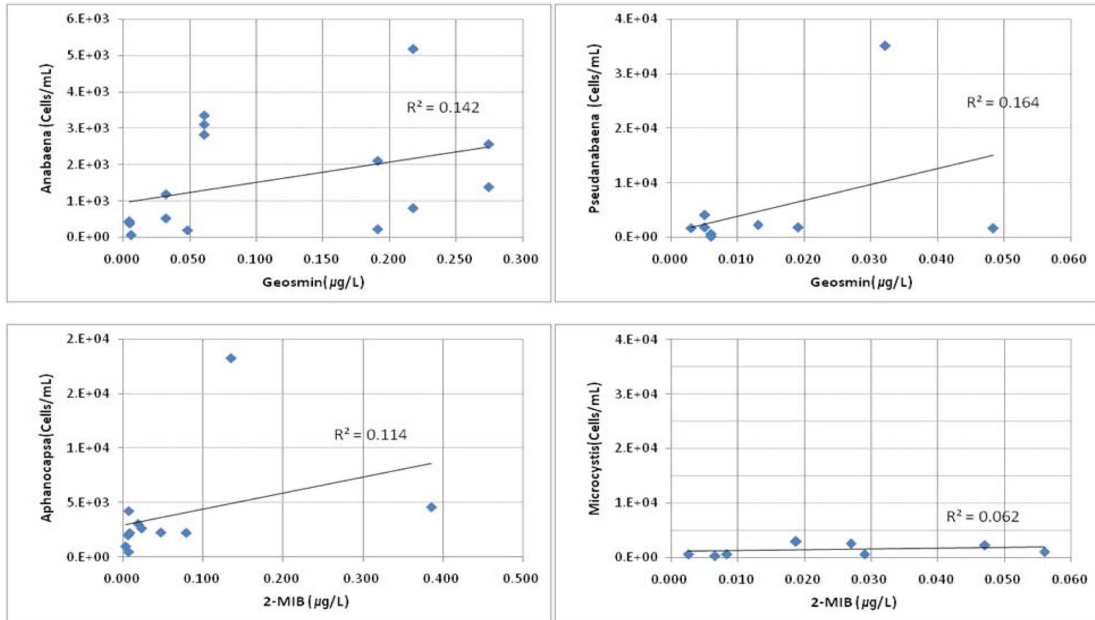


Fig. 9. Relationship between geosmin, 2-MIB concentration and cell quantity of cyanophyta.

취수원수로 하는 창원시 대신6만은 조류와 냄새물질 모두 검출되지 않았다.

3.3. 냄새물질 농도에 미치는 영향 인자 분석

3.3.1. 냄새물질과 조류와의 상관 분석

본 연구의 분석결과를 바탕으로 발생 조류별 항목별 수질농도와의 상관도를 Fig. 7에 나타내었다. Geosmin, 2-MIB농도와 주요 발생 남조류 *Anabena* sp., *Aphanocapsa* sp., *Pseudanabaena* sp., *Microcystis* sp. 종 개체수와의 상관도로 보아 냄새물질에 대한 통계학적으로 뚜렷한 원인물질을 찾는 것은 어려운 것으로 조사 되었다. 이는 geosmin과 2-MIB가 일반적으로 방선균이나 남조류의 2차 대사물질로 알려져 있으나 수생태 환경요인의 변화와 조류의 생육상태에 따라 많은 차이를 나타내기 때문으로 판단된다.⁹⁾

3.3.2. 냄새물질과 수질항목과의 상관 분석

냄새물질과 수질 항목들과의 상관도 분석 결과 하천수의 경우 geosmin과 남조류 개체수가 0.545로 가장 높은 상관도를 나타내었으며, 2-MIB는 0.5 이상의 높은 상관계수를 나타낸 항목이 없었다. 하천수의 수온은 녹조류와 남조류와 상관성이 높게 나타났으며, 클로로필-a는 규조류, 남조류 개체수, TOC와 높은 상관도를

나타내었다.

호소수의 경우 geosmin은 녹조류 개체수가 0.799로 가장 높은 상관도를 나타내었으며, pH, 수온, 클로로필-a도 높은 상관도를 나타내었다. 2-MIB는 수온과 0.498로 가장 높은 상관도를 나타내었으나, 낙동강 하천수와 마찬가지로 0.5 이상의 상관도를 보이는 항목은 없었다.

복류수의 경우 geosmin은 규조류 개체수가 0.785로 가장 높은 상관도를 나타내었으며, 2-MIB는 수온과 0.587로 가장 높은 상관도를 나타내었다. TOC는 pH와 수온과 높은 상관계수를 나타내었고, T-N과 T-P도 0.567로 높은 상관성을 보였다.

4. 결 론

본 연구는 경남지역 깨끗한 수돗물 공급에 기여하고자, 수원별 8개 지점의 정수장 원·정수를 대상으로 2013년 1월부터 12월까지 1년간 냄새물질에 영향을 주는 인자인 조류종 및 개체수 등과 비교한 2-MIB, geosmin의 검출 결과는 다음과 같다.

1. Geosmin은 ND~274.0(±17.0) ng/L 수준으로 검출되었고, 8월 둘째 주 진양호원수가 최고 농도를 나타내었다. 이때의 우점종으로 *Anabaena flos-aquae*가 2,560 cells/mL이었으며, *Anabaena planctonica* 1,380

Table 7. Correlation matrix between environmental factors in Nocdong river and Lake water

River	2-MIB	Geos.	pH	수온	DO	규조	녹조	남조	기타	Chlor.	TOC	T-N	T-P
2-MIB	1												
Geos.	0.128	1											
pH	0.381	0.289	1										
수온	0.340	0.319	-0.030	1									
DO	-0.199	0.079	0.420	-0.166	1								
규조	0.134	0.065	0.266	-0.262	0.579	1							
녹조	0.477	0.464	0.412	0.576	-0.166	0.178	1						
남조	0.348	0.545	0.352	0.522	-0.042	0.154	0.597	1					
기타	-0.127	-0.012	0.313	-0.465	0.360	0.009	-0.064	-0.212	1				
Chlor.	0.377	0.258	0.368	0.001	0.385	0.618	0.322	0.780	-0.051	1			
TOC	0.466	0.211	0.293	0.470	-0.218	0.038	0.346	0.572	-0.139	0.574	1		
T-N	-0.286	-0.165	-0.083	-0.725	0.482	0.269	-0.520	-0.317	0.338	0.104	-0.316	1	
T-P	-0.024	-0.097	-0.129	-0.207	0.029	-0.044	-0.197	0.243	-0.097	0.306	0.489	0.334	1

lake water	2-MIB	Geos.	pH	수온	DO	규조	녹조	남조	기타	Chlor.	TOC	T-N	T-P
2-MIB	1												
Geos.	0.244	1											
pH	0.282	0.666	1										
수온	0.498	0.526	0.380	1									
DO	-0.002	0.114	0.476	0.160	1								
규조	0.151	-0.168	0.190	-0.002	0.087	1							
녹조	0.221	0.799	0.476	0.636	0.017	-0.188	1						
남조	0.257	0.252	0.256	0.432	0.195	0.057	0.414	1					
기타	0.097	0.022	0.393	0.202	0.299	0.111	0.170	0.404	1				
Chlor.	0.432	0.747	0.644	0.630	0.143	0.003	0.852	0.583	0.308	1			
TOC	0.471	0.075	0.289	0.548	-0.142	0.140	0.137	0.269	0.389	0.324	1		
T-N	-0.227	-0.254	-0.036	-0.478	0.257	-0.031	-0.252	0.018	0.049	-0.186	0.015	1	
T-P	-0.085	-0.230	-0.062	-0.203	-0.015	-0.133	-0.241	0.008	0.083	-0.144	0.177	0.273	1

cells/mL 등 남조류가 74.1%의 구성비를 나타내었다.

2. 2-MIB는 ND~386.0(±46.0) ng/L 수준으로 검출되었으며, 9월의 창암 원수가 최고 농도를 나타내었다. 이때의 전체 발생 조류 중 남조류 구성비는 48.3%였으며, 출현 조류종은 *Microcystis aeruginosa* 종이 현존량 12,600 cells/mL로 남조류 중 67.9%로 우점종이었으며, *Aphanocapsa* sp.종은 4,560 cells/mL로 24.6%, *Oscillatoria* sp.는 1,240 cells/mL로 6.7%를 나타내었다.

3. 노단이, 우곡, 교동정수장은 하절기에도 남조류가 발생하지 않아 고농도의 냄새물질에 대한 우려는 없었으며, 강변여과수를 취수원수로 사용하는 대산6만 정수장은 조류와 냄새물질의 발생이 전혀 없었기 때문에 하절기 냄새물질 관리에 가장 적합한 정수처리시스템으로 조사되었다.

4. 냄새물질과 수질 항목들과의 상관도 분석 결과

geosmin은 하천수의 경우 남조류 개체수(0.545)와 호소수의 경우 녹조류 개체수(0.799)와 가장 높은 상관도를 나타내었고, 2-MIB의 경우 하천수, 호소수 모두 0.5 이상의 높은 상관도를 나타낸 항목은 없었다.

5. 8월 진양호의 geosmin 농도는 약 60.8~274.0 ng/L 수준으로 검출되어 진주 제2 정수장이 권고기준(20ng/L)을 초과하였다. 응집침전과 급속여과시설 만으로는 geosmin과 2-MIB의 제거가 어려우므로 특히 유해 남조류가 대량번식하는 하절기에는 보다 체계적인 진양호 수질관리가 필요하며 나아가 고도정수처리시설의 설치도 고려되어야 한다.

6. 9월 낙동강 수계에서 56.0~386.0 ng/L 수준의 고농도 2-MIB가 발생하였다. 각 채수지점의 남조류 구성비는 칠서, 창암, 물금이 각각 약 47.9%, 48.3%, 93.4%로 차이를 나타내었고, 우점 조류종 *Microcystis aeruginosa*의 현존량도 18,800 cells/mL, 6,400 cells/

mL, 4,150 cells/mL로 차이를 나타내고 있다.

따라서 2-MIB 386 ng/L의 최고 농도를 나타낸 창암 지점의 우점 조류종이 *Microcystis aeruginosa*라고 해서 고농도 2-MIB의 원인조류로 단순 추정할 수 없기 때문에 2-MIB 발생 메카니즘에 대한 보다 정확한 자료를 얻기위해 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 과제는 경상남도 보건환경연구원 음용수질과에서 2013년에 수행한 연구사업입니다.

참고문헌

- 홍성균, MBC 9시 뉴스에 보도된 “수도원 수돗물 악취 독조가 원인”에 대한 설명자료, *환경부 상하수도정책관실 수도정책과 보도설명자료*, **2011**, 12월1일.
- Mallevalle, J. and Suffet, I. H., “Identification and treatment of tastes and odors in drinking water”, *AWWA Reasearch Foundation*, **1987**, 347.
- 배병욱, 이유정, “상수원수 내 조류 이취미에 관한 문헌 고찰”, *The Institute of Environmental Studies(Daejeon University)*, **2007**, 11, 57-72.
- Ho, L., J. Crou and G. Newcombe, “The effect of water quality and NOM character on the ozonation of MIB and geosmin”, *Water Science and Technology*, **2004**, 49(9), 249-255.
- AWWA, “Water quality and treatment”, *AWWA*, 1999.
- Whelton, A. J. and Dietrich, A. M., “Relationship between intensity, concentration and temperature for drinking water odorants”, *Water Res.*, **2004**, 38, 1604-1614.
- Watson, S. B., “Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: signals or by-products? A review of their biological activity”, *Phycologia* **42**, **2003**, 332-350.
- 이화자, “수돗물의 냄새 유발물질 분석 및 처리”, *부경대학교 대학원 환경공학박사 학위 논문*, **2007**, 156.
- 이가람, “유해 남조류의 성장 및 이취미 생산 특성 연구”, *건국대학교 대학원 석사논문*, **2014**, 71-72.
- 황석태, 환경부, “2012년 상수도 통계” 발표, *환경부 상수도 정책관실 수도정책과 보도자료*, **2013**. 12. 23.
- 정진섭, 환경부, “낙동강 주요 상수원 조류경보제 시범적용”, *환경부 물환경정책국 수질관리과 보도자료*, **2012**. 2. 14.
- 환경부, 수질오염공정시험기준, 환경부고시 제 2012-99호, 2012.6.11.
- 환경부, 먹는물 수질감시항목 운영지침, 2013.12.
- 이정호, “세포체적과 세포수에 의한 식물성플랑크톤의 현존량 산정 비교”, **1998**, *Korean J. Limnol.* 31(3), 211-218.
- Blevins, W.T, Schrader, K.K and Saadoun, I, “Comparative physiology of geosmin production by *Streptomyces halstedii* and *Anabaena* sp.”, *Wat. Sci. Tech.*, **1995**, 31(11) 127-133.
- 유경아, 정승현, 박혜경, 이재정, 최인찬, 이수형, “기후 변화에 따른 담수호 수생태계 변화 조사 및 보전에 관한 연구(III)”, 국립환경과학원 물환경연구부 유역생태연구팀, **2012**, NIER-RP2012-284.
- 양상용, 이재정, 윤초희, 홍선화, 이준배, 황순홍, 박수영, 김동호, 이영준, 김교영, 최인찬, 주현지, “금강수계 따른 이취미물질 생성현황 및 관리방안 연구”, 국립환경과학원 금강물환경연구소, **2008**, *NEIR NO.* NIER-RP 2012-314.
- 김정아, 김경아, 윤철중, 박홍기, 정은영, 차동진, 최진택, 손희중, “낙동강원수 중 이취미물질과 방선균 및 조류의 상관관계 연구”, *부산광역시 상수도사업본부 수질연구소 상수도연구원보 제13집*, **2013**, 202-213.
- 유경아, 변명섭, 윤석제, 황순진, 류덕희, “북한강 수계에서 이취미를 유발하는 남조류(*Anabaena spiroides*)의 증식 특성”, **2013**, 46(1), 135-144.
- 김지근 이송희, 방호희, 황수옥, “팔당호의 조류 발생 특성”, *한국수자원공사 수도관리처*, **2009**, *대한환경공학회지 Original paper*, 325-331.
- Rosen, B., B. MacLeod and M. Simpson, “Accumulation and release of geosmin during the growth phases of *anabaena circinalis*”, *Water Scienceand Technology*, **1992**, 25, 185-190.