

낙동강 상수원수 중 이취물질과 방선균 및 조류의 상관관계 연구 A Study on the Correlation between Odorous Compounds, Actinomycetes and Algae in Drinking Water Source of Nakdong River

김정아 · 김경아 · 윤철종* · 박흥기 · 정은영 · 차동진 · 최진택 · 손희종[†]
Jeong-a Kim · Gyeong-a Kim · Churl-jong Yun* · Hong-gi Park
Eun-young Jung · Dong-jin Cha · Jin-taek Choi · Hee-Jong Son[†]

부산시 상수도 수질연구소 · *덕산정수사업소
Water Quality Institute of Busan Water Authority · *Deoksan Water Purification Plant

(2012년 6월 11일 접수, 2013년 3월 8일 채택)

Abstract : We have investigated the correlation between odorous compounds and actinomycetes in drinking water source of Nakdong River in 2011. Geosmin was mainly detected in the spring and summer seasons (Mar, Aug, and Sep) and 2-MIB was mainly detected in the winter and spring seasons (Feb, Mar and May). The odorous compounds concentrations were highest on March which also overlapped with the peak of actinomycetes, geosmin and 2-MIB were detected highly in the diluted culture solution of isolated actinomycetes strains from Nakdong River. For these reasons we could confirm that odorous compounds on March and August are closely related with actinomycetes. Meanwhile, geosmin increase on September supposed to relate with *Microcystis*.

Key Words : Actinomycetes, Algae, Geosmin, 2-MIB, Drinking Water Source

요약 : 상수원수의 이취발생 원인 및 이취물질과 방선균의 상관관계 규명을 목적으로 물금과 매리 취수원수를 대상으로 이취물질은 2010년과 2011년 2월부터 11월까지, 방선균수 및 조류농도를 2011년 2월부터 11월까지 조사하였다. 이취물질(geosmin || 2-MIB)은 3월에 가장 높게 검출되었으며(물금: 12.5 || 19.9 ng/L, 매리: 10.8 || 17.0 ng/L), geosmin은 봄과 여름철(3, 8, 9월)에, 2-MIB는 겨울과 봄철(2, 3, 5월)에 주로 검출되었다. 방선균은 물금과 매리 취수원수에서 0~330 CFU/500 mL의 비교적 적은 수로 연중 분포하였으며 3월에 가장 높은 집락수를 나타내었다. 방선균이 높은 집락수를 나타낸 3월과 8월에는 이취물질 또한 증가하였으며, 3월 분리한 방선균의 배양액에서 geosmin과 2-MIB가 검출되었다. 방선균은 3월과 8월 이취발생 원인으로 확인되었으며, 이취물질과의 상관관계가 높은 것으로 나타났다. 9월 geosmin 농도 증가는 남조류인 *Microcystis* 발생과 관계가 높은 것으로 판단되었다.

주제어 : 방선균, 조류, Geosmin, 2-MIB, 상수원수

1. 서론

수돗물에서 발생하는 이취문제는 건강상의 문제보다는 심미적인 불편감을 불러 일으켜 수돗물에 대한 불신을 초래한다. 하천이나 호수에는 다양한 이취 물질이 함유되어 있지만 민원발생빈도와 수돗물 불신에 대한 비중으로 보면 geosmin과 2-MIB (2-methylisoborenol)가 가장 대표적이라 할 수 있다. 곰팡이냄새와 흙냄새 유발물질인 geosmin과 2-MIB는 개인차가 있으나 정상적인 후각기능을 가진 사람들은 4~10 ng/L의 아주 낮은 농도에서도 감지할 수 있다.¹⁾ 일본의 경우 각각에 대해 먹는물 수질기준을 10 ng/L 이하로 규정하고 있고,²⁾ 우리나라도 현재 먹는물 수질감시항목으로 지정하여 권고기준 20 ng/L 이하로 규정 관리하고 있다.

한편, geosmin과 2-MIB는 *Oscillatoria*속, *Anabaena*속, 및 *Phormidium*속 등과 같은 남조류나 방선균에 의해 생성되는 것으로 알려져 있기 때문에 이취물질과 조류 및 방선균과의

상관성과 원인생물의 이취발생 조건 등에 대한 연구가 세계적으로 널리 수행되고 있다.³⁾ 그러나 국내에서는 관련 연구가 미미한 실정이며, 더욱이 조류와 이취물질과의 상관성에 관한 연구는 동북호, 대청호, 남강, 팔당호 등을 대상으로 한 여러 연구⁴⁻⁹⁾가 있는데 반하여, 방선균과 이취물질과의 상관성에 관한 연구는 거의 수행되지 않았으며, 수행된 연구 결과는 자연수계에서 상관성을 확인하지 못한 연구가 대부분이다.^{10,11)} 방선균의 환경조건에 따른 생성물질과 생육형태의 다양성, 느린 증식속도 등에 기인하여 자연수계에서 방선균을 분리하기가 쉽지 않기 때문에 이취물질과의 상관성 확인이 어려운 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 부산의 상수원수인 낙동강 수계에서 이취유발원인 및 이취물질과 방선균의 상관관계 규명을 목적으로 하고 있다. 우선적으로 자연수계에서 효율적으로 방선균을 분리할 수 있는 방법을 정립하고, 물금과 매리 지역의 상수원수를 대상으로 geosmin, 2-MIB의 연중 검출결과와 방선균 분포 비교를 통해 이들의 상관관계를 확인하고자 하였다.

[†] Corresponding author E-mail: menuturk@hanmail.net Tel: 051-669-4635 Fax: 051-669-4669

2. 분석 및 방법

2.1. 채수 및 분석

부산광역시의 상수원수로 이용되는 낙동강 수계 물금과 매리 지역을 조사지점으로 선정하였으며 2011년 2월부터 11월까지 월 1회 채수하여 방선균수와 클로로필-a를 조사 분석하였다. 또한 환경인자의 영향을 보기위해 pH, 수온, 용존 산소, 탁도 등 이화학적 조사를 병행하였다. pH, 수온, 용존 산소는 현장 측정하였으며, 클로로필-a, 탁도는 실험실에서 수질오염공정시험기준 및 먹는물공정시험기준에 준하여 분석하였다. 물금지점의 시료에 대해서는 조류에 의한 이취 발생인자를 배제하기 위하여 우점 조류종 및 개체수를 추가로 조사하였으며 시험방법은 수질오염공정시험기준에 준하였다.

이취물질인 geosmin과 2-MIB는 연간 낙동강수계의 이취 물질의 발생현황을 보기 위해 2010년 2월부터 2010년 11월까지 월 1회 채수 분석을 수행한 후 다른 이화학 및 방선균수 분석과 동일하게 2011년 2월부터 11월까지 채수 분석하였다. 이취물질 분석에 사용된 전처리 방법은 폴리디메틸 실록산(PDMS)이 코팅되어 있는 교반막대(Twister™, Gerstel, Germany)에 이취물질을 흡착시켜 수중에서 분리하는 교반막대 흡착추출법(stir bar sorptive extraction)을 이용하였다. Geosmin, 2-MIB의 전처리 순서는 먼저 시료수 10 mL를 20 mL vial에 취한 후 길이 10 mm, film thickness 0.5 mm인 교반막대(Twister)를 사용하여 1,200 rpm으로 90분 동안 교반시키면서 시료수에 함유된 이취 유발 물질을 흡착·추출한 후 교반막대의 수분을 제거한 다음 auto sampler가 부착되어 있는 TDS-2 system (Gerstel, Germany)을 이용하여 280 °C까지 열을 가하여 5분 동안 탈착시킨다. 탈착된 이취유발물질은 GC 도입부(injector)에 설치되어 있는 CIS4 PTV (Gerstel, Germany)에서 액체질소에 의해 -120 °C로 응축되어 있다가 일시에 GC/MS로 주입되어 분석되도록 하였다.²⁾ 본 실험에 사용된 GC/MS의 분석조건은 Table 1에 나타내었고, 정량한계 geosmin 1 ng/L, 2-MIB 2 ng/L 미만은 불검출로 표기하였다. 분석에 사용된 geosmin, 2-MIB는 일본 Wako 사의 순도 99%, 농도 0.1 mg/mL의 수질시험용 표준용액을 사용하였다.

Table 1. Analytical conditions of the GC/MS for geosmin and 2-MIB
GC (6890N, Agilent, U.S.A.)

- Column : HP-5MS, 30 m (L) × 0.25 mm (ID) × 0.25 μm (film thickness)
- Oven Temp. : Initial Temp, 50 °C, Hold 2 min, 1st rate 20 °C to 100 °C, 2nd rate 3 °C to 120 °C, 3rd rate 5 °C to 160 °C

MSD (5973N, Agilent, U.S.A.)

- SIM mode
- Selected ion : 2-MIB (95, 107, 108), geosmin (111, 112, 125)
* limit of detection : 2-MIB (0.6 ng/L), geosmin (0.3 ng/L)

2.2. 방선균의 분리배양 및 배양액에서의 이취물질 확인 시험

방선균은 형태학적으로 진균류와 유사하지만 유성세대가 없고 균사가 비교적 가늘어 진균류와 구별되는 형태분화가 가장 발달한 세균 중 하나이다.¹²⁾ 현재까지 약 50개 속 250여 종으로 분류되고 있으나 균사의 분화양식과 생성물질이 다양하기 때문에 아직도 형태학적, 화학적, 유전학적 분류와 희소 방선균 분리방법에 대해 많은 연구가 진행 중이다.¹³⁻²¹⁾

낙동강 수계의 방선균 분포조사를 위해서는 방선균의 분리배양 조건을 찾는 것이 우선적으로 필요하였기 때문에 2010년 12월 물금원수를 채수하여 배지 및 접종조건 결정을 위한 실험을 수행 후 방선균 배양방법을 결정하였다. 결정된 방선균 배양방법에 의해 순수 분리된 방선균 의심 집락은 Bergey's Manual²²⁾에 준하여 사상균사와 포자체를 확인한 후 최종 방선균수로 계수하였다. 그리고 Bennett's agar에서의 방선균 성상을 비교확인하기 위해 국립농업과학원의 농업미생물은행으로부터 *Streptomyces griseus subsp. griseus* (KACC 20731), *Micromonospora chalybeata* (KACC 20939)를 분양받아 비교균주로 사용하였다.

한편, 분리된 방선균의 이취물질 생산여부를 확인할 목적으로 2011년 3월 물금지역에서 분리된 방선균 중 계대상태가 양호한 균주 6종을 선택하여 Tryptic Soy Broth (Merck)에서 35 °C로 유지하여 7일간 배양하였다. 그 후 배양액을 멸균증류수로 10배 희석 및 균질화시킨 후 0.45 μm 멤브레인 필터로 여과하였다. 이 여액의 geosmin과 2-MIB를 분석하여 방선균의 이취물질 생산여부를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 방선균 분리배양 및 이취물질 생산확인

3.1.1. 방선균 분리배양 방법 결정

낙동강 수계의 방선균 분리배양 방법을 결정하기 위해서 앞선 여러 연구를 참고하여 선택배지와 접종조건을 선정하였다. 선택배지는 Humic acid-Vitamin agar (MBcell), Bennett's agar (MBcell), YM agar (Difco) 3종을 사용하였고 배지의 조성은 Table 2와 같다.¹³⁻²¹⁾ 접종 조건은 물금 원수 0.1 mL²⁰⁾, 0.5 mL¹⁹⁾를 직접 접종한 균과 물금원수 500 mL를 여과 농축²³⁾하여 55 °C에서 6분간 중탕 열처리^{13,14,19,21)} 후 0.1 mL, 0.5 mL 접종한 균으로 구분하였다.

Table 3의 실험결과에 나타났듯이 물금 원수 0.1 mL 및 0.5 mL를 직접 접종한 균에서는 방선균의 집락을 확인할 수 없었지만 물금원수 500 mL를 여과 농축한 시료 0.5 mL를 접종한 균의 평판에서는 4-5개의 집락을 확인할 수 있었다. 1차 분리배양에서 방선균 특유의 집락을 확인하기에는 접종액량 0.5 mL, 선택배지 HV agar인 경우가 가장 좋았다. HV agar의 경우 영양원으로 부식산(humic acid)를 이용하기 때문에 방선균에 대한 선택성이 높고 방선균의 포자형성이 양호하다는 김²¹⁾의 보고와 같은 결과이다.

Table 2. Composition of selective medium for Actinomycetes

Medium	Composition (per Liter of distilled water)	
HV agar (Humic acid-Vitamin agar)	Humic acid 1 g	Niacin 0,5 mg
	Disodium phosphate 0,5 g	Pyridoxin HCl 0,5 mg
	Potassium chloride 1,71 g	Inositol 0,5 mg
	Magnesium sulfate 0,05 g	Calcium pantothenate 0,5 mg
	Ferrous sulfate 0,01 g	Aminobenzoic acid 0,5 mg
	Calcium carbonate 0,02 g	Biotin 0,25 mg
Bennett's agar	Agar 15 g	Cyclohexamide 50 mg
	Thiamine HCl 0,5 mg	Nalidixic acid 10 mg
	Riboflavin 0,5 mg	pH 7,2
	Glucose 10 g	Pyridoxin HCl 0,5 mg
YM agar	Bacto-peptone 2 g	Inositol 0,5 mg
	Yeast extract 1 g	Calcium pantothenate 0,5 mg
	Beef extract 1 g	Aminobenzoic acid 0,5 mg
	Agar 15 g	Biotin 0,25 mg
	Thiamine HCl 0,5 mg	Cyclohexamide 50 mg
	Riboflavin 0,5 mg	Nalidixic acid 10 mg
Bennett's agar	Niacin 0,5 mg	pH 7,2
	Yeast extract 3 g	Dextrose 10 g
	Malt extract 3 g	Agar 20 g
YM agar	Peptone 5 g	pH 6,2

Table 3. Determination of the seeding condition and the selective agar medium

Medium	Seeding condition	Seeding volume (mL)	Result
HV agar	Direct seeding	0,1	No growth
		0,5	No growth
	Filtered and concentrated (50 times)	0,1	No growth
		0,5	5 colonies
Bennett's agar	Direct seeding	0,1	No growth
		0,5	No growth
	Filtered and concentrated (50 times)	0,1	Untypical colonies
		0,5	4 colonies
YM agar	Direct seeding	0,1	Untypical colonies
		0,5	Untypical colonies
	Filtered and concentrated (50 times)	0,1	Untypical colonies
		0,5	Untypical colonies

Table 3의 결과를 정리하여 본 연구에 사용될 방선균 분리 배양방법을 다음과 같이 결정하였다.

- (1) 시료 500 mL를 0.45 µm 멤브레인 필터(Millipore 0.45 µm HA)로 여과한다.
- (2) 멸균된 0.85% 생리식염수 10 mL에 여과 필터를 무균적으로 잘라 넣는다.
- (3) 볼텍스믹서와 초음파처리 5분으로 탈리시킨다.
- (4) 확산성 세균의 생육을 감소시키기 위해 탈리시킨 시료를 55°C에서 6분간 중탕 열처리한다.
- (5) HV agar에 원액과 희석액을 각각 0.5 mL씩 접종 도포시킨 후 35°C에서 7~14일간 배양한다.
- (6) HV agar에서 자라나온 집락 중 포자낭이 고밀도로 밀집된 형태의 집락, 집락 중심 주변에 포자형성환(Fairy ring; sporulation ring)이 형성되는 집락 등 방선균 특징을 보이는

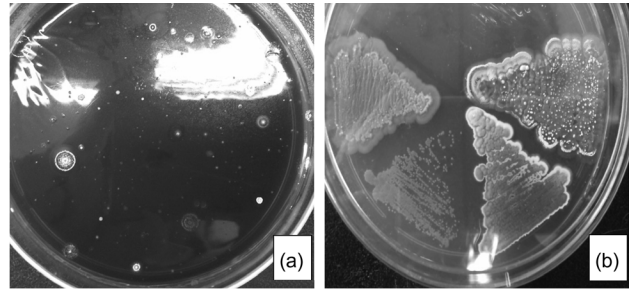


Fig. 1. Typical colonies of actinomycetes on HV agar^(a) and Bennett's agar^(b).

집락을 선택하여 Bennett's agar에 순수 분리한다(Fig. 1).
 (7) 순수 분리된 집락은 Bergey's Manual에 준하여 사상균사와 포자체를 확인한 후 방선균수로 계수한다.

3.1.2 낙동강 수계 방선균의 이취물질 생산확인

2011년 3월에 물금, 매리지역의 취수원수에서 직접 분리한 방선균 중 계대상태가 양호한 균주 6주를 대상으로 이취물질 생산여부를 확인하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

방선균은 이취분석을 위한 방선균 배양조건의 차이와 균종에 따른 이취물질 생산 정도가 다르다는 선행 연구들이 있다.^{11,24,25) Akira 등²⁴⁾의 연구에서는 방선균의 형태나 생리적 특성은 배양조건에 따라서 크게 변화하고 다양한 생활환을 가지는 것으로 나타난다고 보고했다. 김 등²⁵⁾과 오 등¹¹⁾의 연구에서는 방선균에 의한 이취물질 생성은 배지 및 균주의 특성에 따라 그 발생정도가 다르며 방선균이 geosmin과 2-MIB를 각각 한 물질씩 생성하거나 둘 다 생성하는 양상을 보인다고 보고했다. 본 연구에서도 물금 취수원수에서 분리한 세 개의 균주 중 한 개의 균주(Mulgeum03/03-HV23) 배양 희석액(10배)에서 geosmin과 2-MIB 두 가지 이취물질이 동시에 검출되었으며, 그 외 두 균주의 배양 희석액에서는 2-MIB만 검출되었다. 그리고 매리 취수원수에서 분리한 세 개의 균주 중 한 개의 균주(Maeri03/03-HV23) 배양 희석액에서는 이취물질이 검출되지 않았으며 나머지 두 균주의 배양 희석액에서는 2-MIB만 검출되었고, 그 농도는 61.3 ng/L과 9.4 ng/L로 큰 차이를 보였다. 분리균주 별로 이취물질 생성정도 및 생성양상은 큰 차이를 보였지만, 낙동강 수계에서 분리한 방선균의 배양 희석액에서 geosmin과 2-MIB의}

Table 4. Concentration of geosmin and 2-MIB in culture solution (×10 dilute) of the isolated strains from raw water of Mulgeum and Maeri on March 3, 2011

Isolated strain	Geosmin (ng/L)	2-MIB (ng/L)
Mulgeum03/03-HV23	15,5	5,7
Mulgeum03/03-HV24	ND	4,5
Mulgeum03/03-HV25	ND	9,3
Maeri03/03-HV22	ND	61,3
Maeri03/03-HV23	ND	ND
Maeri03/03-HV24	ND	9,4

이취물질이 검출되었다는 것은 방선균이 낙동강 수계원수의 이취 원인 생물 중 하나라는 것을 증명하는 것이다. 낙동강 수계에서 방선균이 geosmin과 2-MIB를 생성시키는 보다 명확한 조건을 알기 위해서는 수계환경과 유사한 물리화학적 및 생물학적 환경조건을 고려한 추가적인 연구와 균주의 종분류가 필요할 것으로 판단된다.

3.2. 낙동강 수계의 이취유발 원인분석

3.2.1. 낙동강 수계의 이취물질 검출특성

낙동강 수계인 물금 및 매리지역에서 2010년과 2011년 두 해의 2월부터 11월까지 이취물질 검출 추세를 Fig. 2에 나타내었다. 2010년에 2-MIB는 매리지역에서만 2월에 7.5 ng/L의 농도로 검출되었고, geosmin은 물금과 매리 두 지점에서 모두 1.0~7.2 ng/L의 농도로 연중 검출되었다. 2011년에는 물금과 매리 두 지점에서 이취물질 검출양상은 거의 같았으며, 2-MIB는 2, 3, 5월에 2.5~19.9 ng/L, geosmin은 3, 8, 9월에 4.3~14.5 ng/L 농도로 검출되었다. 이 결과는 2-MIB는 주로 겨울과 봄철에 검출되고, geosmin은 주로 이른 봄과 여름철에 높은 농도로 검출되어 제어인자별로 공정운영을 설정했던 채 등²⁶⁾의 연구와 계절적인 이취물질의 분포차를 보고한 오 등⁵⁾의 연구와도 유사한 결과이다. 물금과 매리의 취수원수에서 2010년과 2011년 이취물질 검출양상은

연도별로 약간의 차이가 있었으나 2년 연속 연중 높은 농도로 검출되는 시기는 공통적으로 3월이었다. 이 시기의 반복적 이취발생은 매년 변하는 강우, 기온 등의 환경적 요인²⁷⁾에 영향을 적게 받는 이취유발인자의 존재를 추정할 수 있었다.

3.2.2. 이취물질발생에 대한 조류의 영향

물금과 매리의 Chl-a 농도는 3.0~40.7 mg/m³ 범위로 나타났다며 지점별 농도가 유사하게 나타났다. 두 지점의 유사거리가 4 km 이내로 근접하여 지점간의 조류농도 및 수질인자들이 대체로 유사한 추이를 나타낸다고 보고한 김 등²⁷⁾의 결과와도 일치했다. 월별 Chl-a 농도는 2월에 가장 높고 6월~8월까지 낮게 유지되다가 9월에 소폭 상승한 후 다시 낮아지는 양상을 보였다.

이취생성 원인으로 알려진 조류의 영향을 조사하기 위하여 물금지점을 대상으로 조류 우점종 및 개체수 조사한 결과를 이취물질 검출결과와 함께 Table 5에 나타내었다. 물금 지점 우점종은 2월~4월엔 규조류인 *Stephanodiscus*속, 5월~8월과 10월~11월에는 규조류인 *Melosira*속, 9월에는 남조류인 *Microcystis*속이 분포하는 것으로 나타났다.

많은 연구에서 남조류의 발생시기에 이취문제가 동반되며, *Anabaena*속, *Phormidium*속, *Oscillatoria*속의 배양물에서 geos-

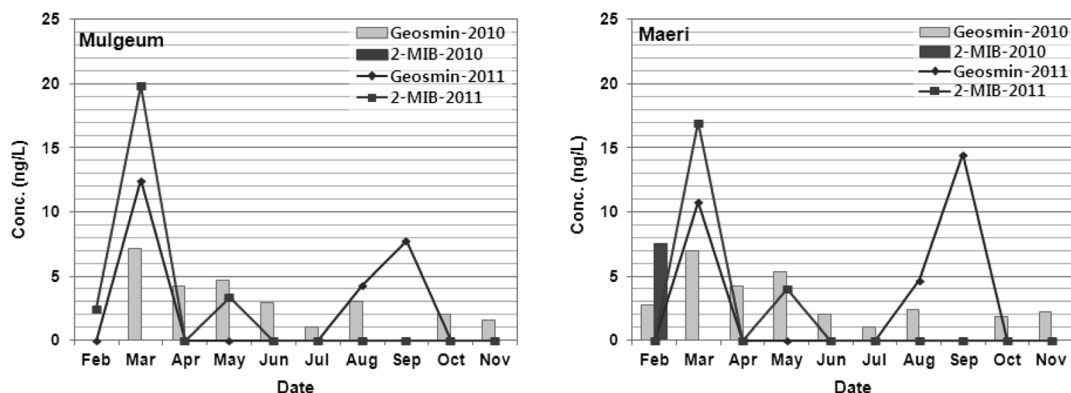


Fig. 2. Monthly variation of geosmin and 2-MIB in the raw water of Mulgeum and Maeri in 2010, 2011.

Table 5. Characteristics of algae versus actinomycetes and odoriferous compounds of the source water at Mulgeum in 2011

Sampling date	Maeri		Dominant algae	Mulgeum			<i>Actino-mycetes</i> (CFU/500 mL)	Geosmin/2MIB (ng/L)
	Chl-a (mg/m ³)	Chl-a (mg/m ³)		Cell quantity of algae (cells/mL)				
				<i>Stephano-discus</i>	<i>Melosira</i>	<i>Micro-cystis</i>		
11-2-8	38.9	40.7	<i>Stephanodiscus</i>	1,100	0	0	0	ND/2.5
11-3-3	25.5	22.5	<i>Stephanodiscus</i>	1,550	56	0	330	12.5/19.9
11-4-4	29.7	24.7	<i>Stephanodiscus</i>	230	112	0	90	ND/ND
11-5-4	20.6	23.4	<i>Melosira</i>	0	63	0	0	ND/3.4
11-6-2	4.4	5.0	<i>Melosira</i>	0	196	0	40	ND/ND
11-7-4	4.3	5.3	<i>Melosira</i>	0	140	0	90	ND/ND
11-8-3	9.4	8.3	<i>Melosira</i>	0	70	0	180	4.3/ND
11-9-1	21.4	16.6	<i>Microcystis</i>	0	434	2500	30	7.8/ND
11-10-5	3.9	3.0	<i>Melosira</i>	16	35	0	0	ND/ND
11-11-4	9.7	14.9	<i>Melosira</i>	91	1260	3	60	ND/ND

min과 2-MIB를 검출했다고 보고⁴⁻⁹⁾한 바와 같이 남조류는 수계의 이취유발 원인생물로 널리 알려져 있다. 앞선 연구결과와 같이 남조류가 우점종으로 나타난 2011년 9월 geosmin이 7.8 ng/L로 검출되었으며 이 결과는 남조류인 *Microcystis*속의 영향으로 사료된다.

방선균이 검출되지 않은 2월과 5월에 2-MIB가 각각 2.5 ng/L, 3.4 ng/L 검출된 사실은 방선균 외의 이취물질 원인생물로 규조류를 의심할 수 있다. 규조류 중 *Synedra*속 등 일부 종에서 이취를 유발하는 것으로 보고^{3,4)}되어 있으나, 본 연구에서는 *Stephanodiscus*속이 우점한 2~4월, *Melosira*속이 우점한 5~8월 그리고 10~11월의 조류농도, 우점종의 개체수와 이취물질 검출양상을 비교하여 볼 때, 이 조류 속들과 이취물질 발생과의 연관성 및 상관관계를 확인할 수 없었다.

3.2.3. 이취물질과 방선균의 상관관계

낙동강 수계의 이취물질 원인생물로서 방선균의 영향을 검토하기 위해 2011년 물금과 매리 취수원수의 방선균 조사 결과를 이화학적 수질인자와 함께 Table 6에 나타내었다.

물금과 매리 두 지점에서 분리된 방선균수의 차이는 크지 않았으나 물금보다 매리 취수원수에서 방선균이 연중 검출되었으며 방선균수는 0~330 CFU/500 mL로 조사되었다. 이 결과는 오 등¹¹⁾이 서울 6개 취수원수에서 3월부터 11월까지 조사한 방선균수 0~2,400 CFU/100 mL보다 전반적으로 낮았으며, 한강과 낙동강이라는 대상 시료와 분리방법의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

낙동강수계에서 방선균은 2011년 3월에 연중 최대값(물금: 330 CFU/500 mL, 매리: 240 CFU/500 mL)을 나타내었으며, 8월(물금·매리: 180 CFU/500 mL)에 다시 큰 값을 나타내었다. 한강수계에서 3월과 8월에 각각 765 CFU/100 mL, 557 CFU/100 mL의 월평균 최대값을 보인 오 등¹¹⁾의 조사결과와 발생시기가 유사하였다. 이 두 수계의 결과로 볼 때, 방선균은 봄철인 3월경에 주로 증식하는 것으로 나타났다. 토양의 방선균은 주로 *Streptomyces*속이 분포하고

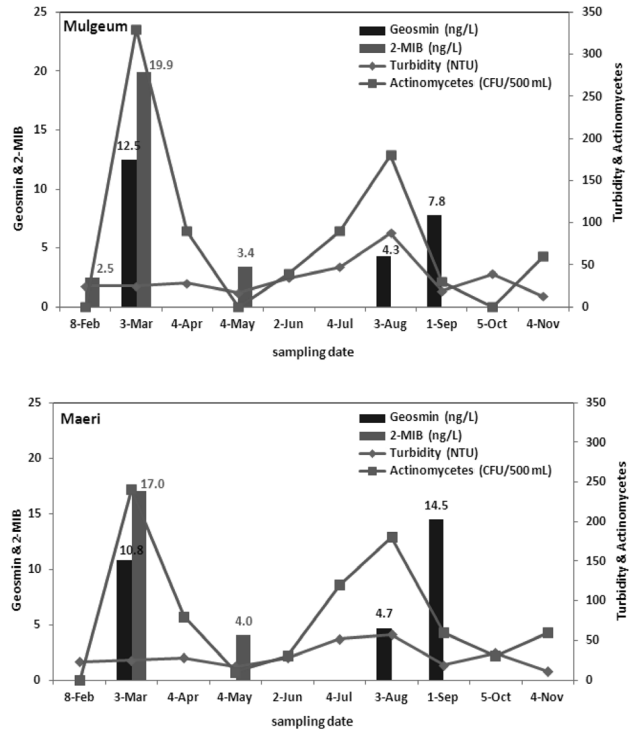


Fig. 3. Comparison of Actinomycetes distribution with those of geosmin and 2-MIB in 2011.

이 속의 계절적 분리빈도는 봄에 가장 높게 나타났다는 보고²⁸⁾와도 유사한 결과이다. 그리고 8월에는 하상퇴적물이나 토양에 주로 분포하는 방선균이 잦은 호우와 4대강 준설작업의 영향으로 수중에 유리되어 탁도 상승(물금: 87.6 NTU, 매리: 57.2 NTU)과 더불어 방선균수가 증가한 것으로 생각된다. 물금과 매리지역의 이취물질농도, 방선균수 및 탁도를 비교분석하여 Fig. 3으로 나타내었다.

방선균이 높은 집락수를 보인 3월과 8월의 경우, 이취물질(geosmin, 2-MIB)의 검출농도 또한 4.3~19.9 ng/L로 상승하였으며, 3월 낙동강 수계에서 직접 분리한 방선균의 배양 희석액에서는 최대 61.3 ng/L의 2-MIB와 15.5 ng/L의 geos-

Table 6. Monthly data of actinomycetes and water quality of the source water at Mulgeum and Maeri in 2011

Sampling date	Mulgeum					Maeri					Rainfall* (mm)
	Actinomycetes (CFU/500 mL)	pH	Turbidity (NTU)	Water temp.(°C)	DO (mg/L)	Actinomycetes (CFU/500 mL)	pH	Turbidity (NTU)	Water temp. (°C)	DO (mg/L)	
11-2-8	0	8.0	25.1	2	13.8	0	7.9	23.0	3	14.1	275
11-3-3	330	7.5	24.8	6	11.3	240	7.6	24.7	7	12	92.4
11-4-4	90	7.9	28.5	11	11.2	80	7.9	28.2	11	11.7	430.6
11-5-4	0	7.8	16.9	16	9.6	10	7.5	16.7	17	8.9	648
11-6-2	40	7.6	34.8	20	8.3	30	7.6	27.9	20	8.2	960.9
11-7-4	90	7.5	47.1	25	7.7	120	7.4	51.8	24	7.8	1746.7
11-8-3	180	7.6	87.6	27	7.1	180	7.5	57.2	26	7.6	1070.8
11-9-1	30	8.3	18.9	25	10.7	60	8.8	18.7	25	11.8	213.8
11-10-5	0	7.8	39.1	20	7.8	30	7.7	33.9	21	7.9	393.9
11-11-4	60	7.9	12.5	16	9.6	60	7.7	10.8	17	9.6	495.3

* Rainfall: averaged monthly rainfall of Andong, Hapchun, Jinju and Busan (given by Korea Meteorological Administration)

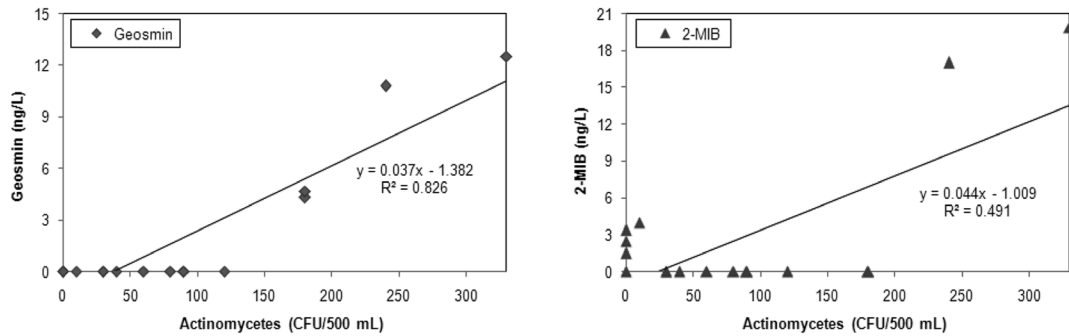


Fig. 4. Relationship between odorous compounds (geosmin, 2-MIB) and Actinomycetes (2011).

min이 검출되어(Table 4), 이 시기의 이취물질 생성 원인으로 방선균을 확인할 수 있었다. 그렇지만 4, 6, 7, 10, 11월에 방선균이 검출되었는데도 불구하고 이취물질이 검출되지 않은 것으로 보면 방선균이 이취물질을 생성시키는 특정한 조건이 있으며 일정 균수(150 CFU/500 mL) 이상의 방선균이 검출될 때 수계 이취물질 농도에 영향을 주는 것으로 생각된다.

낙동강 수계에서 방선균과 이취물질의 상관관계를 확인할 수 없었다는 양 등¹⁰⁾의 연구와 갈수기인 5월 한강수계에서 방선균과 이취물질의 상관관계를 확인할 수 없었다는 오 등¹¹⁾의 연구, 그리고 수중에서 방선균의 휴지기 포자 등이 분리되나 수계의 이취유발 원인이라는 증거는 밝혀지지 않았다는 Beryl 등¹²⁾의 연구들이 있다. 하지만 본 연구에서 남조류에 의한 이취발생으로 보이는 9월의 결과를 제외하고 2011년 2월부터 11월까지의 검출된 이취물질과 방선균수의 상관관계 계수를 구한 결과, 방선균과 이취물질의 상관성은 높은 것으로 나타났다(Fig. 4). geosmin은 0.826의 상관관계 계수를 나타내어 방선균수와 상관성이 높았고, 2-MIB는 0.491의 상관관계 계수를 나타내어 geosmin보다 상대적으로 낮았다. 환경에서의 다양한 인자들을 고려할 때 2-MIB를 생성하는 또 다른 인자의 존재로 인해 geosmin보다 상관계수가 낮게 나타난 것으로 생각된다.

일반적으로 방선균은 유기물이 많은 하상 퇴적물에 많이 분포하고, 온도가 20~34°C일 때 잘 성장하며, 곰팡이 냄새 발생시는 용존산소가 필요하고 영양원으로서 유기물, 인, 질소 등이 필요하다고 알려져 있다.³⁾ 그리고 방선균의 이취물질 생성을 위한 최적온도와 최적 pH는 각각 20~30°C 범위와 pH 8~9로 알려져 있다. 특히 25°C에서 이취물질 생성이 최대로 되고, 35°C 이상 또는 10°C 이하에서는 이취물질이 생성되지 않는다고 알려져 있다¹¹⁾. 하지만 본 연구에서 방선균 최대 집락수와 가장 높은 이취물질 농도를 나타낸 3월의 pH 7.5, 수온 6°C의 수계조건은 앞서 언급한 최적 방선균 성장 조건 및 이취유발조건과 큰 차이를 보였다. 그 이유로는 방선균의 생태학적 다양성과 자연환경 및 실험실환경의 생육조건 차이, 그리고 환경수계에서 이취유발인자의 복합작용 등에 기인한 것으로 판단된다. 환경수계에서 방선균의 생육특성과 이취유발 조건을 명확히 규명하기 위해서는 이화학적 및 생물학적 요소를 고려한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

4. 결론

이취물질과 방선균 상관관계 및 조류의 영향 규명을 목적으로 낙동강 수계인 물금과 매리 지점의 취수원수를 대상으로 2011년 2월부터 11월까지 방선균과 수질인자들을 조사하였으며 2010년과 2011년 2월부터 11월까지의 이취물질 검출농도와 비교하여 다음과 같은 결과가 도출되었다.

- 1) 낙동강 수계인 물금과 매리 취수원수의 이취물질 분포는 2010년과 2011년 2월부터 11월까지 조사한 결과, 3월에 가장 높은 농도를 나타내었으며, geosmin은 봄과 여름철(3, 8, 9월)에, 2-MIB는 겨울과 봄철(2, 3, 5월)에 주로 검출되었다.
- 2) 방선균시험은 낙동강 수계의 방선균 분포농도가 낮아 시료를 여과 농축, 중탕처리 후 HV agar에 접종하여 분리 배양하는 방법이 적합하였다. 방선균은 물금보다 매리 취수원수에서 연중 검출되었으며 방선균수는 0~330 CFU/500 mL로 조사되었다. 3월 분리된 방선균의 배양 희석액에서 이취물질이 검출되어 방선균이 이취유발원인으로 확인되었다. 그리고 하천수계에서 일정 균수(150 CFU/500 mL) 이상의 방선균이 검출될 때 수계 이취물질 농도에 영향을 주는 것으로 나타났다.
- 3) 2011년도 3월, 8월의 높은 이취물질 검출은 방선균에 의한 것이며, 9월 이취물질 농도가 높게 검출된 것은 남조류인 *Microcystis*속의 영향으로 판단되었다.
- 4) 남조류에 의한 이취발생으로 보이는 9월의 결과를 제외하고 검출된 이취물질과 방선균수의 상관관계를 비교 조사한 결과, 낙동강 수계에서는 방선균과 이취물질의 상관성이 높은 것으로 나타났다. 이취물질별로 방선균수와의 상관성은 geosmin이 높게 나타났고 2-MIB는 geosmin 보다 상대적으로 낮게 나타났다.

수계에서 이취발생은 단독의 특정 원인에 기인하기 보다는 복합적으로 발생하는 경우가 대부분이고, 원인생물인 방선균이나 조류의 이취물질 발생 조건에 대해선 여전히 불명확한 점이 많다. 환경수계에서 이취물질 발생에 대한 보다 명확한 규명을 위해서는 원인생물의 생태적 특성 및 이취물질 발생 메커니즘 등에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- Mallevalle, J. and Suffet, I. H. "Identification and Treatment of Tastes and Odors in Drinking Water," AWWA Research Foundation, p. 347(1987).
- Lee, H. J. and Kang, L. S., "Analysis of geosmin and 2-MIB in water by stir bar sorptive extraction (SBSE) and GC/MS," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **31**(1), 64~69(2009).
- Park, J. H. and Ryu, S. H., "Reasons and measures of odors in drinking water," *J. Kor. Soc. Water Wastewater*, **6**(1), 58~90(1993).
- Bae, S. J., Cho, Y. G., Lee, J. J. and Lee, J. J., "Studies on algae causing tastes and odors in the Dongbok reservoir-detection of taste and odor substances in culture fluids and natural waters-," *J. KSWQ*, **14**(2), 229~236(1998).
- Oh, H. J., Choi, Y. J., Hwang, T. M. and Nam, S. H., "The water characterization of 2-MIB, geosmin and algae in Han River's raw water," in Proceedings of the 2005 autumn conference of KSWW and KSWQ, KSWW · KSWQ, Kwangju, pp. 149~153(2005).
- Bae, B. U., Lee, Y. J. and Lim, M. G., "Comparison of taste and odor in Raw Water from the main Daecheong Reservoir and its regulating reservoir downstream," *J. Kor. Soc. Water Qual.*, **24**(5), 598~602(2008).
- Lee, C. S. and Park, H. G., "A study on odor and taste generation from Nam River," *J. Environ. Sci.*, **11**(4), 399~403(2002).
- Park, D. K., Maeng, J. S., Ahn, C. Y. and Chung, A. S., "Geosmin Concentration and Its Relation to Environmental Factors In Daechung Reservoir, Korea," *Kor. J. Liminol.*, **34**(4), 319~326(2001).
- Kim, J. K., Lee, S. H., Bang, H. H. and Hwang, S. O., "Characteristics of algae occurrence in Lake Paldang," *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **31**(5), 325~331(2009).
- Yang, S. Y., Lee, J. J., Park, J. M. and Seo, J. G., "Studies on the biological odors of Nackdong River water," in Proceedings of the 2004 spring conference of KSWQ and KSWW, KSWQ · KSWW, Seoul, pp. 677~680(2004).
- Oh, S. J., Lee, Y. K., Kim, D. Y., Lee, M. Y. and Joe, Y. J., "Research on the actinomycetes of water source," Research report of water quality in 2001, Waterworks Research Institute of Seoul Metropolitan Government, pp. 651~678(2002).
- Beryl, Z. and Susan, B. W., "Actinomycetes in relation to taste and odour in drinking water: Myths, tenets and truths," *Water Res.*, **40**, 1741~1753(2006).
- Kim, S. G., Kim, C. H. and Lee, C. G., "Bio-Science and actinomycetes," World Science Publishing, Korea, pp. 11~21(2004).
- Kim, C. J., "Isolation and classification of a useful actinomycetes in industry," *The Microorganisms and industry (Kor. J. Microbiol.)*, **10**(2), 34~43(1997).
- Chun, J. G. and Cho, B. G., "Research on the screening and development of new biochemical and new actinomycetes," *The Collection of Learned Papers, Konkuk University*, **4**, 149~165(1993).
- Cho, Y. J., Kim, J. H., Jeon, E. S., Lee, S. M., Park, D. J., Lee, J. C., Lee, H. B. and Kim, C. J., "Studies on microbial ecology of actinomycetes in tideland soils," *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.*, **30**(1), 79~85(2002).
- Kang, S. I., Kong, J. Y., Choi, Y. J., Kim, M. Y. and Son, H. J., "Screening and identification of alkaline protease inhibitor-producing marine-derived actinomycetes," *J. Life Sci.*, **18**(4), 482~487(2008).
- Kim, M. C., Kim, J. S. and Kim, Y. B., Ramasamy Harikrishnan, Han, Y. J., Heo, M. S., "Identification of antioxidant activity of marine actinomycetes streptomyces sp. ACT-1," *Kor. J. Microbiol.*, **45**(4), 397~403(2009).
- Park, N. H., Hong, Y. K. and Cho, J. Y., "Screening anti-inflammatory actinomycetes isolated from seaweeds and marine sediments," *J. Kor. Fish. Soc.*, **39**(4), 333~337(2006).
- Kwon, O. S., Park, D. J., Lee, C. Y. and Kim, C. J., "Distribution pattern of soil actinomycetes at Cheju Island," *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **24**(4), 399~403(1996).
- Kim, C. J., "Investigation and selective isolation of actinomycetes in nature," *The Microorganisms and industry (Kor. J. Microbiol.)*, **18**(3), 35~40(1992).
- John, G. H., Noel, R. K., Peter, H. A. S., James, T. S. and Stanley T. W., "Bergey's manual of determinative bacteriology," 9th ed. LW&W, pp. 605~703(2000).
- John, G. H., Noel, R. K., Peter, H. A. Sneath, James, T. S. and Stanley, T. W., "Bergey's Manual of Determinative Bacteriology 9th," LW&W, pp. 605~703(2000).
- Akira, S., Kim, C. J. and Yoo, I. D., "Diversity of Actinomycetes -species, morphology and life cycle-," *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **21**(1), 88~94(1993).
- Kim, E. G., Bea, S. J., Cho, Y. G. and Lee, J. J., "Induction of the odors and tastes from actinomycetes in the raw water of reservoir," in Proceedings of the 1999 spring conference of KSWQ, KSWQ, Seoul, pp. 74~77(1999).
- Chae, S. H., "Selection and management of advanced water purification process for taste and odor," K-Water Techzine, the second half of 2010, pp. 96~105(2010).
- Kim, G. A., Lee, S. W., Hwang, Y. D., Jung, M. E., Seo, C. D., Song, M. J., Roh, J. S. and Bin, J. H., "Investigation of water quality in the downstream of Nakdong river-focused on the area of Mulgeum, Maeri and Samryangjin.-," *The report of Water Quality Institute, Water Quality Institute of Busan Water authority*, **12**, 345~406(2011).
- Park, D. J., Lee, S. H., Park, S. H. and Kim, C. J., "Distribution pattern of soil actinomycetes on the seaonal change," *Kor. J. Microbiol.*, **34**(3), 149~153(1998).