

퇴적층의 온도별 배양에 따른 조류군집 형성과 이취미물질 발생 특성

김용진 · 윤석제 · 김현년 · 황문영 · 박진락 · 이병천[†] · 이재관

국립환경과학원 한강물환경연구소

Formation of Phytoplankton Community and Occurrences of Odorous Compounds for Sediment Incubation by Water Temperature

Yong-Jin Kim · Seok-Jea Youn · Hun-Nyun Kim · Moon-young Hwang · Jin-rak Park ·
Byoung-cheun Lee[†] · Jae-Kwan Lee

Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research
(Received 12 June 2015, Revised 17 August 2015, Accepted 20 August 2015)

Abstract

We analyzed the formation of phytoplankton community and the occurrences of odorous compound from benthic cyanobacteria in North, South Han-River, Paldang-Lake and Kyeongan-Stream sediments. Sediments were incubated in different water temperature. Akinetes were found (0~500 cells/g) with the highest number on sediment in Yangsoo railroad bridge (YC). The result showed that *Anabaena* ranged between $0.02\sim0.53\times 10^3$ cells/mL in Sambong (SB), YC, Mukhyen-Stream (MS), Paldang-Lake (P2) and Kyeongan-Stream (KK). The total 68 taxa of phytoplankton were observed during the incubation period. A standing crop of phytoplankton was in the range of $0.13\sim8.97\times 10^3$ cells/mL and *Microcystis* appeared in SB, YC, P2 and KK sites with 20~25°C temperature. In South Han-River (P3), *Oscillatoria tenuis* was dominant at 25°C temperature. The concentration of geosmin was the highest in SB-15°C (25.5 ng/L), and the concentration of 2-MIB was the highest in P3-25°C (286.8 ng/L). Odorous compounds were detected in all the temperature conditions from each site. Our results indicate that the dominant benthic cyanobacteria (*O. tenuis*, *O. limosa*, *Phormidium tenue* and *Pseudanabaena limnetica*) have high correlation with the occurrence odorous compounds and 2-MIB.

Key words : 2-MIB, Benthic cyanobacteria, Geosmin, Phytoplankton, Sediment

1. Introduction

팔당호는 북한강, 남한강, 경안천이 합류하는 지점에 팔당댐이 축조되어 형성된 인공호로서 수도권권의 주요 상수원이다(Kong, 2014). 팔당호로 유입되는 세 개의 하천은 특성이 상이하며, 넓은 유역으로부터 생활하수, 농업배수, 축산폐수 등의 유입이 지속되면서 부영양화가 진행되어, 규조류 및 남조류 등 조류의 과다증식이 국지적으로 발생하고 있다(Park and Jheong, 2003; Park et al., 2000). 특히 남조류에 의한 과다증식은 수돗물의 이취미(Bae et al., 2008)와 독소발생문제(Kim et al., 2010; Park et al., 2011)를 야기하여, 경관 및 친수활동 저해 등 상수원 관리에 어려움이 있다.

최근 팔당호에서 발생한 남조류의 과다증식은 주로 북한강에서 발생하였으며, 이 남조류는 팔당댐까지 영향을 미치

는 것으로 나타났다(NIER, 2014). 2011년 11월의 경우 북한강에서 수온이 10°C 이하의 저수온기 임에도 불구하고 남조류(*Anabaena*)가 과다 증식하여 geosmin이 최대 1,640 ng/L의 높은 농도로 검출되었다(You et al., 2013). 이로 인해 수도권지역에서 수돗물 품질저하로 많은 민원이 제기되었으며, 이 후 2012~2014년 여름과 가을에 북한강, 팔당호 등에서 지속적으로 이취미 물질의 발생이 보고되었다(NIER, 2014). 이러한 이취미 물질은 독성은 없으나 심미적 불쾌감을 일으키는 휘발성 물질로 정상적인 후각을 가진 사람은 4~10 ng/L의 농도에서 감지가 가능하다(Suffer et al., 1995). 방선균과 함께 이취미의 원인 생물로 알려져 있는 남조류는 부유성(planktonic) 남조류인 *Anabaena*, *Aphanizomenon* 등과 저서성(benthic) 남조류인 *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Lyngbya* 등이 알려져 있다(Jüttner and Watson, 2007). 이 중 저서성 남조류는 공지천 및 의암호 퇴적층 배양 연구(Kim et al., 2014)에서 *Oscillatoria tenuis*와 *O. limosa*가 이취미의 원인 종으로 보고되었으며, 남한강에서 원인 불명의 이취미 물질 발생의 원인 생물로도 지목되고 있다(MOE, 2014). 하지만 국내에서는 이러한 저서성 남조류에 대한 연구가 많이 진행되지 않았으며, 퇴적층에서 조류발생에 관한 연구도 *Anabaena*, *Microcystis* 등 일부 분류군에서만 연구가 진행

[†] To whom correspondence should be addressed.
skychen@korea.kr

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.

되고 있어 많은 연구가 필요한 실정이다(Han River Watershed Management Committee, 2012, 2013; Kang et al., 2014).

따라서 본 연구에서는 북한강, 남한강, 팔당호 등 팔당호 수역을 대상으로 퇴적층을 채집하여, 각 수온조건 변화에 따라 발생하는 조류군집 형성의 변화 및 그에 의한 이취미물질 발생여부를 파악하고자 하였다.

2. Materials and Methods

2.1. 조사 지점 및 실험구성

온도변화에 따른 퇴적층 배양과 식물플랑크톤 및 저서성 남조류 군집발생 실험을 위해 북한강의 3개 정점(MS: 경기도 남양주시 화도읍 금남리 묵현천 합류부, SB: 삼봉리, YC: 조안면 진중리 양수철교), 남한강 1개 정점(P3: 경기도 양평군 양서면 신원리), 팔당호 및 경안천 합류부 3개 정점(P2: 경기도 남양주시 조안면 능내리 팔당댐, P5: 광주시 남종면 분원리, KK: 광주시 퇴촌면 광동리 광동교)을 대상으로 수행하였다(Fig. 1).

시료는 2014년 10월 6일에 grab sampler를 사용하여 5~10 cm 두께의 퇴적층을 채집하였다. 퇴적층의 배양은 멸균된 250 mL 삼각플라스크에 2±0.5 cm 높이로 퇴적층이

교란되지 않도록 100 mL를 주입하였고, 배양액은 팔당호 현장수를 식물플랑크톤 네트(mesh 5 µm)로 여과하여 100 mL를 주입하였다. 수온은 10, 15, 20, 25°C의 조건으로 40 µmol/m²·S의 광조건, 광주기 16(L):8(D)로 배양하였다. 퇴적층의 배양기간은 의암호와 공지천 퇴적층의 배양연구(Kim et al., 2014)와 퇴적층에서 남조류 발생연구(Haßler et al., 2004; Yamamoto and Nakahara, 2009)결과, 배양 10~15일이 식물플랑크톤 현존량이 증가하고, 저서성 남조류의 성장이 가장 활발한 것으로 연구되어, 본 연구에서는 14일간 배양하여 분석하였다.

2.2. 조사항목 및 분석방법

각 채집지점의 이화학적 분석항목과 식물플랑크톤 발생 현황은 물환경정보시스템(MOE, 2014)과 조류경보제 및 팔당호 조류 생태연구(NIER, 2014)를 활용하였다. 퇴적층 배양에 따른 식물플랑크톤 군집분석은 표층수를 채집하여 Lugol's solution으로 고정하였고, 저서성 조류는 퇴적표층 2×2 cm² 면적을 100 mL 증류수에 희석하여 포르말린으로 고정하였다. 식물플랑크톤과 저서성 조류의 분석은 Sedgwick-Rafter counting chamber를 사용하여 위상차 현미경(Nikon, Japan)하에서 100~1,000 배율로 개체수를 산출하였으며, 규조류는 Simonsen의 분류체계(Krammer and Lange-Bertalot, 1986, 1988, 1991a, 1991b)에 따라 정리하였고, 그 외 분류군은 Chung (1993), Hirose et al. (1977), John et al. (2002), Kormák and Anagnostids (2005)를 참고하였다.

휴면포자의 분석은 퇴적표층을 2 cm 깊이로 채집하여 습증량 1 g(w/w)을 증류수에 분산시켰다. 분산은 초음파기(WUC-A03, Korean)로 30초간 2회 처리하여 현탁액을 일정하게 분쇄하였다. 분산액은 90 µm, 60 µm Nylon재질의 체로 순차적으로 분리하였으며, 최종적으로 10 µm Nylon체로 여과한 퇴적물 시료를 Panning methods (Matsuoka and Fukuyo, 2000)를 사용하여 휴면포자를 분리하였다. 분리된 휴면포자는 10 mL 부피로 농축하여 식물플랑크톤 검경과 동일하게 100~400배율로 현존량을 산출하였다.

이취미물질의 분석은 먹는물 수질감시항목 운영지침(MOE, 2011)에 따라 GC/MS(Bruker, 450GC/320MS)를 이용하여 headspace(HS)-solid phase microextraction (SPME)법으로 geosmin과 2-MIB(2-methyliso-borneol)를 분석하였다.

3. Results and Discussion

3.1. 조사지점의 이화학적 수질

조사지점의 이화학적 수질은 앞에서 제시한 수질측정망 자료(MOE, 2014)를 활용하였으며, 북한강의 경우 삼봉(SB) 지점과 양수철교(YC)지점에 인접한 P4(한강물환경연구소 앞) 지점의 자료를 활용하였다(Table 1). 연평균 수온은 14.5±8.7~16.1±9.3°C의 범위로 P5지점에서 약간 높았으며, 2014년 10월 6일 퇴적층 채집 시 20.2~20.7°C의 범위로 지점 간 차이가 거의 없었다. pH는 8.0±0.5~8.3±0.5의 범위로 지점 간 큰 차이를 보이지 않았으나, 채집 시 경안천 지점



Fig. 1. Survey sites for algae, sediment and odorous. North Han-River (MS: Mukhyen-Stream, SB: Sambong, YC: Yangsoo railroad bridge, South Han-River (P3: front of Wolgye-sa), Paldang-Lake (P2: front of dam, P5: Paldang-Lake) and Kyeongan-Stream (KK: Kyeongan-Stream)

(KK)이 9.1로 다소 높았다. 용존산소(DO)는 10.4±2.2~11.9±3.0 mg/L의 범위로 남한강(P3)과 KK지점이 높았고, 전기전도도(EC)는 117.1±27.4~350.0±93.7 μS/cm의 범위로 북한강 수역이 대체로 낮으며, KK가 가장 높게 나타났다. BOD는 0.9±0.2~2.6±1.3 mg/L의 범위로 경안천에서 가장 높았으며, 채집 시 모든 지점에서 2 mg/L 이하로 양호한 수질을 나타냈다(NIER, 2014). 엽록소 *a*는 6.0±4.1~27.9±18.3 mg/m³의 범위로 KK에서 가장 높았으며, 북한강 수역이 낮았다. 총질소(T-N)는 모든 지점이 1.5 mg/L이상의 농도로 과영양 상태(hypereutrophic)이며, 총인(T-P)은 북한강 수역을 제외한 지점에서 0.025 mg/L 이상으로 부영양 상태(eutrophic)로 나타났다(Forsberg and Ryding, 1980). 북한강의 경우 SB 지점의 총인 농도는 0.015 mg/L 이하로 빈영양 상태(oligotrophic), P4지점은 0.015~0.025 mg/L의 범위의 중영양 상태(mesotrophic)으로 나타났다.

팔당호에서 채수 및 여과하여 배양에 사용된 현장수는 총인이 0.004 mg/L 수준으로 낮았으나, 퇴적층시료에 주입한 이후에 0.042~0.044 mg/L의 범위로 증가 하였다. 배양 시작 시 총인의 농도는 부영양 상태(Forsberg and Ryding, 1980)로 식물플랑크톤 및 저서성 조류의 성장에 인이 제한 요인으로 작용하지 않을 것으로 판단된다.

3.2. 휴면포자(akinetes)의 분포와 Anabaena의 발생량

*Anabaena*는 북한강 및 팔당호에 출현하는 대표적인 유해조류(NIER, 2014; You et al., 2013)로 성장에 적합한 환경조건이 갖추어지지 않을 경우 휴면포자를 형성하여 퇴적층에 존재하게 된다(Kang et al., 2014). 이 때문에 퇴적층에 존재하는 휴면포자의 현존량은 잠재적인 남조류의 발생량이 된다.

북한강, 남한강 및 팔당호 지역의 휴면포자 분포 조사 결과 0~500 cells/g (w/w)의 범위로 양수철교(YC) 증양에서 현존량이 가장 높은 것으로 나타났다. 북한강에서는 유입천인 묵현천 합류부(MS)에서 200 cells/g (w/w)으로 하류의 삼봉(SB) 지점보다 높게 나타났다. SB는 2014년 7월~9월에 유해 남조류인 *Anabaena*가 최대 3,296 cells/mL 현존량으로 출현했던 지점(NIER, 2014)로 퇴적층 내 휴면포자의 현존량은 높지 않았다. YC의 경우 SB지점 하류에 위치하

며, 하폭이 넓어지는 지점으로 퇴적층이 형성되기 쉬워 휴면포자의 현존량이 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 청평댐의 무방류 또는 방류량이 적을 때 남한강 물이 양수철교 상류 1 km까지 역류하여(NIER, 2008), 북한강에 발생한 남조류가 팔당호로 유입되지 못하고 양수철교 부근에서 정체되는 것과 관련이 있을 것으로 사료된다.

팔당호 댐앞(P2) 지점은 휴면포자 현존량이 350 cells/g (w/w)수준으로 검출되었다. P2지점에서 출현한 *Anabaena*는 북한강에서 발생한 *Anabaena*의 유입뿐만 아니라, 퇴적층에 존재하는 휴면포자의 발아와 성장에 의해 발생할 가능성이 있다는 것으로 판단된다. 팔당호(P5)는 경안천(KK) 하류와 팔당호가 만나는 지점으로 P5에 휴면포자 현존량이 KK보다 높았으며, 유속과 관련이 있을 것으로 사료된다(NIER, 2008). 남한강(P3)은 *Anabaena*가 거의 검출되지 않은 지점으로(NIER, 2014), 본 연구에서도 휴면포자가 출현하지 않는 것으로 나타났다(Table 2).

휴면포자의 발아율(gemination rate)은 대상 분류군이나 조건에 따라 다르지만 배양 1~3일 동안 10~15°C에서 3~12%, 20~25°C 조건에서 17~48%로 알려져 있다(Baker and Bellifemine, 2000; Fay, 1988; van Dok and Hart, 1997). 공지천과의 함호의 연구에서는 퇴적층 배양 3일 후 휴면포자의 현존량이 10% 수준으로 감소하였으며, *Anabaena crassa*가 배양 4일째인 0.13~0.75×10³ cells/mL의 범위로 배양 12일까지 나타났다(Kim et al., 2014). 본 연구에서 *Anabaena* spp.는 SB, KK, YC의 10~15°C 조건에서 0.02~0.53×10³ cells/mL의 범

Table 2. Distribution of akinetes in North Han-River (MS, SB, TC) South Han-River (P3), Paldang-Lake (P2, P5) and Kyeongan-Stream (KK), 2014

Site	Number of akinetes (cells/g)		
	Left bank	Center	Right bank
MS: Mukhyen-Stream	-	-	200
SB: Sambong	-	50	50
YC: Yangsoo railroad bridge	100	500	250
P3: Front of Wolgye-sa	-	0	-
P2: Front of Paldang-dam	-	350	-
P5: Paldang-Lake	-	100	-
KK: Kyeongan-Stream	50	-	50

Table 1. Mean values of physicochemical factor values in North Han-River (SB, P4) South Han-River (P3), Paldang-Lake (P2, P5) and Kyeongan-Stream (KK), 2014

2014 Jan. to Dec.	Physicochemical factors (mean ± SD)					
	North Han-River		South Han-River	Paldang-Lake		Kyeongan-Stream
	SB	P4	P3	P2	P5	KK
W.T (°C)	14.5 ± 8.7	14.9 ± 8.3	15.4 ± 8.2	14.4 ± 8.0	16.1 ± 9.3	15.2 ± 9.4
pH	8.0 ± 0.5	8.1 ± 0.3	8.3 ± 0.5	8.1 ± 0.4	8.2 ± 0.4	8.0 ± 0.6
DO (mg/L)	10.8 ± 1.7	10.9 ± 1.6	11.4 ± 2.5	10.4 ± 2.2	11.1 ± 2.0	11.9 ± 3.0
EC (μS/cm)	117.1 ± 27.4	143.6 ± 29.4	237.4 ± 22.3	179.9 ± 30.5	267.2 ± 66.1	356.0 ± 93.7
BOD (mg/L)	0.9 ± 0.2	1.2 ± 0.5	2.2 ± 1.1	1.3 ± 0.4	2.0 ± 0.8	2.6 ± 1.3
Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	6.0 ± 4.1	8.8 ± 7.6	19.2 ± 14.4	10.6 ± 6.6	14.7 ± 10.1	27.9 ± 18.3
T-N (mg/L)	1.748 ± 0.302	1.821 ± 0.291	2.263 ± 0.461	1.989 ± 0.375	2.319 ± 0.706	2.998 ± 1.317
T-P (mg/L)	0.012 ± 0.004	0.017 ± 0.010	0.036 ± 0.021	0.024 ± 0.012	0.028 ± 0.012	0.044 ± 0.036

위, MS와 P2의 20~25°C 조건에서 0.15~0.24×10³ cells/mL의 범위로 공지천 의암호 연구(Kim et al., 2014)에 비해 대체로 현존량이 낮았다. 퇴적층의 휴면포자 발아실험에서 *Anabaena*의 발아 및 성장시기가 배양 9~12일, 23일에 가장 높았던 것으로(Kim et al., 2014; Yamamoto and Nakahara, 2009), 본 연구의 배양기간과 맞지 않았던 것으로 사료된다.

3.3. 퇴적층의 온도별 배양에 따른 식물플랑크톤 군집 발생

북한강, 남한강 및 팔당호 퇴적층의 온도별 배양에 따른 식물플랑크톤 군집은 전체 68분류군이 출현하였으며, 규조류가 29분류군으로 가장 다양하였으며, 녹조류 19분류군, 남조류 10분류군, 갈색편모조류 등 기타조류가 6분류군 출현하였다. 조사 지점에 따라 각 지점별 6~20분류군이 출현하였으며, 양수철교(YC) 15°C 배양시료에서 가장 적은 분류군이 출현하였고, 팔당댐(P2) 20°C 배양시료에서 가장 다양한 분류군이 출현하였다. 공지천 및 의암호의 퇴적층 배양연구(Kim et al., 2014)에서 31일간 배양한 결과 40~45분류군, Hašler et al. (2004)의 퇴적층 배양 연구에서도 40일간 49분류군이 출현한 것과 비교 할 때 출현 분류군이 다양하였다. 이것은 7개 조사지점과 4개 배양조건 총 28개의 각기 다른 배양조건으로 각각의 출현 분류군은 공지천

및 의암호 퇴적층 배양연구(Kim et al., 2014)에서 배양 14일 까지 14~18분류군 출현한 것으로 동일 기간 내 출현한 분류군수는 본 연구결과와 유사한 것으로 나타났다.

전 지점의 주요 출현종은 *Phormidium tenue*, *Pseudanabaena limnetica*, *Oscillatoria tenuis*, *Microcystis aeruginosa*, *Cyclotella atomus*, *Nitzschia actinastroides*, *Aulacoseira ambigua* 등으로 대부분 남조류와 규조류였으며, 녹조류는 출현 빈도가 낮았다. 북한강의 묵현천(MS)은 10~15°C의 배양조건에서 사상성 남조류인 *Phormidium tenue*가 39.2~58.1%의 범위로 우점 하였으며, 규조류인 *Cyclotella atomus*가 11.7~15.0%로 아우점종으로 출현하였다. 20°C 조건에서는 황색편모조류의 *Mallomonas* sp.가 25°C 조건에서는 녹조류인 *Micractinium pusillum*이 우점종으로 출현하였다(Table 3). MS의 현존량은 모든 조건에서 3.5×10³ cells/mL 이하로 낮았으며, 수온이 높을수록 녹조류의 현존량이 높았다. 삼봉리(SB) 지점은 10~15°C의 배양조건에서 *Pseudanabaena limnetica*과 *Cyclotella atomus*가 29.4~41.6%의 범위로 우점 종 및 아우점 종으로 출현한 것으로 MS 지점과 유사하였다. 20°C 조건에서 유해남조류인 *Microcystis aeruginosa*가 40.0%로 우점 하였으나, 현존량이 1.0×10³ cells/mL 이하로 높지 않았다. 25°C 조건의 경우 남조류가 전체 출현종의 79.9%로 높은 우점율을 나타냈으며, 사상성 남조류인 *Phor-*

Table 3. Dominant and subdominant species of phytoplankton for sediment incubation by various water temperatures

site	Temp. (°C)	Dominant species (%)	Subdominant species (%)
MS (Mukhyen-Stream)	10	<i>Phormidium tenue</i> (58.1)	<i>Cyclotella atomus</i> (11.7)
	15	<i>Phormidium tenue</i> (39.2)	<i>Cyclotella atomus</i> (15.0)
	20	<i>Mallomonas</i> sp. (60.4)	<i>Mougeotia</i> sp. (17.4)
	25	<i>Micractinium pusillum</i> (28.0)	<i>Crucigenia quadrata</i> (11.7)
SB (Sambong)	10	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (30.2)	<i>Cyclotella atomus</i> (29.4)
	15	<i>Cyclotella atomus</i> (41.6)	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (39.4)
	20	<i>Microcystis aeruginosa</i> (40.0)	<i>Rhodomonas</i> sp. (18.9)
	25	<i>Phormidium tenue</i> (32.9)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (27.6)
YC (Yangsoo railroad bridge)	10	<i>Cyclotella atomus</i> (56.5)	<i>Ankistrodesmus falcatus</i> (12.2)
	15	<i>Cyclotella atomus</i> (64.0)	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (16.0)
	20	<i>Microcystis aeruginosa</i> (61.7)	<i>Nitzschia acicularis</i> (19.6)
	25	<i>Microcystis aeruginosa</i> (72.6)	<i>Phormidium tenue</i> (13.1)
P3 (Front of Wolgye-sa)	10	<i>Cyclotella atomus</i> (34.4)	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (26.4)
	15	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (47.1)	<i>Stephanodiscus hantzschii</i> (15.6)
	20	<i>Nitzschia acicularis</i> (36.8)	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (26.7)
	25	<i>Oscillatoria tenuis</i> (83.2)	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (9.0)
P2 (Front of Paldang-dam)	10	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (85.6)	<i>Rhodomonas</i> sp. (2.3)
	15	<i>Nitzschia actinastroides</i> (52.5)	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (28.4)
	20	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (74.4)	<i>Nitzschia acicularis</i> (10.0)
	25	<i>Microcystis aeruginosa</i> (47.0)	<i>Nitzschia acicularis</i> (14.4)
P5 (Paldang-Lake)	10	<i>Nitzschia actinastroides</i> (59.0)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (19.9)
	15	<i>Microcystis aeruginosa</i> (40.0)	<i>Oscillatoria tenuis</i> (13.2)
	20	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (36.0)	<i>Microcystis aeruginosa</i> (24.8)
	25	<i>Microcystis aeruginosa</i> (44.0)	<i>Mougeotia</i> sp. (18.0)
KK (Kyeongang-Stream)	10	<i>Nitzschia actinastroides</i> (45.2)	<i>Cyclotella atomus</i> (13.9)
	15	<i>Nitzschia actinastroides</i> (31.4)	<i>Rhodomonas</i> sp. (12.7)
	20	<i>Aulacoseira ambigua</i> (33.0)	<i>Aulacoseira granulata</i> (23.4)
	25	<i>Nitzschia acicularis</i> (35.5)	<i>Pseudanabaena limnetica</i> (23.5)

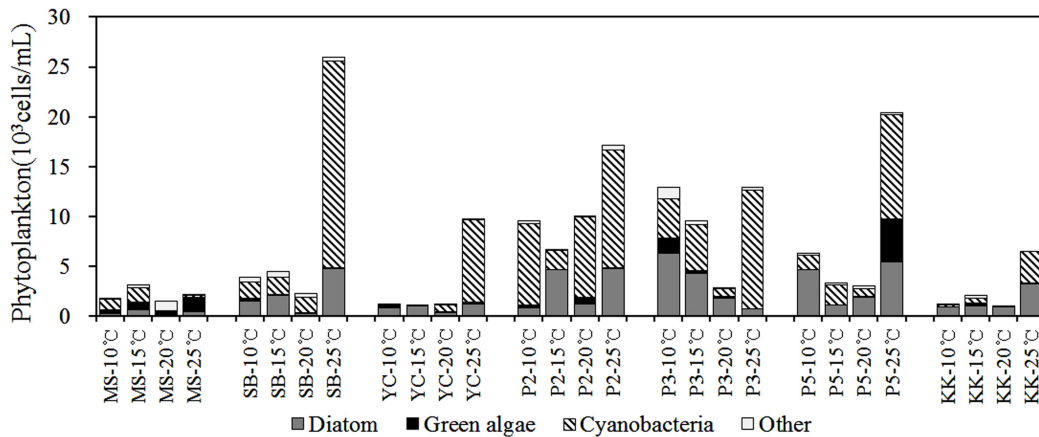


Fig. 2. The cell number of Phytoplankton for sediment incubation by various water temperatures.

*midium tenue*가 8.5×10^3 cells/mL, *Microcystis aeruginosa*가 7.1×10^3 cells/mL로 모든 지점과 온도조건에서 남조류 현존량이 가장 높았다(Table 3)(Fig. 2).

YC지점 퇴적층은 10~15°C의 배양조건에서 *Cyclotella atomus*가 56.5~64.0%의 범위로 우점 하였으며, 20~25°C에서는 *Microcystis aeruginosa*가 61.7~72.6%의 범위로 우점 하였다. 10~20°C 조건의 경우 현존량이 1.0×10^3 cells/mL 수준으로 낮았으나, 25°C에서 9.6×10^3 cells/mL로 높았다. 남한강(P3)지점의 퇴적층은 10~20°C의 배양조건에서 *Pseudanabaena limnetica*와 규조류(*Cyclotella atomus*, *Stephanodiscus hantzschii*, *Nitzschia acicularis*)가 우점종 및 아우점종으로 출현하였으며, 규조류의 경우 수온이 증가 할수록 현존량이 감소하였다. 25°C의 경우 저서성 남조류로 알려진(John et al., 2002; Kim et al., 2014), *Oscillatoria tenuis*가 83.2% (10.7×10^3 cells/mL)로 우점하였으며, *Pseudanabaena limnetica*가 9.0%로 아우점하였다(Table 3)(Fig. 2). *Oscillatoria tenuis*는 저층에서 성장하여 매트 형성을 하지만, 표층으로 부유되는 특징을 갖고 있으며(John et al., 2002; Kormák and Anagnostids, 2005), 이취미 원인종으로도 알려져 있다(Jüttner and Watson, 2007).

P2지점의 퇴적층은 10~20°C의 배양조건에서 *Pseudanabaena limnetica*와 규조류가 우점종 및 아우점종으로 출현한 것으로 P3와 유사하였으나, P3는 *Cyclotella atomus*와 *Stephanodiscus hantzschii* 등 중심규조(Order Centrales)가 주로 출현하였으며, P2는 *Nitzschia acicularis*, *N. actinastroides* 등 우상규조(Order Pennales)가 주로 출현하였다. *Cyclotella atomus*과 *Stephanodiscus hantzschii*의 경우 저수온기에 주로 출현하는 것으로 알려져 있으며(Kim et al., 2007; MOE, 2014) 본 연구에서도 10~15°C 조건에서 우점종으로 출현하였다. P2의 25°C 조건에서는 *Microcystis aeruginosa*가 47.0%로 우점하였으며, 현존량이 8.0×10^3 cells/mL로 높았다. P5는 모든 온도조건에서 *Microcystis aeruginosa*가 19.9~44.0%의 범위로 우점종 및 아우점 종으로 출현하였으며, 10~20°C의 배양조건에서는 현존량이 2.0×10^3 cells/mL 이하로 높지 않았으나, 25°C에서는 8.9×10^3 cells/mL로 높게 나타났다. 경안천(KK) 지점은 *Nitzschia acicularis*, *N.*

actinastroides 및 *Aulacoseira ambigua* 등 규조류가 31.4~45.2%의 범위로 주로 우점 하였으며, 10~20°C의 배양조건에서 현존량이 2.0×10^3 cells/mL 이하로 높지 않았고, 25°C에서 6.4×10^3 cells/mL의 현존량을 나타냈다(Table 3)(Fig. 1).

*Phormidium tenue*와 *Pseudanabaena limnetica*는 각 온도 조건에서 우점종 및 아우점종으로 출현하였으나, 실제 팔당호에서는 출현빈도가 낮으며, 흥천강(Beak et al., 2014), 오십천 및 송천천(Kim and Lee, 2013) 등과 같이 하천에서 식물플랑크톤으로 출현하였다.

3.4. 저서성 남조류의 발생과 이취미 물질(geosmin, 2-MIB)

일반적으로 이취미물질은 조류의 성장기와 안정기에는 체외로 거의 배출되지 않지만 사멸기에는 체내 축적된 물질이 체외로 배출되는 것으로 알려져 있다(Bae et al., 2008; Jüttner and Watson, 2007). 저서성 남조류는 남조매트의 형성과 부상시기에 성장과 사멸을 반복하면서 이취미 물질의 농도가 증가하는 것으로 연구되었으며(Kim et al., 2014), 이 때문에 남조매트의 형성은 이취미 물질의 발생여부를 확인 할 수 있는 지표로 활용될 수 있다.

각 실험조건에서 퇴적층의 변화는 10~15°C의 조건에서 배양 7일까지는 큰 변화가 없었으며, 배양 14일에 15°C 조건의 삼봉(SB), 남한강(P3), 팔당호(P5)지점에서 남조류 사상체가 일부 관찰되었다. 20°C 조건에서는 배양 7일에 양수철교(YC), 팔당댐(P2), P3지점에서 부분적으로 남조매트가 관찰되었으며, 배양 14일에 P3 지점이 남조매트가 뚜렷하게 형성되었다. 25°C는 YC, P2, P3지점에서 남조매트가 관찰되었으며, P3지점에서 남조류 사상체가 일부 표층으로 부유된 것을 확인하였으나, 실험종료 시까지 매트의 부상은 관찰되지 않았다. *Oscillatoria*, *Phormidium* 등의 저서성남조류는 퇴적층에서 성장하여 남조류 매트를 형성하고 세포밀도가 높아지면 수층으로 부상되는 것으로 알려져 있으며(John et al., 2002), Kim et al. (2014)의 퇴적층배양 연구에서 저서성 남조류가 $2.0 \sim 3.0 \times 10^6$ cells/cm² 이상일 때 부상하였다. 본 실험의 저서성남조류 매트가 형성되었지만 현존량이 1.5×10^6 cells/cm² 미만으로서 매트가 표층으로 부상하기에 저서성남조류의 성장이 불충분했던 것으로 판단된다.

각 지점에서 출현한 저서성 남조류는 0~1.15×10⁶ cells/cm²의 범위로, 경안천(KK)지점에서(10°C) 저서성 남조류가 출현하지 않았으며, P3지점에서(25°C) 가장 높은 현존량을 나타냈다. 목현천(MS)과 KK지점은 모든 온도조건에서 0.2×10⁶ cells/cm² 이하로 낮았으며, SB의 15°C에서 1.14×10⁶ cells/cm², P5의 15°C에서 0.45×10⁶ cells/cm²로 출현하는 등 저서성 남조류의 현존량은 온도조건보다 조사지점의 퇴적층 발달과 관련이 있을 것으로 판단된다. 출현종은 저온시기에 주로 *Phormidium* sp., *Pseudanabaena* sp., *Lyngbya* sp. 등이 출현하였으며, 수온이 높을수록 *Oscillatoria tenuis*, *O. limosa* 등의 현존량이 높았다.

*Oscillatoria tenuis*와 *O. limosa*는 이취미 원인종으로 (Jüttner and Watson, 2007), 두 종의 남조류의 현존량이 높았던, SB의 25°C, P3의 15°C와 25°C 조건에서 2-MIB농도가 129.4~286.8 ng/L의 범위로 매우 높았다. P2의 10°C, 20°C와 P5의 25°C의 경우 저서성남조류의 현존량이 낮고, *Oscillatoria tenuis*와 *O. limosa*가 출현하지 않았음에도 2-MIB농도가 58.5~197.4 ng/L의 범위로 높았다(Fig. 3). 이것은 *Phormidium tenue*와 *Pseudanabaena limnetica*가 부유성 남조류로 현존량이 높았던 지점으로 이 두 종의 남조류 역시 이취미 원인종이며(Jüttner and Watson, 2007), 2-MIB 농도의 원인 종으로 사료된다. Geosmin은 0~25.5 ng/L의 범위로 대체로 농도가 낮았으며, SB의 15°C와 YC의 25°C는 *Phormidium* sp., *Lyngbya* sp.가 1.0×10⁶ cells/cm² 이상으로 높은 현존량을 나타냈으나, 이취미 물질과 큰 상관성이 없는 것으로 나타났다.

수계에서 발생하는 이취미물질은 남조류의 성장과 밀접한 관련이 있으며, 부유성 남조류 뿐만 아니라 저서성남조류의 증식에 의해서도 영향을 받는다고 보고되고 있다 (Jüttner and Watson, 2007). 본 연구의 결과 팔당호 수역에서는 이취미 원인종인 *Phormidium tenue*, *Pseudanabaena limnetica*, *Oscillatoria tenuis*, *O. limosa*가 높은 현존량으로 출현하였으며, 2-MIB의 농도와 관련이 깊었다. 2-MIB는 흔들말 목(Oder Oscillatoriales)에 속하는 *Oscillatoria*, *Phormidium*, *Lyngbya* 등의 조류가 주로 생산하는 것으로 알려

져 있으며, 의암호, 공지천, 팔당호, 북한강 및 남한강에서 2-MIB의 원인종으로 출현하였다(NIER, 2014). 특히 *Phormidium tenue*와 *Pseudanabaena limnetica*는 저층과 표층의 모든 온도조건에서 출현한 것으로 *Oscillatoria tenuis* 및 *O. limosa*와 함께 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

4. Conclusion

북한강, 남한강 및 팔당호 지역의 퇴적층의 온도별 배양에 따른 조류군집 형성과 이취미 발생특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 퇴적층에서 *Anabaena*의 발생가능성을 나타내는 휴면포자는 0~500 cells/g (w/w)의 범위로 양수철교 중앙에서 현존량이 가장 높았으며, 퇴적층 배양 결과 북한강과 팔당댐 지점에서 최대 0.24×10³ cells/mL의 *Anabaena*가 출현한 것으로 나타났다.
- 2) 식물플랑크톤 군집은 배양기간 동안 전체 68분류군이 출현하였으며, 구조류가 29분류군으로 가장 다양하였고, 주요 출현종은 *Phormidium tenue*, *Pseudanabaena limnetica*, *Oscillatoria tenuis*, *Microcystis aeruginosa*, *Cyclotella atomus*, *Nitzschia actinastroides*, *Aulacoseira ambigua* 등으로 대부분 남조류와 구조류로 나타났다.
- 3) 식물플랑크톤 현존량은 0~20.7×10³ cells/mL로 유해 남조류인 *Microcystis aeruginosa*가 삼봉, 양수철교, 팔당댐, 경안천 등에서 0.13~8.97×10³ cells/mL로 출현하였으며, 남한강의 경우 25°C에서 저서성 남조류이자 이취미 원인종인 *Oscillatoria tenuis*가 10.7×10³ cells/mL로 높게 나타났다.
- 4) 퇴적표층에서는 *Phormidium* sp., *Pseudanabaena* sp., *Lyngbya* sp. 등이 저온시기에 주로 출현하였고, 수온이 높을수록 *Oscillatoria tenuis*, *O. limosa* 등 이취미를 발생시키는 남조류의 현존량이 높은 것으로 나타났다.
- 5) 이취미 물질은 geosmin이 최대 25.5 ng/L, 2-MIB가 286.8 ng/L로 모든 온도조건에서 이취미가 검출되었으며, 이취미 원인종으로 출현한 *Oscillatoria tenuis*, *O. limosa*, *Phormi-*

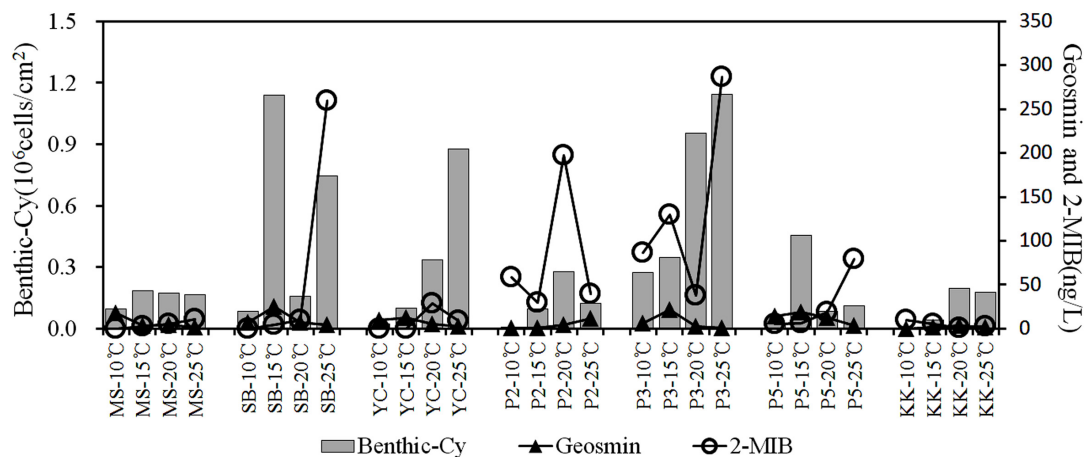


Fig. 3. Change of geosmin and 2-MIB concentrations and benthic cyanobacteria for sediment incubation by water temperature.

dium tenue, *Pseudanabaena limnetica*의 현존량과 2-MIB의 상관성이 높은 것으로 이에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 2014년도 국립환경과학원 박사후연수과정 지원 사업(팔당호 조류생리생태 특성연구)에 의해 이루어진 것임.

References

- Bae, B. U., Lee, Y. J., and Lim, M. G. (2008). Comparison of Taste and Odor in Raw Water from the Main Daecheong Reservoir and its Regulating Reservoir Downstream, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(5), pp. 598-602. [Korean Literature]
- Baker, P. D. and Bellifemine, D. (2000). Environmental Influences on Akinete Germination of *Anabaena circinalis* and Implications for Management of Cyanobacteria Blooms, *Hydrobiologia*, 427(1), pp. 65-73.
- Beak, J. S., Kim, H. N., and Lee, O. M. (2014). The Water Quality Assessment based on the Algal Communities and Biotic Indices in Hongcheon river, Gangwon-do, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(6), pp. 596-604. [Korean Literature]
- Chung, J. (1993). *Illustration of the Freshwater Algae of Korea*, Academy Publishing Company, Seoul, pp. 496. [Korean Literature]
- Fay, P. (1988). Viability of Akinetes of the Planktonic Cyanobacterium *Anabaena circinalis*, *Proceeding of Royal Society of London, series B*, 234, pp. 283-301.
- Forsberg, C. and Ryding, V. H. (1980). Eutrophication Parameters and Trophic State Indices in 30 Wsedish Waste-receiving Lakes, *Archives of Hydrobiology*, 89, pp. 189-207.
- Han River Watershed Management Committee. (2012). *The Distribution and Eco-physiological Characteristics of Harmful Algae in the Han-river Watershed*, Han River Watershed Management Committee, pp. 359. [Korean Literature]
- Han River Watershed Management Committee. (2013). *Investigation of Causes of Off-flavor Material Production by Harmful Algae and Management Strategy*, Han River Watershed Management Committee, pp. 388. [Korean Literature]
- Hašler, P., Pouličková, A., and Lysáková, M. (2004). The Survival and Vitality of Cyanobacteria and Algae in Fishpond Bottom Sediments, *Czech Phycology Olomouc*, 4, pp. 133-144.
- Hirose, H. M., Akiyama, T., Imahori, K., Kasaki, H., Kumano, S., Kobayashi, H., Tajahashi, E., Tsumura, T., Hirano, M., and Yamagishi, T. (1977). *Illustrations of the Japanese Freshwater Algae*, Uchidarokakuho Publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan, pp. 932.
- John, D. M., Whitton, B. A., and Brook, A. J. (2002). *The Freshwater Algal Flora of the British Isles*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 702.
- Jüttner, F. and Watson, S. B. (2007). Biochemical and Ecological Control of Geosmin and 2-methylisoborneol in Source Waters, *Applied and Environmental Microbiology*, 73(4), pp. 4395-4406.
- Kang, P. G., Lee, S. J., Byeon, M. S., Yoon, S. A., Kim, H. N., Lee, J. K., and Hwang, S. J. (2014). Current Status and Perspectives in the Akinete Study of the Blue-green Algal Genus *Anabaena*, *Korean Journal of Ecology and Environment*, 47(1), pp. 1-12.
- Kim, D. K., Jeong, K. S., and Whigham, P. A. (2007). Winter Diatom Blooms in a Regulated River in South Korea: Explanations Based on Evolutionary Computation, *Freshwater Biology*, 52, pp. 2021-2041.
- Kim, H. B., Park, H. K., Shin, K. D., and Moon, J. S. (2010). The Characteristics of Toxin Production in the Korean Toxic Cyanobacteria, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(5), pp. 834-840. [Korean Literature]
- Kim, Y. J. and Lee, O. M. (2013). The Water Quality Assessment based on Phytoplankton Community and Physico-chemical Factors of Oship-stream, Songchun-stream and Namdae-stream in Gyeongsangbukdo, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 29(3), pp. 428-437. [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 Plankton Community and Occurences of Odorous Compounds by Sediment Incubation, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(6), pp. 658-664. [Korean Literature]
- Kong, D. S. (2014). Water Quality Modeling of Eutrophic Transition Zone in a River-Type Reservoir Paldang, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(4), pp. 429-440. [Korean Literature]
- Kormák, J. and Anagnostidis, K. (2005). *Süßwasserflora von Mitteleuropa, Cynoprokaryota: 2 Teil/2nd Part: Oscillatoriales*, Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, München, 19, pp. 759.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1986). *Bacillariophyceae. 1. Naviculaceae*, In Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H., and Mollenhauer, D. (eds), Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2, G. Fischer Verlag, Stuttgart, pp. 876.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1988). *Bacillariophyceae. 2. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae*, In Ettl, H., Gerloff, J., H. Heynig and D. Mollenhauer (eds), Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2, G. Fischer Verlag, Stuttgart, pp. 596.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1991a). *Bacillariophyceae 3. Centrales, Fragilariaceae, Eumotiaceae*, In Ettl, H., Gerloff, J., Heynig, H. and Mollenhauer, D. (eds), Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2, G. Fischer Verlag, Stuttgart, pp. 576.
- Krammer, K. and Lange-Bertalot, H. (1991b). *Bacillariophyceae. 4. Achnanthaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema, Gesamtliteraturverzeichnis*, In Ettl, H., Gärtner, G., Gerloff, J. Heynig, H., and Mollenhauer, D. (eds), Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2, G. Fischer Verlag, Stuttgart, pp. 437.
- Matsuoka, K. and Fukuyo, Y. (2000) *Technical Guide for Modern Dinoflagellate Cyst*, WESTPAC-HAB/WESTPAC/IOC, Japan Society for the Promotion of Science, pp. 29.
- Ministry of Environment (MOE). (2011). *Drinking Water Quality Monitoring Guideline*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (MOE). (2014). *Water Environment*

- Information System (WEIS)*, <http://water.nier.go.kr/waterMeasurement/selectWater.do> (accessed Mar. 2015). [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2008). *Multidimensional Analysis on Material Transport in Lake Paldang (II)*, National Institute of Environmental Research, pp. 130. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2014). *Physiological and Ecological Characteristics of Algae in the Lake Paldang (I)*, National Institute of Environmental Research, pp. 62. [Korean Literature]
- Park, H. K. and Jheong, W. H. (2003). Long-term Changes of Algal Growth in Lake Paldang, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 19(6), pp. 673-684. [Korean Literature]
- Park, H. K., Jheong, W. H., Kwon, O. S., and Ryu, J. L. (2000). Seasonal Succession of Toxic Cyanobacteria and Microcystin concentration in Paldang Reservoir, *Algae*, 15(1), pp. 277-282. [Korean Literature]
- Park, H. K., Kim, H. B., Lee, J. J., Lee, J. A., Lee, H. J., Park, J. H., Seo, J. K., Youn, S. J., and Moon, J. S. (2011). Investigation of Criterion on Harmful Algae Alert System using Correlation between Cell Numbers and Cellular Microcystins Content of Korea Toxic Cyanobacteria, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 27(4), pp. 491-498. [Korean Literature]
- Suffet, I. M., Mallevalle, J., and Kawczynski, E. (1995). *Advances in Taste-And-Odor Treatment and Control*, American Water Works Association Research Foundation in Denver, Colorado, pp. 385.
- van Dok, W. and Hart, B. T. (1997). Akinete Germination in *Anabaena circinalis*(Cyanophyta), *Journal of Phycology*, 33, pp. 12-17.
- Yamamoto, Y. and Nakahara, H. (2009). Life Cycle of Cyanobacterium *Aphanizomenon flos-aquae*, *Taiwania*, 54(2), pp. 113-117.
- 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-Hna River, Korea, *Korean Journal of Ecological and Environment*, 46(1), pp. 135-144. [Korean Literature]