

## 팔당호에서 분리한 남조 *Anabaena circinalis*의 지오스민 생산 잠재성

박혜진 · 박명환\* · 심연보<sup>1</sup> · 임종권<sup>1</sup> · 황순진\*

건국대학교 환경보건과학과, <sup>1</sup>국립환경과학원 한강물환경연구소

**Geosmin Production Potential of a Cyanobacterium, *Anabaena circinalis* Isolated from Lake Paldang, Korea.** Park, Hye-Jin (0000-0001-5825-7384), Myung-Hwan Park\* (0000-0001-8680-7793), Yeon-Bo Sim<sup>1</sup> (0000-0003-2317-8146), Jong-Kwon Im<sup>1</sup> (0000-0003-3994-5127) and Soon-Jin Hwang\* (0000-0001-7083-5036) (Department of Environmental Health Science, Konkuk University, 120, Neungdong-ro, Gwangjin-gu, Seoul 05029, Republic of Korea; <sup>1</sup>Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Yangpyeong 12585, Republic of Korea)

**Abstract** This study was conducted to evaluate the characteristics of geosmin production of *Anabaena circinalis* under different environmental condition. The test cyanobacterium was isolated from Lake Paldang. The growth rate and geosmin production of *A. circinalis* were examined with different variables including temperature (10, 15, 20, 25°C), light intensity (60, 120, 240  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), and phosphorus concentration (0.01, 0.05, 0.25, 0.50, 1.00  $\text{mg L}^{-1}$ ). The highest growth rate and chlorophyll-*a* (Chl-*a*) concentration appeared at 25°C, 60  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  and 1.00  $\text{mg P L}^{-1}$  for temperature, light intensity, and P concentration, respectively. Total geosmin production was highest at the optimal growth condition of each variable, while chlorophyll-specific geosmin production (the ratio of geosmin to Chl-*a*) was higher at the less favorable growth condition, indicating high potential of the off-flavor problem during low temperature period, e.g., late fall and early winter. Our results demonstrated that geosmin production of *A. circinalis* was directly related to chlorophyll synthesis and varied with cellular growth condition.

**Key words:** geosmin, *Anabaena circinalis*, chlorophyll-*a*, water temperature, light intensity, nutrients

### 서 론

세계적으로 다양한 담수생태계에서 남조류의 대발생이 지속적으로 보고되고 있으며 (Huisman *et al.*, 2005; Paerl and Fulton, 2006), 이는 대부분의 나라에서 물관리의 중요

한 문제로 자리잡고 있다. 조류의 성장은 여러 환경요인이 복합적으로 관련되어 있다 (Hutchinson, 1957; Carpenter and Kitchell, 1993; Sterner and Grover, 1998; Brian *et al.*, 2003). 특히 남조류는 높은 수온과 광조건을 선호하며 (Sommer *et al.*, 1986; Tryfon and Moustaka-Gouni, 1997), 종에 따라 질소를 고정하거나 부력을 조절하기 때문에 (Brookes *et al.*, 1999; Herrero *et al.*, 2001; Huisman *et al.*, 2005; Paerl and Fulton, 2006; Chu *et al.*, 2007) 환경 변화에 적응력이 높아 대발생할 가능성이 높다 (Huisman *et al.*, 2005; Paerl and Fulton, 2006). 남조류의 대발생은 수중의

Manuscript received 16 October 2017, revised 14 December 2017, revision accepted 14 December 2017

\* Corresponding author: Tel: +82-2-450-3748, Fax: +82-2-456-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr  
Tel: +82-2-452-3749, Fax: +82-2-456-5062, E-mail: parkmh96@konkuk.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

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, provide the original work is properly cited.

탁도를 증가시키고 분해시 용존산소를 소비하여 다른 생물과 수생태계에 부정적인 영향을 미친다(Scheffer, 1998). 인간에게까지 심미적, 보건적인 악영향을 줄 수 있는데, 이들에 의해 발생하는 지오스민(geosmin), 2-MIB 등 이취미 물질은 특히 상수원에서 음용수의 관리와 이용에 많은 어려움을 준다(Slater and Blok, 1983; Hosaka *et al.*, 1995; Young *et al.*, 1999; Baker *et al.*, 2001; Vilalta *et al.*, 2004). 또한 microcystin, anatoxin 등 다양한 독소를 생산함으로써 공중 보건상 위험성을 내재하고 있다(Scheffer, 1998; Paerl and Huisman, 2009).

지오스민은 Gerber and Lechevalier (1965)에 의하여 방선균(actinomycetes)에서 처음으로 분리되었다. Safferman *et al.* (1967)은 남조류 *Anabaena* sp.에서 지오스민을 발견하였고, 또한 *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Oscillatoria*, *Microcystis* 등 약 50여 종 이상의 남조류에서 이취미 물질이 생산된다고 알려져 있다(Gerber and Lechevalier, 1965; Safferman *et al.*, 1967; Henley, 1970; Paerl and Millie, 1996; Watson, 2003). 지오스민은 독성은 없으나 냄새로 인한 심미적 불쾌감을 야기하여 국내에서는 먹는물 수질 감시항목으로 지정하여  $20 \text{ ng L}^{-1}$  이하로 관리하고 있다(MOE, 2011).

2011년 11~12월에 북한강 수계에서 남조류 *Anabaena circinalis*가 대발생 하였고 이로 인해 팔당호에서 지오스민 농도가 최고  $1,640 \text{ ng L}^{-1}$ 까지 검출되었으며, 수도권 주민들의 식수이용에 큰 불편을 야기한 바 있다(You *et al.*, 2013). 2000년대까지 북한강 수계에서 주로 출현한 남조류 중 상대적으로 높은 밀도를 보인 우점종은 *Anabaena*와 *Microcystis*였으나, 최근에는 *Microcystis*보다 *Anabaena*(특히 *Anabaena circinalis*)가 더욱 우점하며 출현하는 경향을 나타내었다(HRWMC, 2015). 향후에도 북한강 수계에서 2011년과 같은 *Anabaena*의 대발생에 따라 수계 내 지오스민 농도가 크게 증가할 가능성이 있기 때문에 *Anabaena*의 성장 및 지오스민 생산과 관련된 기초 정보의 필요성이 크게 요구된다. 2011년 팔당 상수원에서 지오스민으로 인한 문제 이후에 *Anabaena*를 대상으로 최근 여러 연구가 이루어졌다. 그러나 선행 연구에서 보고된 자료는 분류적 특성(Li *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2014), 휴면포자 발아 특성 및 조류성장잠재력(Park *et al.*, 2014, 2015), 현장의 환경생태적 특성과 관련한 내용(Park and Jheong, 2003; Kim *et al.*, 2009; You *et al.*, 2013; Byun *et al.*, 2014, 2015)이 대부분이었고, 아직까지 국내에서는 *A. circinalis*의 성장에 따른 geosmin 생산 특성에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구는 북한강 및 한강 수계에서 지오스민 원인종으로 주목 받은 *A. circinalis*를 현장에서 분리하여 여러 가지 다

른 환경조건(온도, 광도, 영양염)에서의 성장과 지오스민 생산 특성을 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 실험대상 조류

남조 *Anabaena circinalis*는 팔당호에서 2012년 8월에 채집하여, Guillard (1973)의 방법에 따라 분리한 후 배양하였다. 채집한 조류 시료는 도립현미경(Axiovert A1, ZEISS, Germany)의 200배 배율 하에서 micropipette으로 조류세포 사슬을 분리하여 hole slide에 옮기고 이를 다시 증류수로 3~4회 세척하였다. 세척된 최종 사슬은 CB 배지(Watanabe and Kasai, 1985)가 담긴 96 well plate에 접종하였으며, 그 후 세포가 성장하면 24 well plate → 12 well plate → 50 mL 시험관의 순서로 단계적으로 옮겨서 접종하여 배양하였고, 마지막에는 250 mL 삼각플라스크에 옮겨 배양하였다. 최종적으로 분리된 균주를 CB 배지에 접종한 후 온도  $25^{\circ}\text{C}$ , 광도  $60 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (light : dark = 14 : 10)에서 배양 및 유지하였다.

### 2. 환경 조건별 배양 실험

온도와 광도 구배별 실험은 CB 배지를 사용하였고, 초기 접종 세포밀도는 약  $10^5 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 하였다. 온도 구배별 실험은 배양기(VS-1203P4S, Vision Scientific Co., Korea) 내의 온도를 10, 15, 20,  $25^{\circ}\text{C}$ 로 조절하고, 광도는  $60 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (light : dark = 14 : 10)로 유지하였다. 광도 구배별 실험은 배양기 내의 온도를  $25^{\circ}\text{C}$ 로 유지하고 광도는 60, 120,  $240 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (light : dark = 14 : 10)로 조절하였다. 각 배양 조건에서 고정된 온도( $25^{\circ}\text{C}$ )와 광도( $60 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) 및 광주기(light : dark = 14 : 10)는 선행연구(HRWMC, 2012)에서 파악한 가장 적합한 성장조건으로 결정되었다.

영양염 구배별 실험은 과거 20년간 팔당호의 영양염(총 용존질소, 총용존인) 평균 농도(DTN:  $1.73 \text{ mg L}^{-1}$ ; DTP:  $0.01 \text{ mg L}^{-1}$ )를 바탕으로 질소 농도를  $2.00 \text{ mg N L}^{-1}$ 로 고정한 후 인 농도는  $0.01 \text{ mg P L}^{-1}$ 를 기준으로 하여 5, 25, 50, 100배(0.05, 0.25, 0.50,  $1.00 \text{ mg P L}^{-1}$ )로 조절하여 이용하였다. 조류는 질소와 인 성분이 없는 배지에서 3~5일간 배양하여 세포 내 질소와 인을 소모시킨 후 약  $10^5 \text{ cells mL}^{-1}$ 의 밀도로 접종하였다. 조류는 온도  $25^{\circ}\text{C}$ , 광도  $60 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (light : dark = 14 : 10)에서 배양하였으며 하루에 수 차례 손으로 흔들어 혼합하였다. 모든 실험

은 *A. circinalis* 성장이 정체기 (stationary phase)에 도달할 때까지 약 2주 동안 진행되었다.

3. 조류 성장을 측정

성장을 측정을 위하여 매일 배양용기로부터 1 mL 샘플을 추출하여 Sedgewick-Rafter Counting Chamber에 옮긴 후 광학현미경 (Axiostarplus, ZEISS, Germany) 하에서 세포수를 계수하였다. 계수된 세포수를 바탕으로 아래의 식에 근거하여 배양액을 매일 샘플링 한 후 성장률( $\mu$ )을 각각 계산하여 평균값을 산정하였다(APHA, 2005).

$$\mu(d^{-1}) = \ln(X_2/X_1)/(T_2 - T_1)$$

$X_1$ : 배양실험의 최초 세포수(cells mL<sup>-1</sup>)

$X_2$ : 배양일별 각각 샘플링 한 시간의 세포수(cells mL<sup>-1</sup>)

( $T_2 - T_1$ ): 최초 배양일( $T_1$ )과 각각의 샘플링( $T_2$ ) 간 시간 간격(day)

실험 종료일에 Chlorophyll-*a* (Chl-*a*)를 분석하였다. 시료를 GF/F 여과지(Whatman International Ltd., England)로 여과한 후 90% 아세톤이 담긴 시험관 넣고 24시간 동안 4°C의 암상태에 두었다. 이후 2,000 rpm에서 20분간 원심분리(VS-5000I, Vision Scientific Co., Korea)하고 상등액을 분광광도계를 이용하여 흡광도를 측정한 후 Standard method(APHA, 2005)에 따라 Chl-*a* 농도를 계산하였다.

4. 지오스민 정량분석

실험 종료 후 HS-SPME(Head Space-Solid Phase Micro-Extraction)법(MOE, 2012)에 따라 지오스민을 분석하였다. 본 연구에서 사용한 지오스민의 분석을 위한 실험조건은 Table 1과 같다. 분석 전 시료 전처리를 위해 화이버를 270°C에서 1시간 이상 헬륨가스를 1 mL min<sup>-1</sup>로 흘려 활성화하고 20 mL vial에 시료 10 mL와 정제된 염화나트륨(NaCl) 3 g을 넣어 70°C, 400 rpm으로 교반하면서 SPME

화이버에 30분간 흡착시켰다. 전처리를 통해 흡착시킨 시료를 270°C, 4분간 탈착시켜 가스크로마토그래프/질량분석기(GC/MS)(450-GC, 320-MS, BRUKER)로 분석하였다. 크로마토그램에서 각 분석성분의 정제시간에 해당하는 위치의 봉우리들로부터 봉우리 면적을 구한 후, 절대검정곡선법을 적용하여 지오스민 농도를 계산하였다. 절대검정곡선은 정제수 10 mL에 표준혼합용액(47525-U, SUPELCO)을 0.005~0.2  $\mu\text{g L}^{-1}$ 까지 단계적으로 첨가하여 각 분석화합물의 농도( $\mu\text{g L}^{-1}$ )와 각 분석화합물에 해당하는 봉우리 면적을 통해 작성하였다.

5. 통계분석

각 환경조건에 따른 남조류 세포의 성장의 차이를 확인하기 위하여 세포밀도를 이용하여 일원배치분산분석(one-way ANOVA)을 실시하였으며, 세포밀도와 지오스민 농도 간의 연관성을 파악하기 위하여 상관분석을 실시하였다(SPSS Inc., v.18.0.0). 통계적 유의성은 유의확률  $p < 0.05$ 에서 결정하였다.

결과 및 고찰

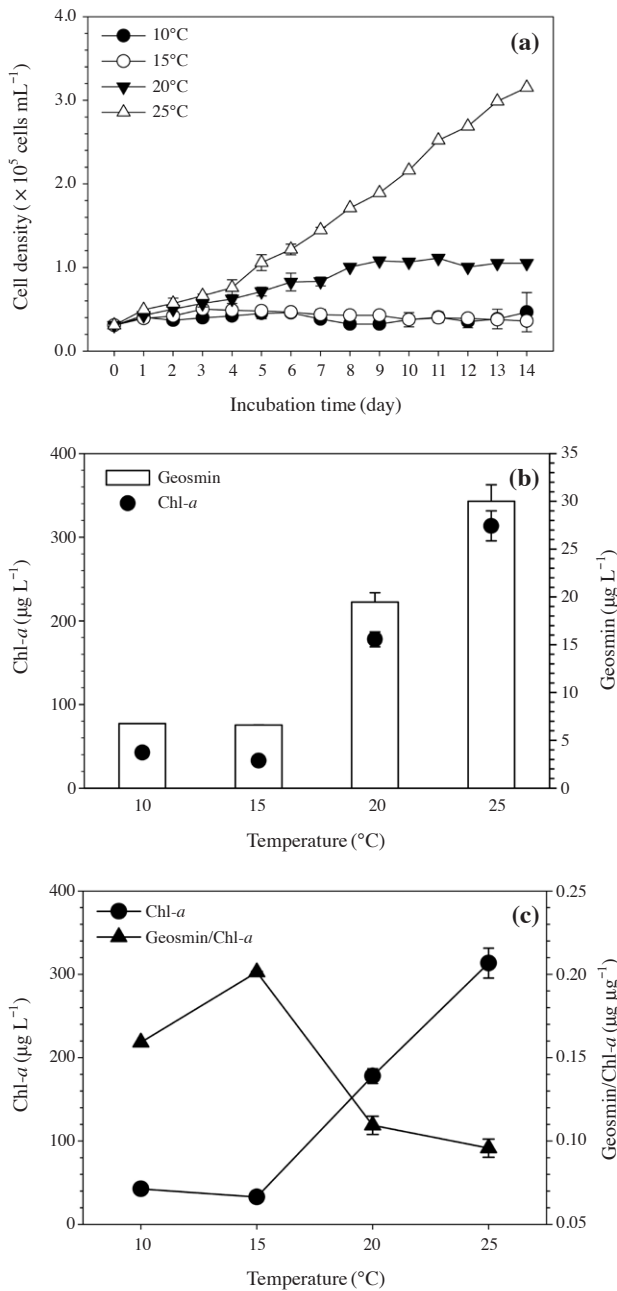
1. 온도 구배별 Anabaena 성장 및 지오스민 생산

세 가지 온도 구배에서 시간에 따른 세포 성장을 분석한 결과, *A. circinalis*는 25°C에서 가장 높은 성장률( $\mu = 0.235 \pm 0.079 \text{ d}^{-1}$ )을 보였다(Fig. 1a; Table 2). 반면, 10°C에서 가장 낮은 성장률을 보였으며( $\mu = 0.058 \pm 0.070 \text{ d}^{-1}$ ), 저온(10~15°C)과 고온(25°C) 간에 서로 유의한 차이가 나타났다( $p = 0.000, F = 15.561$ ; Table 2). 마찬가지로, Chl-*a* 농도는 10°C에 비교하여 20°C에서 약 4배 높았으며 25°C에서 7배 높았다(Fig. 1b).

온도 증가는 *A. circinalis*의 높은 성장을 유도하였고, 이

Table 1. Parameters of the gas chromatography-mass spectrometry for the analysis of geosmin.

Parameters		Conditions			
Instruments		450-GC, 320-MS (BRUKER)			
Column		VF-5ms (30 m length × 0.25 mm inside diameter × 0.25 $\mu\text{m}$ film thickness)			
Gas flow		He 1.0 mL min <sup>-1</sup>			
Fractional rate		50 : 1			
Injector temperature		270°C			
Extraction temperature		270°C			
Oven temperature	Initial temp. (°C)	Retention time (min)	Heating rate (°C min <sup>-1</sup> )	Final temp. (°C)	Final time (min)
	35.0	5.00		35	5.00
		1.00	8.0	180.0	24.13
		3.00	40.0	295.0	30.00



**Fig. 1.** (a) Cell density change, (b) Chl-*a* and geosmin concentration, (c) Chl-*a* and Chl-*a* specific geosmin production by *A. circinalis* in the different temperatures.

에 따라 총 지오스민 농도는 조류성장과 함께 유의하게 증가하는 것으로 나타났다( $r=0.998$ ,  $p=0.000$ ). 총 지오스민 농도는 10°C ( $6.8 \mu\text{g L}^{-1}$ )와 15°C ( $6.6 \mu\text{g L}^{-1}$ )에서는 서로 비슷하게 나타났으나, 20°C ( $19.5 \mu\text{g L}^{-1}$ )에서는 10°C에 비하여 약 3배, 25°C ( $30.0 \mu\text{g L}^{-1}$ )에서는 약 4배 높았다(Fig. 1b). 한편, Chl-*a* 당 생산되는 지오스민의 농도(geosmin/

**Table 2.** Growth rate ( $\mu$ ) of *Anabaena circinalis* in the different temperatures, light intensities and phosphorus concentrations.

Environmental factor	Condition	Growth rate ( $\text{d}^{-1}$ )
Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	10	$0.058 \pm 0.070$
	15	$0.075 \pm 0.069$
	20	$0.160 \pm 0.066$
	25	$0.235 \pm 0.079$
Light intensity ( $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	60	$0.224 \pm 0.034$
	120	$0.170 \pm 0.046$
	240	$0.183 \pm 0.034$
P concentration ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0.01	$0.078 \pm 0.043$
	0.05	$0.067 \pm 0.017$
	0.25	$0.072 \pm 0.025$
	0.50	$0.126 \pm 0.022$
	1.00	$0.131 \pm 0.011$

Chl-*a*)는 성장률이 낮았던 10°C ( $0.159 \mu\text{g } \mu\text{g}^{-1}$ )와 15°C ( $0.201 \mu\text{g } \mu\text{g}^{-1}$ )에서 상대적으로 높았으며 최적성장 온도 조건으로 나타난 25°C ( $0.096 \mu\text{g } \mu\text{g}^{-1}$ )에서 가장 낮았다(Fig. 1c).

본 연구에서 *A. circinalis*의 최적 성장 온도로 나타난 25°C는 같은 종으로 실험한 다른 연구에서도 동일하게 나타났다. 그 외에도 남조류들도(*Lyngbya*, *Phormidium*) 세포 성장을 위해 대체적으로 20~25°C 조건을 선호하는 것으로 나타났다(Table 3). 남조류는 일반적으로 25°C 이상의 비교적 높은 온도에서 최적의 성장률을 보인다(Roberts and Zohary, 1987; Coles and Jones, 2000). 남조류는 이러한 높은 온도에서 규조류, 녹조류, 와편모조류 등을 포함하는 다른 일차 생산자와의 경쟁에서 가장 효과적으로 우점한다(Paerl and Huisman, 2009). 실제로 최근까지 북한강 수계에서 여름철(25°C 이상의 수온)에 주로 우점한 조류는 남조류 *Anabaena*와 *Microcystis*인 것으로 보고되었다(Byun *et al.*, 2014, 2015; HRWMC, 2015). 특히 본 연구의 온도에 따른 성장실험 결과와 유사하게 북한강 수계에서 고수온기에 *A. circinalis*가 과다증식 함으로써 수중의 총 지오스민 농도도 증가하는 양상을 보였다. 따라서 남조류 성장에 적합한 25°C 이상의 수온은 현장에서 *A. circinalis*의 증식을 촉진하는 요소로 작용할 수 있으며, 이에 따른 2차 대사산물인 지오스민의 수체내 증가가 수반된다.

한편, 지오스민 생산은 남조류 종의 특이성과 성장 조건에 따라 차이가 있는 것으로 보인다(Table 3). Li *et al.* (2012)는 *A. circinalis*, *Phormidium amoenum*, *Phormidium* sp.의 18°C와 25°C에서 배양을 통해 Chl-*a*와 총 지오스민 농도가 25°C에서 상대적으로 좀 더 높게 나타났으나 18°C에서와 비교할 때 별다른 차이는 없었음을 보여주었다. 그



**Table 3.** Comparison of chl-*a* and geosmin production of various cyanobacteria under the various temperatures.

Target sp.	Temp. (°C)	Chl- <i>a</i> ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Geosmin ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Geo/Chl- <i>a</i> ( $\mu\text{g } \mu\text{g}^{-1}$ )	Reference
<i>Anabaena</i> sp.	15	0.260~0.265	14~15	53.85~56.60	Saadoun <i>et al.</i> (2001)
	20	0.865~0.870	37~38	42.77~43.68	
	25	1.140~1.150	12~13	10.53~11.30	
	30	0.610~0.615	9~10	14.75~16.26	
<i>Anabaena circinalis</i>	18	1,000~1,050	100~120	0.10~0.11	Li <i>et al.</i> (2012)
	25	1,000~1,100	120~130	0.13	
<i>Lyngbya kuetzingii</i>	10	7,800	2.1	0.0003	Zhang <i>et al.</i> (2009)
	25	8,000~12,000	0.7~0.8	0.0001	
	35	4,000~6,200	0.3~0.5	0.0001	
<i>Phormidium amoenum</i>	18	1,300~1,500	45~55	0.03~0.04	Li <i>et al.</i> (2012)
	25	1,600~1,700	60~70	0.04	
<i>Phormidium</i> sp.	18	1,000~1,100	125~150	0.13~0.14	Li <i>et al.</i> (2012)
	25	1,100~1,200	190~200	0.17	
<i>Anabaena circinalis</i>	10	42.44	6.756	0.159	This study
	15	32.76	6.595	0.201	
	20	177.90	19.464	0.109	
	25	313.46	30.009	0.096	

러나 온도범위(10~30°C)를 좀 더 확장한 Saadoun *et al.* (2001) 연구에서 *Anabaena* sp.의 Chl-*a* 농도는 25°C에서 최대로 나타난 반면, 지오스민 농도는 20°C에서 가장 높았고 온도에 따라 Chl-*a*와 지오스민 간의 일정한 상관성을 보이지 않았다. Zhang *et al.* (2009)의 연구 결과에서는 *Lyngbya kuetzingii*의 지오스민 생산량이 매우 낮아 성장과 지오스민 농도 간 관계를 논하기에 어려움이 있었다.

본 연구 결과, *A. circinalis*의 지오스민 총생산량은 가장 높은 생물량(Chl-*a*)이 나타난 온도에서 가장 높았다(Fig. 1b). 그러나 지오스민 잠재생산력(geosmin/Chl-*a*)은 이와 반대의 경향을 보였다(Fig. 1c). 이러한 양상은 Saadoun *et al.* (2001)의 연구에서도 유사한 결과를 보여주었다(Table 3). 즉, 상대적으로 성장이 느린 온도 조건(10~15°C)에서는 낮은 Chl-*a* 농도에도 불구하고 성장이 빠르고 높은 Chl-*a*가 생산된 고온(20~25°C) 조건에 비해 지오스민 잠재생산력이 더 높게 나타났다. 조류의 성장에 불리한 온도 조건에서는 적절한 온도조건보다 광합성을 통한 조류생장이 느리기 때문에, 이러한 온도조건을 포함한 불리한 환경 조건에서 isoprenoid 전구체가 Chl-*a*의 합성보다 이취미 물질 합성으로 유도한 것으로 사료된다(Nase *et al.*, 1985, 1988; Wu and Jüttner, 1988; Saadoun *et al.*, 2001; Jüttner and Watson, 2007; Giglio *et al.*, 2008, 2011).

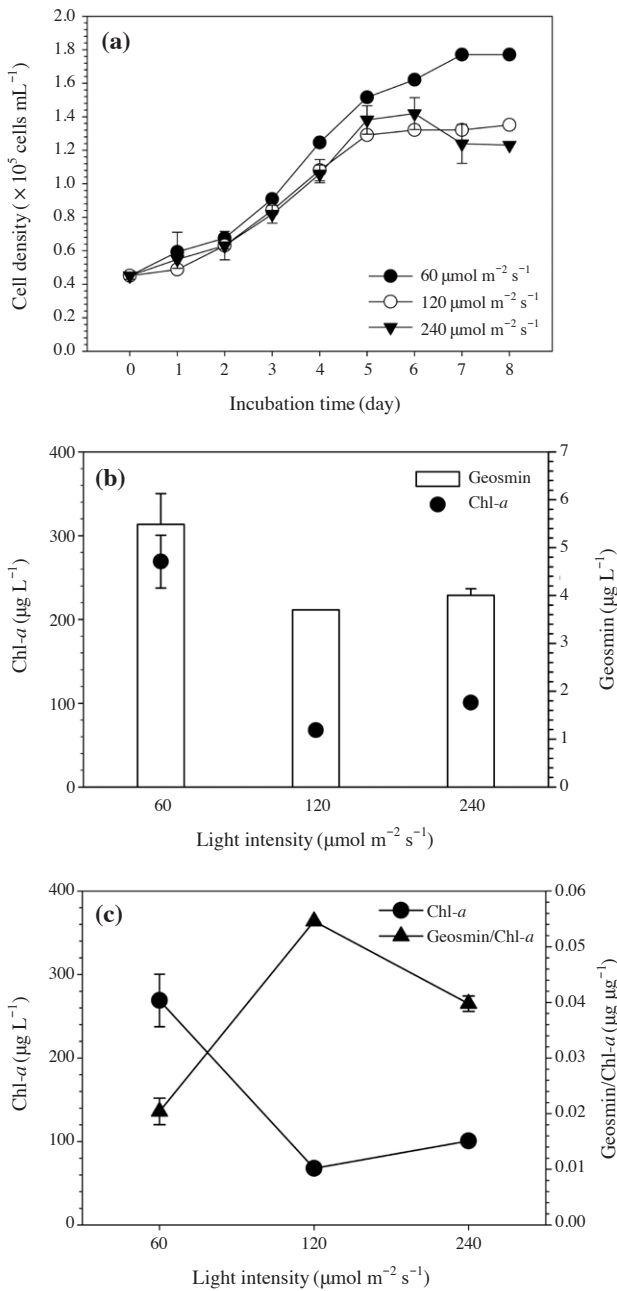
## 2. 광도 구배별 *Anabaena* 성장 및 지오스민 생산

세 가지 광도 구배에서 시간에 따른 세포 성장을 분석

한 결과, *A. circinalis*의 세포성장은 60  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 가장 높게 나타났고(Fig. 2a), 성장률도 가장 높게 나타났다( $\mu=0.224 \pm 0.034 \text{ d}^{-1}$ ; Table 2). 그러나 온도의 영향과는 달리 모든 실험 광도조건에서 비슷한 성장패턴을 보이며 광도 조건 간에 성장률 차이는 유의하지 않았다( $p=0.630$ ,  $F=0.584$ ; Table 2). 이 결과는 모든 광도 조건에서 온도를 최적 조건(25°C)으로 동일하게 부여하였기 때문으로 사료된다. 즉, 본 연구에서 제공한 광도범위 내에서는 온도가 광도 자체보다 *A. circinalis* 성장에 더 큰 영향을 미친 결과로 판단되었다. 다만 최대성장에 도달한 시점은 상대적으로 높은 광도(120, 240  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )에서 좀 더 일찍 나타났다(Fig. 2a). Chl-*a* 농도는 상대적으로 낮은 광도(60  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )와 높은 광도(120, 240  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) 간에 차이를 보였다(Fig. 2b).

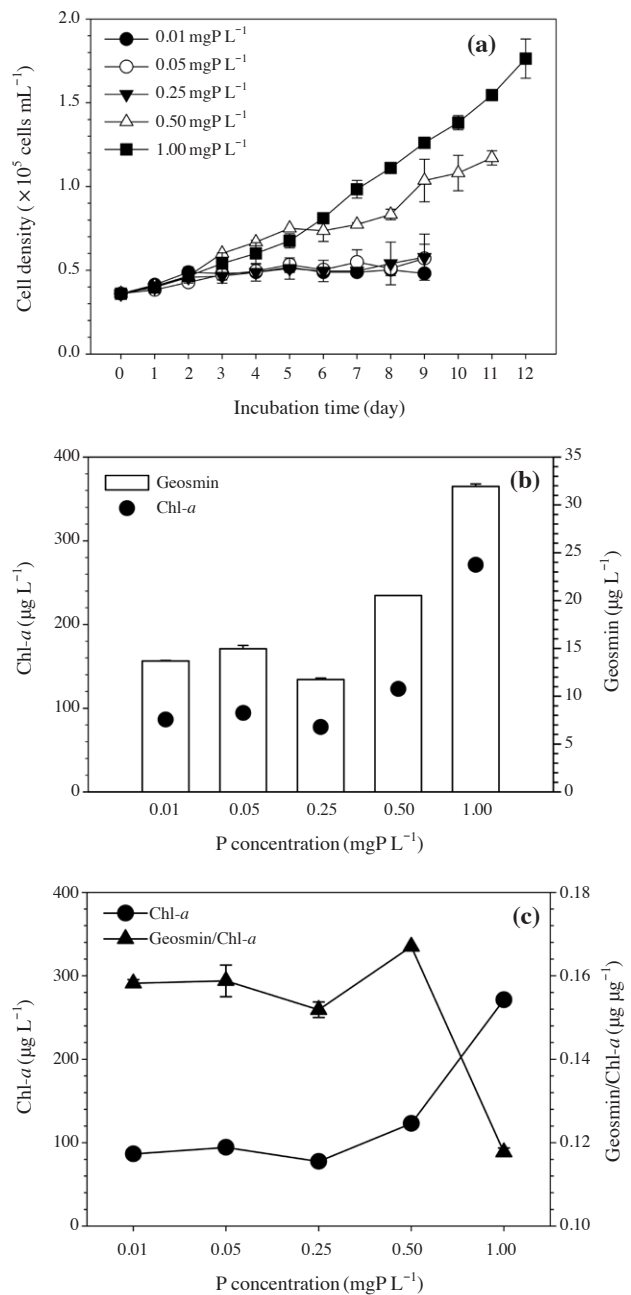
광도의 증가와는 별개로 총 지오스민 발생량은 Chl-*a* 농도의 증가에 따라 증가하였다( $r=0.998$ ,  $p=0.000$ ). 실험 광도 조건 중 Chl-*a* 농도가 낮게 나타난 120  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (3.7  $\mu\text{g L}^{-1}$ )와 240  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (4.0  $\mu\text{g L}^{-1}$ )에서 유사하게 낮은 수준으로 나타났으며, 이에 비하여 60  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (5.5  $\mu\text{g L}^{-1}$ )에서는 약 1.5배 높았다(Fig. 2b). 한편, Chl-*a* 당 지오스민 생산량(geosmin/Chl-*a*)은 120  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최대값(0.055  $\mu\text{g } \mu\text{g}^{-1}$ ), 성장이 높았던 60  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 최소값(0.020  $\mu\text{g } \mu\text{g}^{-1}$ )을 나타냈다(Fig. 2c).

본 연구에서 *A. circinalis*는 비교적 낮은 광도인 60  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 높은 Chl-*a* 농도를 보였다. 이러한 결



**Fig. 2.** (a) Cell density change, (b) Chl-*a* and geosmin concentration, (c) Chl-*a* and Chl-*a* specific geosmin production by *A. circinalis* in the different light intensities.

과는 실내에서 배양되어 낮은 광도 (60  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )에서 적응하였을 가능성이 있다. 실제로 실내 배양 연구를 진행한 많은 선행연구에서도 낮은 광도에서 성장이 높았던 것으로 보고되었다 (Naes *et al.*, 1985; Saadoun *et al.*, 2001; Table 4). 본 연구에서 geosmin 잠재생산력 즉, 단위 Chl-*a* 당 지오스민 발생량은 성장률과 Chl-*a* 생산량이



**Fig. 3.** (a) Cell density change, (b) Chl-*a* and geosmin concentration, (c) Chl-*a* and Chl-*a* specific geosmin production by *A. circinalis* in the different phosphorus concentrations at 2.00  $\text{mgN L}^{-1}$ .

낮았던 120~240  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  광도조건에서 높게 나타났다. Saadoun *et al.* (2001)의 연구에서도 17  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 Chl-*a*와 총 지오스민은 가장 높았으나 성장이 가장 낮았던 42  $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 에서 지오스민 잠재 생산력이 가장 높았다 (Table 4). *Anabaena*를 대상으로 한 다른 연구에서도 Chl-*a*와 지오스민의 관계는 유

**Table 4.** Comparison of chl-*a* and geosmin production of various cyanobacteria under the various light intensities.

Target sp.	Light intensity ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )	Chl- <i>a</i> ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Geosmin ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Geo/Chl- <i>a</i> ( $\mu\text{g } \mu\text{g}^{-1}$ )	Reference
<i>Anabaena</i> sp.	5	0.51~0.52	7~8	13.7~15.4	Saadoun <i>et al.</i> (2001)
	17	0.88~0.89	37~38	42.0~42.7	
	27	0.28~0.29	24~25	85.7~86.2	
	42	0.17~0.18	23~24	133.3~135.3	
<i>Anabaena circinalis</i>	17	8.5~9	3~3.5	0.35~0.39	Bowmer <i>et al.</i> (1992)
	70	550~560	30~40	0.05~0.07	
<i>Anabaena circinalis</i>	100	1,000~1,100	130~140	0.13	Li <i>et al.</i> (2012)
	10	900~1,000	120~125	0.13	
<i>Lyngbya kuetzingii</i>	0	600	0.1	0.0002	Zhang <i>et al.</i> (2009)
	10	8,000	0.9	0.0001	
	20	9,000	0.6	0.0001	
	75	6,000	0.3	0.0001	
<i>Oscillatoria brevis</i>	5	16~16.5 ng $\mu\text{g}^{-1}$ dry wt	5.9~6.0 ng $\mu\text{g}^{-1}$ dry wt	0.36~0.37	Naes <i>et al.</i> (1985)
	16	15.5~16 ng $\mu\text{g}^{-1}$ dry wt	4.8~5.0 ng $\mu\text{g}^{-1}$ dry wt	0.31	
	22	14~15 ng $\mu\text{g}^{-1}$ dry wt	4.2~4.3 ng $\mu\text{g}^{-1}$ dry wt	0.29~0.30	
	30	12~13 ng $\mu\text{g}^{-1}$ dry wt	4.6~4.8 ng $\mu\text{g}^{-1}$ dry wt	0.37~0.38	
<i>Phormidium amoenum</i>	100	1600~1700	60~70	0.04	Li <i>et al.</i> (2012)
	10	500~600	5~15	0.01~0.03	
<i>Anabaena circinalis</i>	60	268.96	5.486	0.020	This study
	120	67.78	3.700	0.055	
	240	100.64	4.003	0.040	

사한 경향을 나타냈다(Bowmer *et al.*, 1992; Li *et al.*, 2012; Table 4). 하지만 일부 연구에서 광도조건 간에 지오스민 발생량이나 성장에 확연한 차이를 보이지 않는 경우에는 광도에 따른 성장과 지오스민 발생량 간에 상관성이 나타나지 않았다(Naes *et al.*, 1985; Zhang *et al.*, 2009; Table 4).

지오스민은 남조류 세포내 엽록체에서 광합성색소(carotenoids, Chl-*a*)가 합성되는 isoprenoid 경로를 통해 합성된다고 보고되었다(Bentley and Meganathan, 1981; Wu and Jüttner, 1988; Bafford *et al.*, 1993; Zimba *et al.*, 1999). 그러므로 광합성과 이취미 물질 합성이 생리적으로 연관되어 있을 가능성이 높으며, 많은 연구결과들이 광합성이 불리한 환경 조건에서 isoprenoid 전구체가 Chl-*a*의 합성보다 이취미 물질 합성으로 유도된다고 보고하였다(Naes *et al.*, 1985, 1988; Wu and Jüttner, 1988; Saadoun *et al.*, 2001; Jüttner and Watson, 2007; Giglio *et al.*, 2008, 2011).

총 지오스민 생산량과 지오스민 생산 잠재력(Chl-*a* 농도에 대한 지오스민 생산 비율) 간의 음의 상관관계는 본 연구뿐만 아니라 다른 연구에서도 증명되었다. Bowmer *et al.* (1992)은 *A. circinalis*를 대상으로 Chl-*a*는 총 지오스민과는 양의 관계를 보였으나 geosmin/Chl-*a* 비와는 음의 관계에 있다고 보고하였다(Table 4). Naes *et al.* (1988)은 isoprenoid 경로에 특정 방해자를 사용하여 실험한 결

과, 지오스민이 isoprenoid 경로의 산물이라는 것을 밝히고 조류의 색소 합성이 감소하면 isoprenoid 전구체가 지오스민 생산으로 향하기 때문에 색소와 이취미 물질 생산은 음의 관계가 있다고 보고하였다. Wu and Jüttner(1988)의 연구에서도 *Oscillatoria tenuis*에서 광합성이 일어나는 틸라코이드와 세포막에 지오스민이 다량 분포하는 것을 발견하여 지오스민과 Chl-*a*의 관계를 뒷받침하였다.

### 3. P-N 영양염 농도 구배별 *Anabaena* 성장 및 지오스민 생산

질소 농도를 2 mg L<sup>-1</sup>로 고정된 다섯 가지 인 농도 구배에서 시간에 따른 세포 성장을 분석한 결과, *A. circinalis*의 세포성장은 1.00 mgP L<sup>-1</sup>에서 가장 높았으며(Fig. 3a), 성장률도 가장 높게 나타났다( $\mu=0.131 \pm 0.011 \text{ d}^{-1}$ ; Table 2). P 농도 0.01~0.25 mgP L<sup>-1</sup>의 범위에서는 *Anabaena* 세포 성장은 비슷한 수준이었으나 그 이상 농도에서는 인 농도가 높을수록 증가하였다. 인 농도 0.25 mgP L<sup>-1</sup> 이하와 1.00 mgP L<sup>-1</sup> 간에 *Anabaena* 세포 성장은 유의한 차이를 보였다( $p=0.000$ ,  $F=6.923$ ; Table 2). 마찬가지로 Chl-*a* 농도도 같은 경향을 보였으며, 인 농도 0.01 mgP L<sup>-1</sup> 조건(86.5  $\mu\text{g L}^{-1}$ )에 비하여 1.00 mgP L<sup>-1</sup>(271.2  $\mu\text{g L}^{-1}$ )에서 약 3배 높

**Table 5.** Comparison of chl-*a* and geosmin production of various cyanobacteria under the various phosphorus concentrations.

Target sp.	P (mg L <sup>-1</sup> )	Chl- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )	Geosmin (µg L <sup>-1</sup> )	Geo/Chl- <i>a</i> (µg µg <sup>-1</sup> )	Reference	Note
<i>Anabaena</i> sp.	0	0.040~0.045	0	0	Saadoun <i>et al.</i> (2001)	P source (HPO <sub>4</sub> -P)
	0.002	0.070~0.075	0	0		
	0.020	0.070~0.075	0	0		
	0.059	0.095~0.100	0	0		
	0.118	0.125~0.130	0	0		
	0.235	0.230~0.235	1.8~2	7.83~8.51		
	0.470	0.280~0.285	4~4.2	14.29~14.74		
	0.941	0.375~0.380	6~6.3	16.00~16.58		
<i>Oscillatoria brevis</i>	0.04	4~4.5 ng µg <sup>-1</sup> dry wt	0.1~0.2 ng µg <sup>-1</sup> dry wt	0.03~0.04	Naes <i>et al.</i> (1988)	P source (PO <sub>4</sub> -P)
	4.43	19~20 ng µg <sup>-1</sup> dry wt	0.4~0.5 ng µg <sup>-1</sup> dry wt	0.02~0.3		
<i>Phormidium</i> sp.	0.08	60.6	Not Detected	0	Park <i>et al.</i> (2000)	3.57 mgN L <sup>-1</sup>
	0.31	241.2	4.47	0.02		
	0.77	868.3	5.46	0.01		
<i>Anabaena circinalis</i>	0.01	86.46	13.678	0.158	This study	2 mgN L <sup>-1</sup>
	0.05	94.22	14.961	0.159		
	0.25	77.36	11.748	0.152		
	0.50	122.90	20.526	0.167		
	1.00	271.24	31.934	0.118		

**Table 6.** Comparison of chl-*a* and geosmin production of various cyanobacteria under the various nitrogen concentrations.

Target sp.	N (mg L <sup>-1</sup> )	Chl- <i>a</i> (µg L <sup>-1</sup> )	Geosmin (µg L <sup>-1</sup> )	Geo/Chl- <i>a</i> (µg µg <sup>-1</sup> )	Reference	Note
<i>Anabaena</i> sp.	0.003	0	0	0	Saadoun <i>et al.</i> (2001)	N source (NH <sub>3</sub> -N)
	0.026	0.035~0.040	0.5~0.7	14.29~17.50		
	0.105	0.138~0.142	3~3.2	21.74~22.54		
	0.328	0.152~0.157	4.2~4.3	27.63~27.39		
	0.472	0.258~0.263	4.6	17.60~17.95		
<i>Anabaena</i> sp.	0.002	0	0	0	Saadoun <i>et al.</i> (2001)	N source (NO <sub>3</sub> -N)
	0.025	0.075~0.085	0.1~0.2	1.33~2.35		
	0.124	0.085~0.090	2.8	31.11~32.94		
	0.247	0.205~0.210	1.5	7.00~7.17		
	0.494	0.315~0.320	2.5	7.81~7.94		
<i>Oscillatoria brevis</i>	4.29	0.7 ng µg <sup>-1</sup> dry wt	0.16 ng µg <sup>-1</sup> dry wt	0.23	Naes <i>et al.</i> (1988)	N source (NH <sub>3</sub> -N)
	84.89	6.8 ng µg <sup>-1</sup> dry wt	0.33 ng µg <sup>-1</sup> dry wt	0.05		
<i>Phormidium</i> sp.	0.36	410.6	8.12	0.02	Park <i>et al.</i> (2000)	P 0.77mg L <sup>-1</sup>
	1.43	432.2	7.35	0.02		
	3.57	556.8	8.66	0.02		

았다(Fig. 3b).

영양염 농도 조건하에서 총 지오스민 농도는 Chl-*a* 농도와 유사한 변화경향을 보이며 0.25 mgP L<sup>-1</sup>부터 인 농도 증가에 따라 유의하게 증가하는 것으로 나타났다( $r=0.980$ ,  $p=0.003$ ). 총 geosmin 농도는 인 농도 0.01 mgP L<sup>-1</sup>(13.7 µg L<sup>-1</sup>) 조건에 비하여 0.50 mgP L<sup>-1</sup>(20.5 µg L<sup>-1</sup>)와 1.00 mgP L<sup>-1</sup>(31.9 µg L<sup>-1</sup>)에서 1.5~2.3배 높았다. 다른 조건의 실험결과와 마찬가지로 Chl-*a* 당 지오스민 생

산(geosmin/Chl-*a*)은 Chl-*a* 변화와 반대 경향을 보이며 0.50 mgP L<sup>-1</sup>에서 최대값(0.167 µg µg<sup>-1</sup>), 성장이 가장 높았던 1.00 mgP L<sup>-1</sup>에서 최소값(0.118 µg µg<sup>-1</sup>)을 나타냈다(Fig. 3c).

*A. circinalis*는 일정 농도 이상에서 인 농도가 높아질수록 성장이 촉진되었으며 이를 통해 인의 제한 영양염 역할을 확인하였다. 총 지오스민 농도는 성장에 따라 유의하게 증가하는 것으로 나타났으나 Chl-*a* 당 지오스민 농



도는 성장과 음의 관계를 보였다. *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Phormidium*을 대상으로 한 선행연구들에서도 인 농도 증가에 따른 성장 촉진 및 총 지오스민 농도 증가를 확인할 수 있었다(Table 5). Naes *et al.*(1988)의 연구 결과 *Oscillatoria brevis*는 가장 높은 질소 농도(84.89 mgN L<sup>-1</sup>)에서 성장과 총 지오스민 농도가 가장 높았으며, 인 농도(4.43 mgP L<sup>-1</sup>)에 대해서도 이와 일치하는 결과를 보였다. Park *et al.*(2000)의 연구 결과에서도 *Phormidium* sp.가 질소 농도와 인 농도가 증가할 때 성장과 총 geosmin 발생이 양의 관계를 보였으나, Chl-*a* 당 지오스민 농도는 감소하는 양상을 보였다. 또한 Saadoun *et al.*(2001)은 *Anabaena* sp.를 대상으로 P가 0.118 mg L<sup>-1</sup> 보다 높은 농도에서부터 생물량이 증가하며 총 지오스민이 증가한다고 보고하였다.

인 뿐만 아니라 질소도 남조류 성장과 지오스민 생산에 영향을 미치는 것으로 나타났다(Table 6). Naes *et al.*(1988)는 질소 제한 상태에서 *Oscillatoria brevis*에 의해 phytol과  $\beta$ -carotene의 생성이 감소하고 지오스민의 합성이 증가하는 것을 발견하였다. Wu and Jüttner(1988)와 Wu *et al.*(1991)은 질소원에 따라 성장과 이취미 발생에 차이가 있을 것이라는 가설 아래 NH<sub>3</sub>-N와 NO<sub>3</sub>-N를 구분하여 실험한 결과, 암모니아가 질소원일 때 성장은 감소하나 지오스민은 증가하여 지오스민 생산량과 세포 성장률 간에 음의 상관관계가 있다고 밝혔다. Saadoun *et al.*(2001)은 *Anabaena* sp.를 대상으로 분석한 결과, NO<sub>3</sub>-N이 감소할 때 phytol 요구가 감소하고 isoprenoid 전구체가 지오스민 합성으로 전환하며, 높은 NO<sub>3</sub>-N 농도는 지오스민 생산을 억제한다고 보고하였다. 특히 NH<sub>3</sub>-N 농도의 증가는 지오스민의 증가를 유도하여 이들간 높은 상관성이 있음을 보여주었다. 이러한 결과는 질소의 농도뿐 만 아니라 질소 이온의 종류도 이취미 발생에 영향을 미칠 수 있음을 보여준다.

본 연구는 남조류 세포 내에서 합성되는 지오스민이 조류의 성장과 밀접한 관계가 있기 때문에 온도, 광도, 영양염 등 여러 환경요인들에 의한 남조류 성장 및 지오스민 발생에 대한 영향을 조사하였고, 다음과 같은 주요한 결론을 도출하였다. 남조류 *A. circinalis*에 의한 지오스민 생산은 세포 성장에 영향을 미치는 환경조건에 따라 유의한 영향을 받았으며, 그 결과는 Chl-*a* 농도의 변화에 직접적인 관련성을 나타냈다. 즉, 총 지오스민 농도는 Chl-*a* 농도에 따라 증가하였으나, Chl-*a* 농도에 대한 지오스민 생산 비율(지오스민 생산잠재력)은 최적 성장 조건보다는 성장에 불리한 조건에서 높게 나타났다. 또한 *A. circinalis*는 높은 수온(25°C), 낮은 광도(60  $\mu$ mol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), 높은 인 농

도(>0.25 mg L<sup>-1</sup>) 조건에서 높은 세포성장 및 생물량 증가와 함께 지오스민 농도의 유의한 증가를 보였다. 본 연구의 결과를 통해 판단할 때, *A. circinalis*는 영양염 조건이 충족되었을 때 수온의 영향에 의해 대발생할 가능성이 크며, 특히 현장 수온이 25°C 정도를 나타내는 7월~9월 동안 세포의 대증식과 함께 총 지오스민 농도가 증가하여 이취미 문제를 일으킬 가능성이 높다. 한편으로 *A. circinalis*는 낮은 수온 등 성장이 불리한 조건에서 지오스민 잠재 생산력이 높기 때문에 이러한 조건(늦가을~동절기 초)에서도 *A. circinalis*가 일시적으로 대발생한다면 세포 내에 지오스민의 생산력이 높아 이로 인한 이취미 문제가 유발될 가능성도 있음을 시사한다.

## 적 요

본 연구는 온도, 광도, 인 등 서로 다른 환경 조건 하에서 *Anabaena circinalis*의 지오스민 생산 특성을 평가하기 위해 수행되었다. 실험에 사용한 남조류는 팔당호에서 분리되었다. 남조류 *A. circinalis*의 성장률과 지오스민 생산은 온도(10, 15, 20, 25°C), 광도(60, 120, 240  $\mu$ mol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), 인 농도(0.01, 0.05, 0.25, 0.50, 1.00 mg L<sup>-1</sup>) 등 여러 요인들을 통해서 조사하였다. 최고 성장률과 Chl-*a* 농도는 온도 25°C, 광도 60  $\mu$ mol photons m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> 및 인 농도 1.00 mgP L<sup>-1</sup>에서 각각 나타났다. 총 지오스민 생산량은 각 환경요인의 최적 성장 조건에서 가장 높았으며, 지오스민 생산 잠재력(Chl-*a* 농도에 대한 지오스민 생산 비율)은 늦가을 및 초겨울과 같은 저온 기간을 포함한 불리한 성장 조건에서 높았다. 본 연구 결과는 *A. circinalis*의 지오스민 생산이 엽록소 합성과 직접적인 관련이 있고 세포 성장 조건에 따른 다양한 변화 가능성을 나타내었다.

## 사 사

본 연구는 환경기초조사사업 “한강수계 호소환경 및 생태조사(2017)”(한강수계관리위원회)에 의해 지원되었음.

## REFERENCES

- APHA. 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 21st Edition. American Public Health Association (APHA), Washington DC., USA.

- Baker, P.D., D.A. Steffensen, A.R. Humpage, B.C. Nicholson, I.R. Falconer, B. Lanthois, K.M. Fergusson and C.P. Saint. 2001. Preliminary evidence of toxicity associated with the benthic cyanobacterium *Phormidium* in South Australia. *Environmental Toxicology* **16**: 506-511.
- Bentley, R. and R. Meganathan. 1981. Geosmin and methylisoborneol biosynthesis in streptomyces: evidence for an isoprenoid pathway and its absence in non-differentiating isolates. *FEBS Letters* **125**: 220-222.
- Bowmer, H., A. Padovan, R.L. Oliver, W. Korth and G.G. Ganf. 1992. Physiology of geosmin production by *Anabaena circinalis* isolated from the Murrumbidgee River, Australia. *Water Science and Technology* **25**: 259-267.
- Brian, M., D. Mckee, D. Atkinson, S.E. Collings, J.W. Eaton, A.B. Gill, I. Harvey, K. Hatton, T. Heyes and D. Wilson. 2003. How important is climate? Effects of warming, nutrient addition and fish on phytoplankton in shallow lake microcosms. *Journal of Applied Ecology* **40**: 782-792.
- Brookes, J.D., G.G. Ganf, D. Green and J. Whittington. 1999. The influence of light and nutrients on buoyancy, filament aggregation and flotation of *Anabaena circinalis*. *Journal of Plankton Research* **21**: 327-341.
- Byun, J.H., I.H. Cho, S.J. Hwang, M.H. Park, M.S. Byeon and B.H. Kim. 2014. Relationship between a dense bloom of cyanobacterium *Anabaena* spp. and rainfalls in the North Han River system of South Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 116-126. (in Korean)
- Byun, J.H., S.J. Hwang, B.H. Kim, J.R. Park, J.K. Lee and B.J. Lim. 2015. Relationship between a dense population of cyanobacteria and odorous compounds in the North Han River system in 2014 and 2015. *Korean Journal of Ecology and Environment* **48**(4): 263-271. (in Korean)
- Carpenter, S.R. and J.R. Kitchell. 1993. Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bioscience* **35**: 634-639.
- Chu, Z., X. Jin, B. Yang and Q. Zeng. 2007. Buoyancy regulation of *Microcystis flos-aquae* during phosphorus-limited and nitrogen-limited growth. *Journal of Plankton Research* **29**: 739-745.
- Coles, J.F. and R.C. Jones. 2000. Effect of temperature on photosynthesis-light response and growth of four phytoplankton species isolated from a tidal freshwater river. *Journal of Phycology* **36**(1): 7-16.
- Gerber, N.N. and H.A. Lechevalier. 1965. Geosmin, and earthy-smelling substances isolated from actinomycetes. *Applied Microbiology* **13**: 935-938.
- Giglio, S., J. Jiang, C.P. Saint, D.E. Cane and P.T. Monis. 2008. Isolation and characterization of the gene associated with geosmin production in cyanobacteria. *Environmental Science and Technology* **42**: 8027-8032.
- Giglio, S., W.K. Chou, H. Ikeda, D.E. Cane and P.T. Monis. 2011. Biosynthesis of 2-Methylisoborneol in cyanobacteria. *Environmental Science and Technology* **45**: 992-998.
- Guillard, R.R.L. 1973. Methods for microflagellates and nanoplankton. p. 69-85. *In Handbook of phycological methods: Culture methods and growth measurements* (Stein J. R., ed.). Cambridge University Press, Cambridge.
- Han River Watershed Management Commission (HRWMC). 2012. Distribution and Eco-physiological Characteristics of Harmful Algae in the North Han-River, Han River Watershed Management Commission, Gyeonggi Province, Korea. (in Korean)
- Han River Watershed Management Commission (HRWMC). 2015. Investigation of Causes of Off-flavor Material Production by Harmful Algae and Management Strategy, Han River Watershed Management Commission, Gyeonggi Province, Korea. (in Korean)
- Henley, D.E. 1970. Odorous metabolite and other selected studies of cyanophyta. Doctoral dissertation North Texas State University.
- Herrero, A., A.M. Muro-Pastor and E. Flores. 2001. Nitrogen control in cyanobacteria. *Journal of Bacteriology* **183**: 411-425.
- Hosaka, M., K. Murata, Y. Iikura, A. Oshimi and T. Udagawa. 1995. Off-flavor problem in drinking water of Tokyo arising from the occurrence of musty odor in a downstream tributary. *Water Science and Technology* **31**: 29-34.
- Huisman, J., H.C.R. Matthijs and P.M. Visser. 2005. Harmful Cyanobacteria. Aquatic Ecology Series 3. Dordrecht, the Netherlands: Springer.
- Hutchinson, C.E. 1957. A treatise on limnology. I, Geography Physics and Chemistry. New York, Jone Wiley and Sons Inc. p. 1015.
- Jüttner, F. and S.B. Watson. 2007. Biochemical and ecological control of geosmin and 2-methylisoborneol in source waters. *Applied and Environmental Microbiology* **73**: 4395-4406.
- Kim, J.K., S.H. Lee, H.H. Bang and S.O. Hwang. 2009. Characteristics of algae occurrence in Lake Paldang. *Journal of the Korean Society of Environmental Engineers* **31**: 325-331. (in Korean)
- Kim, K.H., B.J. Lim, K.A. You, M.H. Park, J.H. Park, B.H. Kim and S.J. Hwang. 2014. Identification and analysis of geosmin production potential of *Anabaena* stain isolated from North Han River using genetic methods. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 342-349. (in Korean)
- Li, Z., M.S. Han, S.O. Hwang, M.S. Byeon, S.J. Hwang and B.H. Kim. 2013. Molecular identification of the bloom-forming cyanobacterium *Anabaena* from North Han River system in summer 2012. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**(2): 301-309. (in Korean)
- Li, Z., P. Hobson, W. An, M.D. Burch, J. House and M. Yang. 2012. Earthy odor compounds production and loss in three cyanobacterial cultures. *Water Research* **46**: 5165-5173.
- Ministry of environment (MOE). 2011. Drinking water quality monitoring guideline. (in Korean)

- Ministry of environment (MOE). 2012. Standard methods for the examination water quality. (in Korean)
- Naes, H., H. Aarnes, H. Utkilen, S. Nilsen and O. Skulberg. 1985. Effect of photon fluence rate and specific growth rate on geosmin production of the cyanobacterium *Oscillatoria brevis*. *Applied and Environmental Microbiology* **49**: 1538-1540.
- Naes, H., H.C. Utkilen and A.F. Post. 1988. Factors influencing geosmin production by the cyanobacterium *Oscillatoria brevis*. *Water Science and Technology* **20**: 125-131.
- Paerl, H.W. and D.F. Millie. 1996. Physiological ecology of toxic aquatic cyanobacteria. *Phycologia* **35**: 160-167.
- Paerl, H.W. and J. Huisman. 2009. Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental Microbiology Reports* **1**: 27-37.
- Paerl, H.W. and R.S. Fulton. 2006. Ecology of harmful cyanobacteria. In: *Ecology of Harmful Marine Algae* (Graneli, E. and J. Turner, eds). Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp. 95-107.
- Park, C.H., B.J. Lim, K.A. You, M.H. Park and S.J. Hwang. 2014. Effects of environmental factors on akinete germination of *Anabaena circinalis* (cyanobacteriaceae) isolated from the North Han River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**: 292-301. (in Korean)
- Park, D.K., H.M. Oh, C.Y. Ahn and J.S. Maeng. 2000. Effect of selected environmental factors on the production of geosmin in *Phormidium* sp.. *The Korean Journal of Microbiology* **36**: 52-57. (in Korean)
- Park, H.G. and W.H. Jheong. 2003 Long-term changes of algal growth in Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Quality* **19**(6): 673-684. (in Korean)
- Park, M.H., B.J. Lim, W.B. Seo, C.H. Park, K.H. Kim and S.J. Hwang. 2015. Akinete germination and algal growth potential test of cyanobacterium *Anabaena circinalis* on different waters in Lake Paldang. *Korean Journal of Ecology and Environment* **48**(4): 287-295. (in Korean)
- Robarts, R.D. and T. Zohary. 1987. Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming cyanobacteria. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* **21**(3): 391-399.
- Saadoun, I.M.K., K.K. Schrader and W.T. Blevins. 2001. Environmental and nutritional factors affecting geosmin synthesis by *Anabaena* sp.. *Water Research* **35**: 1209-1218.
- Safferman, R.S., A.A. Rosen, C.I. Mashini and R.E. Morris. 1967. Earthy-smelling substance from a blue green alga. *Environmental Science and Technology* **1**: 429-430.
- Scheffer, M. 1998. *Ecology of Shallow Lakes*. London, UK: Chapman and Hall.
- Slater, G.P. and V.C. Blok. 1983. Volatile compounds of the Cyanophyceae: a review. *Water Science and Technology* **15**: 181-190.
- Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie* **106**: 433-471.
- Sterner, R.W. and J.P. Grover. 1998. Algal growth in warm temperate reservoirs: Kinetic examination of nitrogen, temperature, light, and other nutrients. *Water Research* **32**: 3539-3548.
- Tryfon, E. and M. Moustaka-Gouni. 1997. Species composition and seasonal cycles of phytoplankton with special reference to the nanoplankton of Lake Mikri Prespa. *Hydrobiologia* **351**: 61-75.
- Vilalta, E., H. Guasch, I. Muñoz, A. Romaní, F. Valero, J.J. Rodriguez, R. Alcaraz and S. Sabater. 2004. Nuisance odours produced by benthic cyanobacteria in a Mediterranean river. *Water Science and Technology* **49**: 25-31.
- Watanabe, M.M. and F. Kasai. 1985. NIES-collection list of strains, 1st ed., p. 97. The National Institute for Environmental Studies, The Environmental Agency, Tsukuba, Japan.
- Watson, S.B. 2003. Cyanobacterial and eukaryotic algal odour compounds: signals or by-products? A review of their biological activity. *Phycologia* **42**: 332-350.
- Wu, J. and F. Jüttner. 1988. Differential partitioning of geosmin and 2-methylisoborneol between cellular constituents in *Oscillatoria tenuis*. *Archives of Microbiology* **150**: 580-583.
- Wu, J.T., P.I. Ma and T.L. Chou. 1991. Variation of geosmin content in *Anabaena* cells and its relation to nitrogen utilization. *Archives of Microbiology* **157**: 66-69.
- You, K.A., M.S. Byeon, S.J. Youn, S.J. Hwang and D.H. Rhew. 2013. Growth characteristics of blue-green algae (*Anabaena spiroides*) causing tastes and odors in the North-Han River, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**: 135-144. (in Korean)
- Young, C.C., I.H. Suffet, G. Crozes and A. Bruchet. 1999. Identification of a wood-hay odor-causing compound in a drinking water supply. *Water Science and Technology* **40**: 273-278.
- Zhang, T., L. Li, L. Song and W. Chen. 2009. Effects of temperature and light on the growth and geosmin production of *Lyngbya kuetzingii* (cyanophyta). *Journal of Applied Phycology* **21**: 279-285.
- Zimba, P.V., C.P. Dionigi and D.F. Millie. 1999. Evaluating the relationship between photopigment synthesis and 2-Methylisoborneol accumulation in cyanobacteria. *Journal of Phycology* **35**: 1422-1429.