

## 북한강 수계에서 이취미를 유발하는 남조류 (*Anabaena spiroides*)의 증식 특성

유경아 · 변명섭<sup>1</sup> · 윤석제<sup>1</sup> · 황순진<sup>2</sup> · 류덕희\*

(국립환경과학원 물환경연구부, <sup>1</sup>국립환경과학원 한강물환경연구소,  
<sup>2</sup>건국대학교 환경과학과)

Growth Characteristics of Blue-green Algae (*Anabaena spiroides*) Causing Tastes and Odors in the North-Han River, Korea. You, Kyung-A, Myeong-Seop Byeon<sup>1</sup>, Seok-Jea Youn<sup>1</sup>, Soon-Jin Hwang<sup>2</sup> and Doug-Hee Rhew\* (Water Environment Research Department, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Kyungseo-dong, Seo-gu, Incheon, Korea; <sup>1</sup>Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research; <sup>2</sup>Department of Environmental Science, Konkuk University, Korea)

Blue-green algae blooms occurred during early winter in the North-Han River, Korea. Among blue-green algae, *Anabaena spiroides* were observed for approximately 33 consecutive days, between 28 November and 30 December, 2011. *A. spiroides* emerged from Lake Uiam to Lake Paldang, depending on the flow of the river has spread downstream. Changes of physical water environment like rising water temperature and increasing hydraulic retention time influenced the *A. spiroides* bloom. The *A. spiroides* bloom showed a very rapid increase in cell density, and a slow decrease: the cell density increased to a maximum of 11,325 cells mL<sup>-1</sup> in Lake Paldang (st. 5), and was completely disappeared after the water temperature dropped below 4°C. A decrease in water temperature was the most influential factor among all environmental parameters, for the reduction of *A. spiroides* cell density. The *A. spiroides* bloom was accompanied with the occurrence of very high concentrations of the odor metabolite geosmin. Geosmin reached the peak value of 1,640 ng L<sup>-1</sup> in Lake Paldang (st. 4). The geosmin concentration was very strongly correlated with cell numbers of *A. spiroides*.

**Key words :** *Anabaena spiroides*, geosmin, water temperature, North-Han River, Lake

### 서 론

남조류 군집은 수환경에 질소와 인의 인위적인 유입

증가의 영향으로 지난 20여 년 동안 전세계적으로 집약적 증가를 보였다 (Paerl *et al.*, 2001; Khan and Ansari, 2005). 남조류 bloom은 심미적 또는 생태적 문제와 더불어, 수처리 공정에서 여과지 폐쇄, 남조류 독소와 맛·냄

\* Corresponding author: Tel: +82-32-560-7350, Fax: +82-32-568-2044, E-mail: dhrhew@korea.kr

새 물질과 같은 대사물질 생성으로 먹는물 공급에 심각한 악영향을 가져올 수 있다 (Watson, 2004; van Apeldoorn *et al.*, 2007; Watson *et al.*, 2007). 남조류 중에서 bloom을 유발하는 중요한 속인 *Anabaena sp.*는 흙·곰팡이 냄새와 같은 이취미 물질인 지오스민 (geosmin)을 생성하는 것으로 잘 알려져 있으며 (Izaguirre *et al.*, 1982; Hayes and Burch, 1989; Saadoun *et al.*, 2001; Tsujimura and Okubo, 2003; Wang *et al.*, 2005), 출현종과 환경조건에 따라 anatoxin 등의 독소를 생성하기도 한다 (Izaguirre *et al.*, 1982; McGuire *et al.*, 1984; Mahmood *et al.*, 1988).

선행연구 결과에 따르면, 수온, 광도, 영양염 농도를 포함하는 물리·화학적 인자들과 남조류 종들 간의 부력기작의 차이는 수체 내에서 남조류 종 조성과 생물량 발달에 영향을 미치는 주요한 요인들로 제기되어 왔다 (Thomas and Walsby, 1986; Carpenter and Kitchell, 1993; Konopka *et al.*, 1993; Fujimoto and Sudo, 1997). 대부분의 남조류는 성장에 높은 수온 (>20°C)을 선호하나 (Van der Westhuizen and Eloff, 1985; Watanabae and Oishi, 1985; Fujimoto and Sudo, 1997), 일부 사상성 남조류는 색소 조절을 통해 낮은 광도 조건에서도 탁월한 적응 능력을 가지는 것으로 알려져 있으며 (Tang *et al.*, 1997), *Anabaena spiroides*의 경우에는 8°C 이하의 낮은 수온에서도 증식이 관찰된 바 있다 (Vincent and Dryden, 1989). 소규모의 저수지에서는 겨울철 결빙 동안에 *Microcystis spp.*에서 낮은 수온에 내성이 강한 것으로 알려진 *Oscillatoria sp.*와 *Aphanizomenon sp.* 같은 사상성 남조류로 천이되었는데, 수온, 광도 및 영양염을 조절하는 경우 2~4°C의 수온과 낮은 광도 조건에서도 인이 충분한 경우에는 남조류가 성장하는 것으로 조사되었다 (Kim *et al.*, 2005a, 2007).

비교적 청정지역으로 알려진 북한강 수계는 소양호, 춘천호에서부터 팔당호까지 전체적으로 영양염류의 농도 및 식물플랑크톤 발생량이 모두 중, 빈영양 수준으로 양호한 수질을 유지하고 있다 (Park *et al.*, 2004). 그러나 춘천시를 통과하는 공지천의 영향으로 의암호의 일부 수역에서 국지적으로 매우 수질이 악화되고 식물플랑크톤 발생량이 높으며, 상류인 소양호에서도 조류발생량 특히, 남조류 발생량이 증가하고 있다 (Park *et al.*, 2005). 의암호 내 공지천 유입부에서는 늦가을에 일시적으로 남조류인 *Anabaena spp.*, *Microcystis spp.*가 출현하기 때문에 이는 하류의 북한강 수계 식물플랑크톤 군집 변화에 영향을 미칠 수 있으며, 상류 댐에서의 유입, 방류량에 따른

팔당호의 체류시간 변화는 식물플랑크톤 증식에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Park and Jheong, 2003).

본 연구는 북한강 수계에서 저수온기에 우점한 남조류 *Anabaena spiroides* 현존량과 이취미 물질인 지오스민 (geosmin)에 대해 조사하고 환경인자와의 통계적 분석을 통하여 *A. spiroides*의 증식 특성을 알아보고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사수계 및 조사지점

본 연구는 저수온기에 남조류 *Anabaena spiroides*의 과다증식이 발생한 북한강 수계를 대상으로 하였다 (Fig.

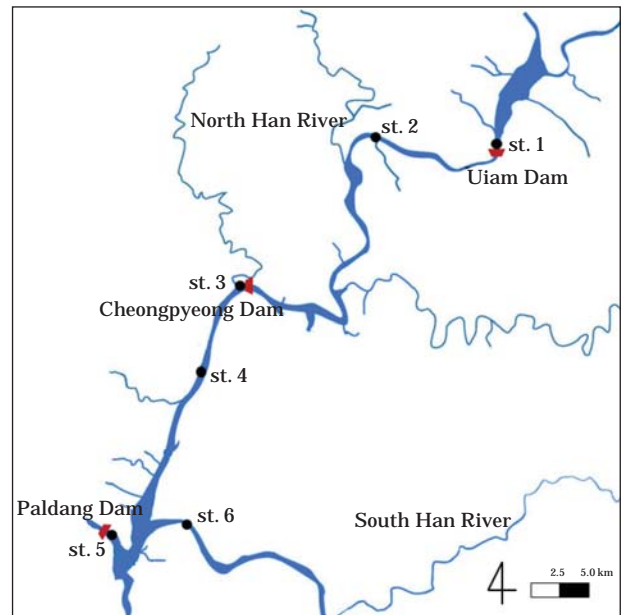


Fig. 1. Map showing sampling sites in the North-Han River.

Table 1. Coordinates of sampling sites in the North-Han River.

Site	Coordinates	
St. 1	37° 50'11"N	127° 40'32"E
St. 2	37° 50'45"N	127° 33'09"E
St. 3	37° 43'30"N	127° 25'19"E
St. 4	37° 35'31"N	127° 20'29"E
St. 5	37° 31'31"N	127° 16'52"E
St. 6	37° 31'46"N	127° 21'52"E

1). 조사구간은 *A. spiroides*가 출현한 상류 의암호부터 하류 팔당호까지로 조사지점은 유하방향에 따라 의암댐 앞 (st. 1), 춘성대교 (st. 2), 청평댐 직하류 (st. 3), 삼봉리 (st. 4), 팔당댐 앞 (st. 5)의 5지점을 선정하였고, 남한강 수계에 신원리 (st. 6) 지점을 대조지점으로 하였다 (Table 1). 조사는 2011년 11월 28일부터 12월 30까지 일일 간격으로 오전 중에 실시하였다.

2. 수환경 요인 및 식물플랑크톤 분석

조사지점별 표층수를 대상으로 현장수질측정기 (YSI-6600D)를 이용하여 수온, 용존산소 (DO), pH, 전기전도도 (Electrical Conductivity), 탁도 (Turbidity)를 측정하였다. 채수한 시료는 실험실에서 수질오염공정시험방법 (MOE, 2007) 및 Standard methods (APHA, 2005)에 준하여 BOD, COD, SS, TN, DTN, TP, DTP, PO<sub>4</sub>-P, Chl. *a*를 분석하였고, 먹는물 수질감시항목 운영지침 (MOE, 2011)에 따라 GC/MS (Varian, US/CP3800)를 이용하여 HS-SPME법으로 지오스민 (geosmin), 2-MIB (2-methylisoborneol)를 분석하였다. 식물플랑크톤 조사는 표층수를 고정 (Lugol's solution)하여 Sedgwick-Rafter counting chamber를 이용, 위상차현미경 (Nikon, Japan)으로 200~400배에서 계수한 후 단위체적당 세포수로 환산하였다. 종의 동정은 한국동식물도감 (Chung, 1968), 한국담수조류도감 (Chung, 1993) 및 Komárek (1991)를 참조하였다. 기온과 강수량은 기상청 (www.kma.go.kr) 자료를 참고하였으며, 댐별 강수량, 유입량, 방류량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (www.wamis.go.kr)에 게재된 댐 운영정보를 이용하였다. 환경인자와 식물플랑크톤과의 상관분석은 통계프로그램 SPSS 12.0을 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 저수온기 남조류 증식 원인

북한강 수계에서 *A. spiroides*가 출현한 지역은 의암호 내의 공지천 유입부부터 하류의 팔당호까지 그 범위가 넓고 크게 확산되는 특성을 보였다. *A. spiroides*발생의 근원지인 의암호는 춘천시를 통과하여 수질이 매우 오염된 공지천이 유입되기 때문에 국지적으로 수질이 악화되고 식물플랑크톤 발생량도 높다 (Park et al., 2004).

의암댐이 위치한 춘천 지역의 11월 평균 기온은 8.2°C로 지난 5년 ('06~'10년) 평균 기온보다 3.2°C 높았으며, 팔당댐이 위치한 양평 지역 역시 11월 평균 기온이 9.6°C로 지난 5년보다 3.9°C 높았다. 9~11월 동안의 강수량은 춘천 지역 246 mm, 양평 지역 163 mm로 예년의 2/3 수준이었다. 동일 시기에 북한강 수계 댐별 방류량은 소양강댐 64 m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup>, 춘천댐 65 m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup>, 의암댐 48 m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup>, 청평댐 55 m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup>, 팔당댐 192 m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup>로 예년의 36% 수준이었다 (Fig. 2).

또한, 북한에서 금강산발전소 운영을 위하여 북한강 수계 최상류 지역에 임남댐을 건설하여 2003년 말에 완공되었는데 이로 인한 북한강 수계 유하량 감소는 연간 17억 m<sup>3</sup>로 한강 연간유입량의 9%를 차지한다 (www.kwater.co.kr). 갈수현상과 하천유량 감소는 북한강 수계 하류에 위치한 각 댐호의 유입·방류량 감소 및 체류시간 증가를 야기하였는데, 11월에 각 댐호별 수리학적 체류시간은 의암호 23일, 청평호 46일, 팔당호 19일이었으며 예년 대비 2배 증가한 것으로 조사되었다.

이와 같이 저수온기에 수온 상승과 체류시간 증가 등

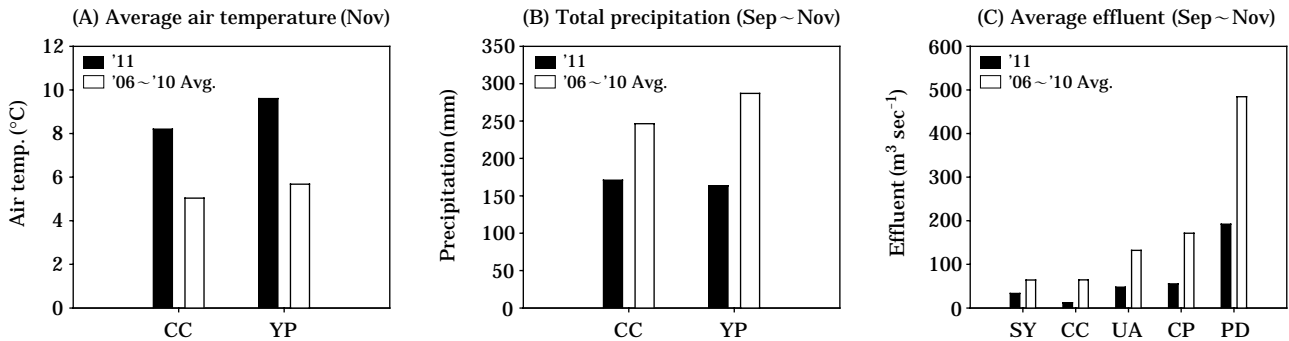


Fig. 2. Comparison of Meteorologic and hydrologic factors in the North-Han River ((A), (B) CC; Chuncheon region, YP; Yangpyeong region, (C) SY; Soyang Dam, CC; Chuncheon Dam, UA; Uiam Dam, CP; Cheongpyeong Dam, PD; Paldang Dam).

의 물리학적 수환경 변화는 남조류 *A. spiroides*의 과다 증식에 영향을 미친 것으로 판단할 수 있다. 뉴질랜드 Okarohoe에서는 연중 최저 수온인 8°C로 내려간 늦겨울에 *Anabaena spiroides*가 증식하였다는 연구결과가 보고되었으며 (Vincent and Dryden, 1989), 팔당호에서 *Anabaena* spp.는 수온이 약 13°C 이하의 조건에서도 체류시간이 최소 약 11일 이상이면 출현하는 것으로 조사된 바 있다 (NIER, 2008).

## 2. 남조류 현존량 변화

모든 조사지점에서 수온은 11월 말에 10.0°C 내외였으며 이후 지속적으로 감소하여 12월 중순 이후에는 5.0°C 이하로 내려갔다. 조사기간 동안 북한강 수계 지점별 평균 Chl. *a* 농도는 st. 1에서 8.7 mg m<sup>-3</sup>, st. 2에서 7.4 mg m<sup>-3</sup>, st. 3에서 8.3 mg m<sup>-3</sup>, st. 4에서 7.0 mg m<sup>-3</sup>, st. 5에서 8.0 mg m<sup>-3</sup>로 *A. spiroides* 출현 지점 간 농도 차이는 적었으며, 남조류가 출현하지 않았던 남한강 수계 st. 6에서는 3.8 mg m<sup>-3</sup>로 북한강 수계보다 낮은 농도였다 (Fig. 3). 식물플랑크톤 평균 현존량은 st. 1에서 1,655 cells mL<sup>-1</sup>, st. 2에서 1,286 cells mL<sup>-1</sup>, st. 3에서 1,460 cells mL<sup>-1</sup>, st. 4에서 1,729 cells mL<sup>-1</sup>, st. 5에서 1,973 cells mL<sup>-1</sup>로 북한강 수계 조사지점 중 팔당호 내에 위치한 st. 4와 st. 5에서 많은 현존량을 보였으며, 남한강 수계 st. 6은 1,074 cells mL<sup>-1</sup>로 가장 적었다. 모든 지점에서 11월 29일에 식물플랑크톤 현존량이 가장 많았으며 최하류인 팔당댐 앞 (st. 5)에서 15,665 cells mL<sup>-1</sup>로 최대 증식하였다 (Fig. 3).

북한강 수계 조사지점에서 식물플랑크톤 군집 중 *A. spiroides*의 점유율은 평균 25%였으며, st. 4와 st. 5에서 *A. spiroides*가 최대 증식하였을 때에는 각각 83%, 72%의 점유율을 보였다. 북한강 수계에서 우점종은 *A. spiroides*였으며 아우점종은 은편모조류인 *Rhodomonas* sp.였다. *A. spiroides* 발생 지점인 의암호부터 청평호 구간의 지점 (st. 1, st. 2, st. 3)에서는 수온이 4°C 이하로 내려감에 따라 *A. spiroides*는 더 이상 출현하지 않았고 우점종은 *Stephanodiscus hantzschii*로 천이되었으며, *A. spiroides*가 크게 확산된 팔당호 (st. 4, st. 5)에서는 *A. spiroides* 현존량이 급격한 감소추세를 보였다. 남한강 수계에서는 편서풍 (偏西風)에 의해 북한강 물이 남한강 수계 st. 6에 영향을 미쳐 11월 말에 일시적으로 *A. spiroides*가 나타났을 뿐, 규조류 *Cyclotella atomus*와 은편모조류인 *Rhodomonas* sp.가 지속적으로 우점하였다.

팔당호에서 식물플랑크톤 현존량은 봄에 대발생을 보

이고 가을과 겨울에도 5,000 cells mL<sup>-1</sup> 가까운 높은 발생량을 보이는데, 이 시기에는 일반적으로 규조류가 우점하는 양상을 보인다 (Kim *et al.*, 2005b; Park *et al.*, 2005; Youn *et al.*, 2010). 반면에 본 조사 기간에는 예년의 팔당호 식물플랑크톤 분포와 다르게 식물플랑크톤 현존량이 낮았는데, 이는 부상성을 갖고 있어 다른 조류보다 광을 흡수하는 데 유리한 남조류가 우점하여 다른 종이 성장할 수 없었기 때문이었으며 남조류 중 출현종은 *A. spiroides* 단일종이었다. 지점별 *A. spiroides* 현존량 분포는 st. 1에서는 11월 29일에 4,576 cells mL<sup>-1</sup>로 최대 증식 후 점차 감소하여 12월 14일 이후에는 출현하지 않았다. st. 2에서는 11월 29일에 1,466 cells mL<sup>-1</sup>로 최대였고 12월 17일 이후에는 출현하지 않았으며, st. 3 역시 11월 29일 1,874 cells mL<sup>-1</sup>로 최대를 보인 후 12월 28일 이후에는 출현하지 않았다. 팔당호 내에 위치한 st. 4와 st. 5에서는 11월 28일과 29일에 각각 3,574 cells mL<sup>-1</sup>, 11,325 cells mL<sup>-1</sup>로 최대였으며, 12월 30일까지 한달 이상 *A. spiroides*가 출현하였다. 12월 30일 이후에는 북한강 수계 모든 지점에서 *A. spiroides*가 출현하지 않았다 (Fig. 3).

## 3. 이취미 물질 농도 변화

이취미의 원인물질인 지오스민 (geosmin)과 2-MIB (2-methylisoborneol)는 방선균이나 남조류의 대사물질에서 기인하는 것으로 알려져 있는데, 남조류 중에서 *Anabaena* spp.는 전세계적으로 Geosmin을 생성하는 가장 대표적인 종이다 (Wu *et al.*, 1991; Bowmer *et al.*, 1992; Rosen *et al.*, 1992; Aoyama *et al.*, 1995; Blevins *et al.*, 1995; Jones and Korth, 1995). Geosmin과 2-MIB는 최저 감지농도가 6~10 ng L<sup>-1</sup> 내외로 알려져 있으며 일본의 경우 각각에 대해 먹는물 수질기준을 10 ng L<sup>-1</sup> 이하로 설정하고 있다 (Whelton and Dietrich, 2004). 국내의 경우, 먹는물 수질기준에는 없으나 권고기준으로 20 ng L<sup>-1</sup> 설정되어 있다 (ME, 2011).

본 연구에서 남조류 *A. spiroides* 증식에 따른 이취미 물질 농도 변화는 2-MIB의 경우 모든 조사지점에서 최대 20 ng L<sup>-1</sup>를 넘지 않았고, 검출되지 않은 일수가 더 많았다. 반면, Geosmin은 *A. spiroides* 현존량 변화에 따라 조사지점별로 차이를 보였는데 각 지점별 Geosmin 평균 농도는 st. 1에서 39 ng L<sup>-1</sup>, st. 3에서 221 ng L<sup>-1</sup>, st. 4에서 289 ng L<sup>-1</sup>, st. 5에서 116 ng L<sup>-1</sup>였으며 st. 2에서는 측정하지 않았고, 남한강 수계 st. 6의 경우 *A. spiroides*가 출현하지 않아 불검출 일수가 더 많았다. Geosmin 농도가 가장 높았던 st. 4에서 11월 28일과 12월 4일에 각각

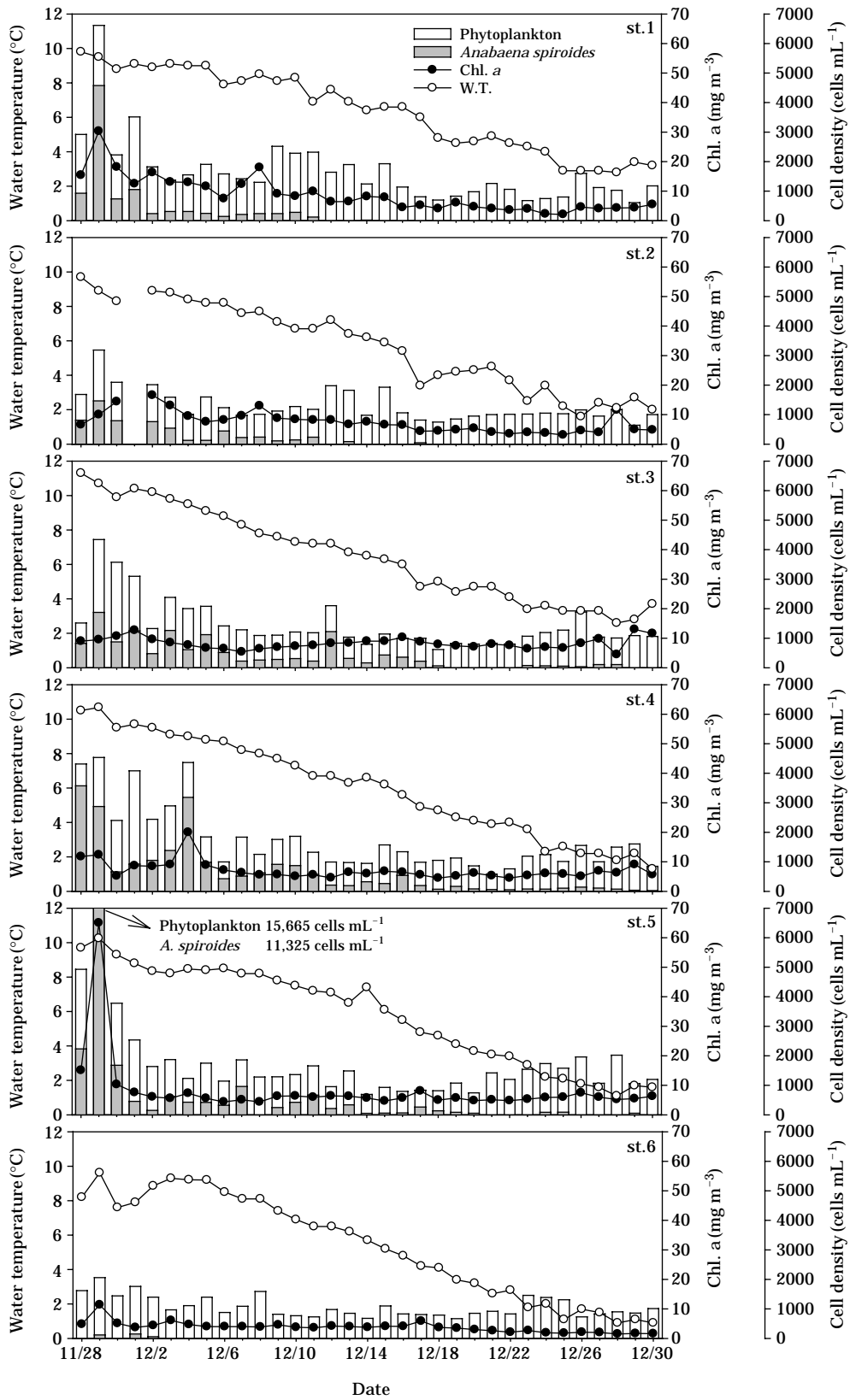


Fig. 3. Daily variation of phytoplankton, *Anabaena spiroides*, Chl. *a* and water temperature in the North-Han River.

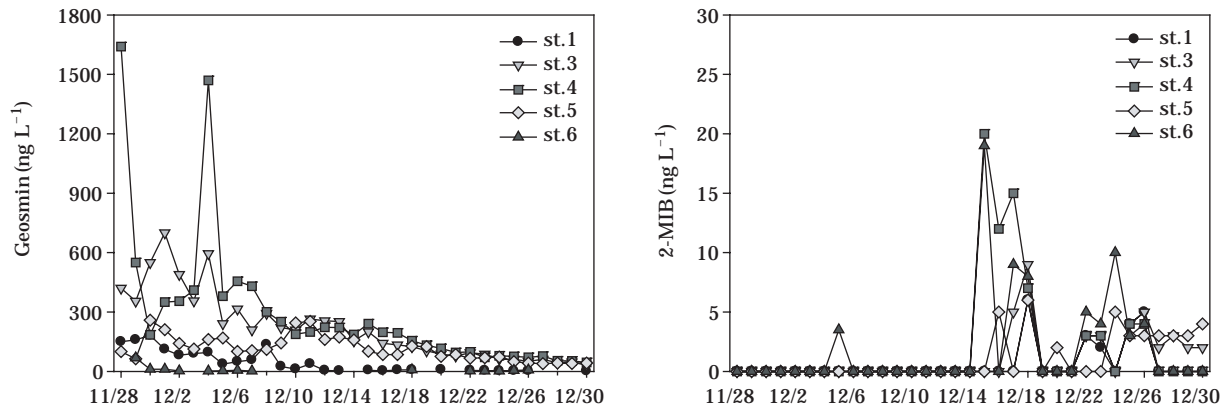


Fig. 4. Daily variation of geosmin and 2-MIB in the North-Han River.

1,640 ng L<sup>-1</sup>, 1,470 ng L<sup>-1</sup>로 2번의 peak를 보였는데, 동일 시기에 *A. spiroides* 현존량은 각각 3,574 cells mL<sup>-1</sup>, 3,185 cells mL<sup>-1</sup>였다. st. 5에서는 11월 29일에 *A. spiroides* 현존량이 11,325 cells mL<sup>-1</sup>로 최대였음에도 불구하고 Geosmin 농도는 64 ng L<sup>-1</sup>였으며 다음날에 Geosmin 농도가 259 ng L<sup>-1</sup>로 증가하였으나 st. 4의 1/5 정도에 불과하였는데, 팔당댐 앞의 경우 북한강과 남한강 그리고 경안천이 합쳐지기 때문에 희석되었을 가능성이 있다 (Fig. 4).

Geosmin의 변화는 *A. spiroides* 현존량과 밀접한 관련이 있는데, *A. spiroides* 현존량이 증가한 1~2일 후에 Geosmin 농도가 급격히 증가하고 *A. spiroides* 현존량이 감소하면 동일하게 감소한다고 하였다 (Li *et al.*, 2010). 현재까지 원수에서 기록된 Geosmin 최대 농도는 중국에서 7,100 ng L<sup>-1</sup> (Li *et al.*, 2010)였으며, 호주에서 4,000 ng L<sup>-1</sup> (Jones and Korth, 1995), 남아프리카에서 3,170 ng L<sup>-1</sup> (Wnorowski and Scott, 1992)로 조사된 바 있다. 팔당호의 경우 댐 앞에서 *Anabaena* spp.가 식물플랑크톤 군집의 49%를 우점하여 2,352 cells mL<sup>-1</sup>였을 때 Geosmin 농도는 189 ng L<sup>-1</sup>였으며, *Anabaena* spp.가 전체 현존량의 14%인 252 cells mL<sup>-1</sup>였을 때 Geosmin 농도는 179 ng L<sup>-1</sup>였다 (Kim *et al.*, 2009).

#### 4. 남조류, 이취미 물질, 환경인자와의 관계

*A. spiroides* 증식에 영향을 미치는 환경인자를 파악하고 *A. spiroides*와 Geosmin 농도와의 관계를 규명하기 위하여 통계학적 상관관계를 분석하였다. 조사지점별 이화학적 수질의 농도 범위는 Fig. 5와 같다. 이화학적 수질 인자 중에서 유의한 상관관계를 보인 항목은 지점에 따

라 차이는 있으나 수온, Chl. *a*, BOD, COD 등으로 나타났다 (Table 2). 북한강 수계 조사지점에서 *A. spiroides*는 수온과 양의 상관관계를 나타냈는데 st. 3 ( $r=0.743$ ,  $p<0.01$ )과 st. 4 ( $r=0.709$ ,  $p<0.01$ )에서 매우 유의한 상관관계를 보였다. Chl. *a*, BOD, COD는 *A. spiroides*와 양의 상관관계를 보였으나 이는 *A. spiroides* 증식에 의해 Chl. *a* 농도 및 수중 유기물 농도가 증가한 결과로, 식물플랑크톤 증식에 영향을 주는 영양염류와는 큰 상관관계를 나타내지 않았다.

팔당호에서 식물플랑크톤 현존량에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려진 체류시간 (Park *et al.*, 2005)은 상류에 위치한 댐들의 수문조작에 직접적인 영향을 받는다. 11월 중순까지 30 m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup>를 방류했던 소양강댐에서 29일에 50 m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup>로 방류량을 늘렸고 하류의 의암댐, 청평댐도 방류량을 증가하는 등 북한강 수계 댐들의 수문조작에 의해 *A. spiroides*는 유량과 함께 하류로 내려갔다. 그러나 팔당댐 방류량은 250 m<sup>3</sup> sec<sup>-1</sup> 내외로 팔당호 물이 교체될 수준의 양이 아니었기 때문에 오히려 상류에서 내려온 *A. spiroides*가 팔당호에서 집적 및 확산되는 경향을 보였다. 팔당호 방류량 증가에 의해 12월 초 팔당호의 수리학적 체류시간은 11일로 예년보다 2일 단축되었으나 이미 과다증식한 *A. spiroides*의 현존량 감소에는 별다른 영향을 미치지 못하였다 ( $r=0.380$ ,  $p=0.06$ ).

남조류의 우점기간은 영양상태와 수온에 의존하여 결정될 수 있으며, 동절기의 낮은 수온은 남조류 소멸의 중요한 원인으로 지적되고 있기 때문에 (Reynolds, 1984; Sommer *et al.*, 1986; Romo and Miracle, 1994), 본 연구에서는 수온 하강이 *A. spiroides* 현존량 감소에 가장 큰 영향을 준 인자로 파악되었다 (Table 2, Fig. 6).

*A. spiroides*와 Geosmin 농도와의 관계는 북한강 수계

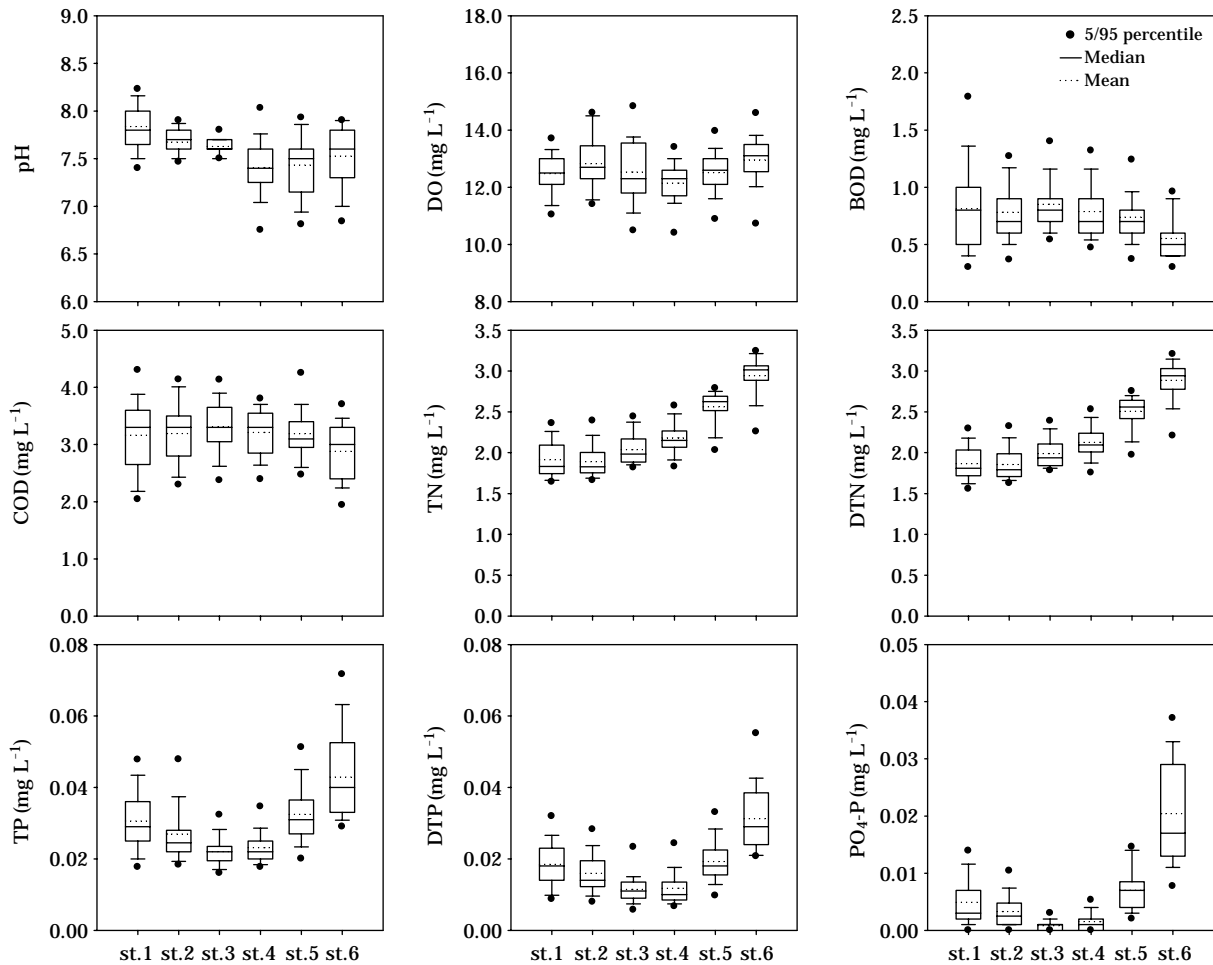


Fig. 5. Concentration range of water quality parameters in the North-Han River.

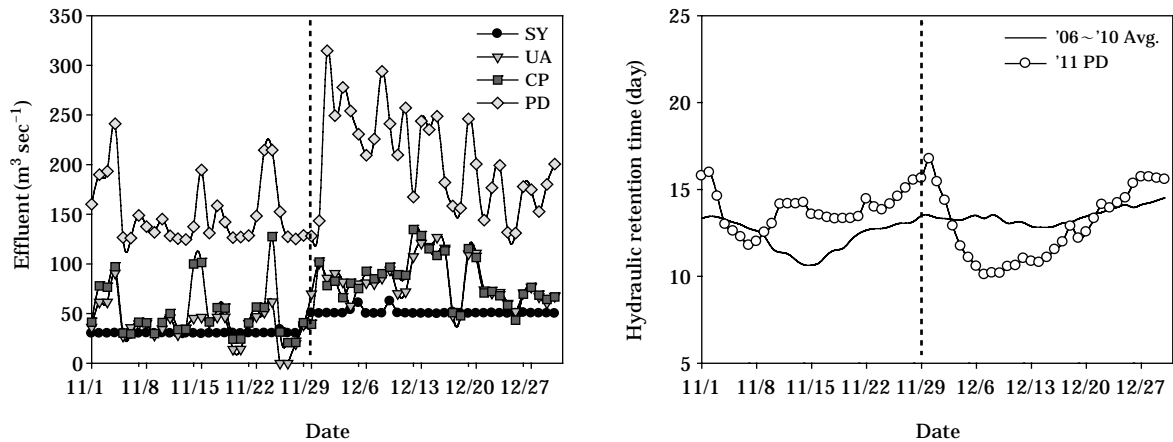
Table 2. Correlation coefficient between *Anabaena spiroides* abundance and water quality parameters in the North-Han River.

Site	Water temp.	Chl. <i>a</i>	Geosmin	2-MIB	pH	EC	DO	BOD	COD	SS	TN	TP	DTN	DTP	PO <sub>4</sub> -P
St. 1	0.461	0.846**	0.531	—	0.317	0.267	-0.112	0.770**	0.569*	0.356	0.053	0.361	0.017	0.160	0.184
St. 2	0.614*	0.415	—	—	-0.196	0.377	-0.390	0.406	0.679**	0.028	0.231	0.300	0.244	0.331	0.183
St. 3	0.743**	0.432*	0.636**	-0.116	0.206	0.196	-0.349	0.441*	0.149	-0.137	-0.254	0.237	-0.274	0.427*	-0.016
St. 4	0.709**	0.830**	0.909**	0.581	0.179	0.536**	-0.310	0.749**	0.470**	-0.068	-0.419*	0.308	-0.462**	0.357*	-0.146
St. 5	0.428*	0.992**	-0.156	0.713	0.314	-0.262	0.242	0.846**	0.772**	0.532**	-0.666**	0.415*	-0.649**	0.068	-0.157
St. 6	-0.386	0.112	0.302	—	-0.753	-0.086	0.112	0.375	-0.946	-1.000**	-0.938	-0.950	-0.950	-0.959	0.073

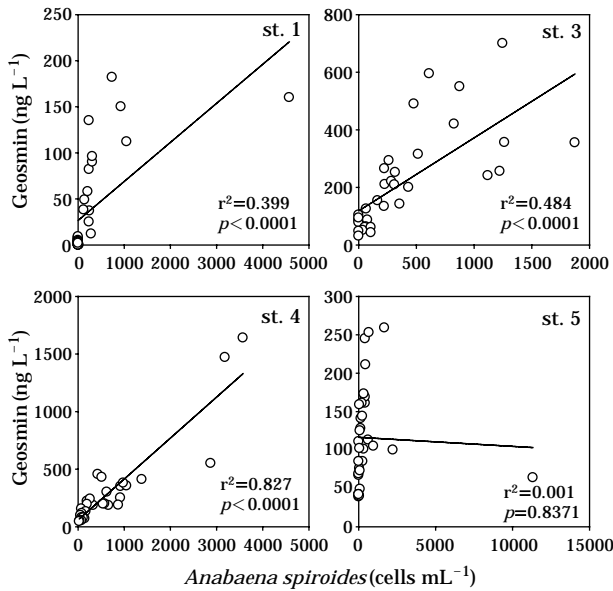
\*\* : p<0.01, \* : p<0.05

조사지점에서 양의 상관관계를 보였으며, 특히 st. 3 ( $r=0.636$ ,  $p<0.01$ )과 st. 4 ( $r=0.909$ ,  $p<0.01$ )에서는 매우 유의한 양의 상관관계를 나타냈다 (Table 2). *A. spiroides*와 Geosmin 농도와의 회귀분석 결과, *A. spiroides*가 증가함에 따라 Geosmin 농도가 증가하였으며 청평호 (st. 3)와

팔당호 (st. 4)에서 경향성이 뚜렷하였다 (Fig. 7). 중국의 Yanghe호에서 Geosmin 농도는 *Anabaena sp.* 현존량 ( $r^2=0.912$ )과 상관관계가 매우 컸으며 Geosmin은 *A. spiroides*에 의해 주로 생성됨이 증명되었다 (Li *et al.*, 2010). 또한, *A. spiroides* 세포당 평균 Geosmin 생성 농도가 0.1



**Fig. 6.** Daily variation of effluent and hydraulic retention time in the North-Han River (SY; Soyang Dam, UA; Uiam Dam, CP; Cheongpyeong Dam, PD; Paldang Dam).



**Fig. 7.** Relationship between *Anabaena spiroides* abundance and geosmin concentration in the North-Han River.

pg cell<sup>-1</sup>로 호주에서 *Anabaena* sp. 대발생 시 조사된 0.01 pg cell<sup>-1</sup>보다 10배 이상이었다 (Jones and Korth, 1995). 그러나 팔당호 댐앞 (st. 5)에서는 *A. spiroides* 현존량이 높았음에도 불구하고 Geosmin 농도와의 상관관계가 명확하지 않아 (Table 2, Fig. 7) 남한강 유입유량에 의한 희석효과, 이취미 발현 환경조건, 조류 외 이취미 유발 원인 등 다양한 요인에 대한 분석이 필요할 것으로 사료된다.

적 요

본 연구는 청정수역으로 알려져 있던 북한강 수계에서 저수운기에 우점한 남조류 *Anabaena spiroides* 현존량과 이취미 물질인 지오스민 (geosmin)에 대해 조사하고 환경인자와의 통계적 분석을 통하여 *A. spiroides*의 증식 특성을 알아보려고 하였다. 2011년 11월 말에 *A. spiroides*가 과다증식하였는데 출현지역은 의암호 내의 공지천 유입부 부터 하류의 팔당호까지 그 범위가 넓고 하류로 확산되는 특성을 보였다. 저수운기에 수온 상승과 체류시간 증가 등의 물리학적 수환경 변화가 남조류 *A. spiroides*의 과다증식에 영향을 미쳤다. *A. spiroides* 현존량은 팔당호에서 11,325 cells mL<sup>-1</sup>로 최대증식을 보였으며, 수온이 4°C 이하로 내려가면서 *A. spiroides* 현존량이 급격히 감소하였다. 수환경 요인 중에서 수온 하강이 *A. spiroides* 현존량 감소에 가장 큰 영향을 준 인자였다. 남조류의 대사물질로 이취미의 원인물질인 Geosmin은 팔당호에서 최대 1,640 ng L<sup>-1</sup> 농도를 나타냈다. 북한강 수계에서 Geosmin 농도는 *A. spiroides*와 매우 유의한 상관관계를 보여 *A. spiroides*에 의해 이취미가 유발되었음을 시사하였다.

인 용 문 헌

Aoyama, K., N. Kawamura, M. Saitoh, Y. Magara and Y. Ishibashi. 1995. Interactions between bacteria-free *Anabaena macrospora* clone and bacteria isolated from unialgal culture. *Water Science and Technology* **31**: 121-126.



- APHA. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. American Public Health Association. Washington, D.C. USA.
- Blevins, W.T., K.K. Schrader and I. Saadoun. 1995. Comparative physiology of geosmin production by *Streptomyces halstedii* and *Anabaena* sp. *Water Science and Technology* **31**: 127-133.
- Bowmer, K.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.
- Carpenter, S.R. and J.R. Kitchell. 1993. Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bioscience* **35**: 634-639.
- Chung, J. 1993. Illustration of the freshwater phytoplankton of Korea. Academybook.
- Chung, Y.H. 1968. Illustrated encyclopedia of fauna & flora of Korea Vol. 9 freshwater algae. Ministry of education.
- Fujimoto, N. and R. Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N:P supply ratios and temperatures. *Limnology Oceanography* **42**: 250-256.
- Hayes, K.P. and M.D. Burch. 1989. Odorous compounds associated with algal blooms in South Australian waters. *Water Research* **23**: 115-121.
- Izaguirre, G., C.J. Hwang, S.W. Krasner and M.J. McGuire. 1982. Geosmin and 2-methylisoborneol from cyanobacteria in three water supply systems. *Applied and Environmental Microbiology* **43**: 708-714.
- Jones, G.J. and W. Korth. 1995. *In situ* production of volatile odor compounds by river and reservoir phytoplankton populations in Australia. *Water Science and Technology* **31**: 145-153.
- Khan, F. and A. Ansari. 2005. Eutrophication: An ecological vision. *Botanical Review* **71**: 449-482.
- Kim, H.S., D.S. Kong and S.J. Hwang. 2005a. Characteristic community dynamics of phyto- and zooplankton in a shallow eutrophic reservoir. *Korean Journal of Limnology* **38**(1): 18-29.
- Kim, H.S., S.J. Hwang and D.S. Kong. 2007. Cyanobacterial development and succession and affecting factors in a eutrophic reservoir. *Korean Journal of Limnology* **40**(1): 121-129.
- 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**(5): 325-331.
- Kim, J.M., M.S. Han, W.H. Jheong and J.D. Park. 2005b. Correlation between phytoplankton dynamics and water quality in Paldang Reservoir. *Korean Journal of Limnology* **38**(2): 217-224.
- Komárek, J. 1991. A review of water-bloom forming Microcystis species with regard to populations from Japan. *Archiv für Hydrobiologie Supplement, Algological Studies* **64**: 115-127.
- Konopka, A.E., A.R. Klemmer, A.E. Walsby and B.W. Ibelings. 1993. Effects of macronutrients upon buoyancy regulation by metalimnetic *Oscillatoria agardhii* in Deming Lake, Minnesota. *Journal of Plankton Research* **15**: 1019-1034.
- Li, Z., J. Yu, M. Yang, J. Zhang, M.D. Burch and W. Han. 2010. Cyanobacterial population and harmful metabolites dynamics during a bloom in Yanghe Reservoir, North China. *Harmful Algae* **9**: 481-488.
- Mahmood, N.A., W.W. Carmichael and D. Pfahler. 1988. Anticholinesterase Poisonings in Dogs from a Cyanobacterial (Blue-Green Algae) Bloom Dominated by *Anabaena flosaquae*. *American Journal of Veterinary Research* **49**(4): 500-503.
- McGuire, M.J., R.M. Jones, E.G. Means, G. Izaguirre and A.E. Preston. 1984. Controlling Attached Blue-Green Algae with Copper Sulfate. *Journal of American Water Works Association* **76**(5): 60-65.
- Ministry of environment (MOE). 2007. Standard methods for the examination water quality.
- Ministry of environment (MOE). 2011. Drinking water quality monitoring guideline.
- National institute of environmental research (NIER). 2008. Study on the alert criteria of harmful algal bloom alert system (I).
- Park, H.K. 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.
- Park, H.K., M.S. Byeon, E.K. Kim, H.J. Lee, M.J. Chun and D.I. Jung. 2004. Water quality and phytoplankton distribution pattern in upper inflow rivers of Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Quality* **20**(6): 615-624.
- Park, H.K., H.J. Lee, E.K. Kim and D.I. Jung. 2005. Characteristics of algal abundance and statistical analysis of environmental factors in Lake Paldang. *Journal of Korean Society on Water Quality* **21**(6): 584-594.
- Paerl, H.W., R.S. Fulton 3rd, P.H. Moisaner and J. Dyble. 2001. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. *Scientific World Journal* **1**: 76-113.
- Reynolds, C.S. 1984. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability.

- Freshwater Biology* **14**: 111-142.
- Romo, R. and R. Miracle. 1994. Long-term phytoplankton changes in a shallow hypertrophic lake, Albufera of Valencia Spain. *Hydrobiologia* **275**(276): 153-164.
- Rosen, B.H., B.W. MacLeod and M.R. Simpson. 1992. Accumulation and release of geosmin during the growth phases of *Anabaena circinalis* (Kutz.) Rabenhorst. *Water Science and Technology* **25**: 185-190.
- Saadoun, I., K.K. Schrader and W.T. Blevins. 2001. Identification of geosmin as a volatile metabolite of *Anabaena* sp. *Journal of Basic Microbiology* **41**: 51-55.
- Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv fuer Hydrobiologie* **106**: 433-471.
- Tang, E.P.Y., R. Tremblay and W.F. Vincent. 1997. Cyanobacterial dominance of polar freshwater ecosystems: Are high-latitude mat-formers adapted to low temperature. *Journal of Phycology* **33**: 171-181.
- Thomas, R.H. and A.E. Walsby. 1986. The effects of temperature on recovery of buoyancy by *Microcystis*. *Journal of General Microbiology* **132**: 1665-1672.
- Tsujimura, S. and T. Okubo. 2003. Development of *Anabaena* blooms in a small reservoir with dense sediment akinete population, with special reference to temperature and irradiance. *Journal of Plankton Research* **25**: 1059-1067.
- Van Apeldoorn, M.E., H.P. van Egmond, G.J.A. Speijers and G.J.I. Bakker. 2007. Toxins of cyanobacteria. *Molecular Nutrition & Food Research* **51**: 7-60.
- Van der Westhuizen, A.J. and J.N. Eloff. 1985. Effect of temperature and light on the toxicity and growth of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* (UV-006). *Planta* **163**: 55-59.
- Vincent, W.F. and S.J. Dryden. 1989. Phytoplankton Succession and Cyanobacterial Dominance in a Eutrophic Lake of the Mid-Temperate Zone (Lake Okaro, New Zealand). *Archiv für Hydrobiologie, Ergebnisse der Limnologie* **32**: 137-163.
- Wang, S.H., A.R. Dzialowski, J.O. Meyer, F. de Noyelles, N.C. Lim, W.W. Spotts and D.G. Huggins. 2005. Relationships between cyanobacterial production and the physical and chemical properties of a Midwestern Reservoir, USA. *Hydrobiologia* **541**: 29-43.
- Watanabae, M.F. and S. Oishi. 1985. Effects of environmental factors on toxicity of a cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*) under culture conditions. *Applied and Environmental Microbiology* **49**: 1342-1344.
- Watson, S.B. 2004. Aquatic taste and odor: a primary signal of drinking-water integrity. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* **67**: 1779-1795.
- Watson, S.B., M. Charlton, Y.R. Rao, T. Howell, J. Ridal, B. Brownlee, C. Marvin and S. Millard. 2007. Off flavours in large waterbodies: physics, chemistry and biology in synchrony. *Water Science and Technology* **55**: 1-8.
- Whelton, A.J. and A.M. Dietrich. 2004. Relationship between intensity concentration and temperature for drinking water odorants. *Water Research* **38**: 1604-1614.
- Wnorowski, A.U. and W.E. Scott. 1992. Incidence of off-flavors in South-African surface waters. *Water Science and Technology* **25**: 225-232.
- 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.
- Youn, S.J., H.K. Park and K.A. Shin. 2010. Dynamics of phytoplankton communities of major dam reservoirs in Han River system. *Journal of Korean Society on Water Quality* **26**(2): 317-325.

(Manuscript received 17 July 2012,  
Revised 4 September 2012  
Revision accepted 1 March 2013)