

팔당호 현장수를 이용한 남조류 *Anabaena circinalis*의 발아 및 성장 잠재력 시험

박명환 · 임병진¹ · 서완범 · 박채홍 · 김건희 · 황순진*

건국대학교 환경과학과, ¹국립환경과학원 한강물환경연구소

Akinete Germination and Algal Growth Potential Test of Cyanobacterium *Anabaena circinalis* on Different Waters in Lake Paldang. Park, Myung-Hwan, Byung-Jin Lim¹, Wan-Bum Seo, Chae-Hong Park, Keon-Hee Kim and Soon-Jin Hwang* (Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 05029, Korea; ¹Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research Yangpyung, Gyeonggi 12585, Korea)

Abstract Akinete germination potential and algal growth potential (AGP) using *Anabaena circinalis* were investigated September 2014 and March 2015 at the three sites (PD-1, PD-2 and PD-3) of Lake Paldang. Nitrogen and phosphorus concentrations were higher at PD-2 than at PD-1 and PD-3. TSI (TN) values at the three field sites were in the range of 65~85, which were the level of eutrophic or hypereutrophic state. TSI (TP) also showed high values (49~68), which were the level of mesotrophic or eutrophic state. Akinete germination potential was higher at PD-2 with increased nutrient (nitrogen and phosphorus), and algal growth potential also increased with nutrient enrichment.

Key words: cyanobacterium *Anabaena circinalis*, AGP, germination, growth, nitrogen, phosphorus

서 론

하천과 인공댐에서는 강우와 상류로부터 방류 등에 의해 영양염의 양이 변동되어 식물플랑크톤의 군집구조의 변화가 일어난다(Peeter *et al.*, 1998). 수생태계에서 영양염 증가에 의한 남조류의 과다증식은 이취미 및 독소 등을 포함하는 유해물질 발생의 주요 원인이 되고 있다. 최근 북한강수계에서 2011년 12월에 남조류 *Anabaena*의 과다증식으로 인한 상수원의 이취미 발생사례가 보고되었다(You

et al., 2013). 이러한 양상은 기후변화에 따른 영향으로서 하절기에 남조류의 과다증식이 점차 증가하는 추세와 더불어 연중 발생빈도가 늘어나 동절기에도 남조류 발생이 나타날 수 있으며, 수체 내의 풍부한 영양염은 이를 더욱 더 촉진시킨다(Ibelings *et al.*, 2011; Shi *et al.*, 2011).

수생태계에서 남조류 성장에는 수온, 광도, CO₂ 등과 같은 환경요소 이외에 다양한 영양염이 필요하다. 최근에 북한강수계에서 과다증식하는 남조류 *Anabaena circinalis*의 성장에 주요한 영향을 미치는 수온, 광도, 영양염 조건 등에 대해서 최고성장을 나타내는 환경적 범위가 보고되었다(Park, 2013; Kwon, 2015). 이들 요인 중에서 자연적 현상인 수온과 광 조건은 현장에서 인위적인 조절에 의한 남조류 발생억제 유도가 매우 어려우며, 현장수의 영양염 농도 저감을 위해서 수체 내로 유입되는 질소와 인 부하량의

Manuscript received 23 November 2015, revised 21 December 2015, revision accepted 24 December 2015

* Corresponding author: Tel: +82-2-450-3748, Fax: +82-2-456-5062, E-mail: sjhwang@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.

지속적인 감소를 통한 남조류의 성장 억제가 좀 더 현실적인 방법이다.

효율적인 수질관리와 부영양화 대책을 위하여 물리화학적 수질조사와 함께 생물학적인 검정과 해석의 병행이 필요하다. 조류성장잠재력 측정(Algal Growth Potential Test, AGPT)은 조류를 이용하는 생물학적인 검정법으로서 수체의 영양상태를 파악할 수 있으며, 조류발생의 예측을 가능하게 한다. 특히 하천과 인공호에 대한 하수처리수의 영향(Miller *et al.*, 1975; Greene *et al.*, 1975)과 하수처리수 수준(Miller and Maloney, 1971)을 판단하는 데 효과적이고, 단순 수질 분석에 비해 수환경을 종합적으로 평가(Raschke and Schultz, 1987)하는 장점이 있다. 최근까지 국내에서 여러 가지 조류종의 영양세포를 이용한 조류성장잠재력에 대해서는 많은 연구가 보고되었으나(Oh *et al.*, 1998; Shin and Hwang, 2003; Hwang *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2007), 휴면포자를 이용한 발아잠재력으로서 수질을 평가한 연구 사례는 보고된 바 없다.

따라서 본 연구는 북한강 수역에서 과다증식 하는 주요 남조류 *A. circinalis*를 이용하여 팔당호 유역내 인근 수역의 몇몇 현장수를 대상으로 조류발생 잠재능을 분석하여 영양염 저감에 의한 조류발생 관리의 필요성을 제시하고자 하였다. 이를 위해 서로 다른 영양염 특성을 보이는 팔당호 댐앞, 북한강 수계 금남리, 경안천 수계의 광동교 인근의 현장수를 대상으로 현장에서 우점하는 남조 *A. circinalis*의 휴면포자 발아율과 영양세포의 조류성장 잠재력을 비교하였고, 아울러 Carlson (1977)과 Kratzer and Brezonik (1981)의 영양상태지수(TSI, trophic state index)를 이용한 팔당호수계의 현장 수질특성을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 현장수 채집 및 영양염 자료

남조 *Anabaena circinalis*의 휴면포자 발아율 조사 및 영양세포 조류성장 잠재력 실험에 사용한 현장수는 2014년 9월과 2015년 3월에 팔당댐앞(PD-1), 금남리(화도 하수처리장 방류구 인근 수역인 묵천천 하류; PD-2), 광동교(분원 하수처리장 방류구 인근 수역; PD-3)에서 각각 채수하였고(Fig. 1), Whatman GF/F(Whatman International LTD., Maidstone, England)로 여과하여 배양수로 사용하였다. 배양수로 사용한 현장수의 영양염은 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 암모니아성질소($\text{NH}_4\text{-N}$), 총질소(TN), 인산염인($\text{PO}_4\text{-P}$), 총인(TP) 등 5개 항목을 각각 분석하였다(APHA, 2005). 그

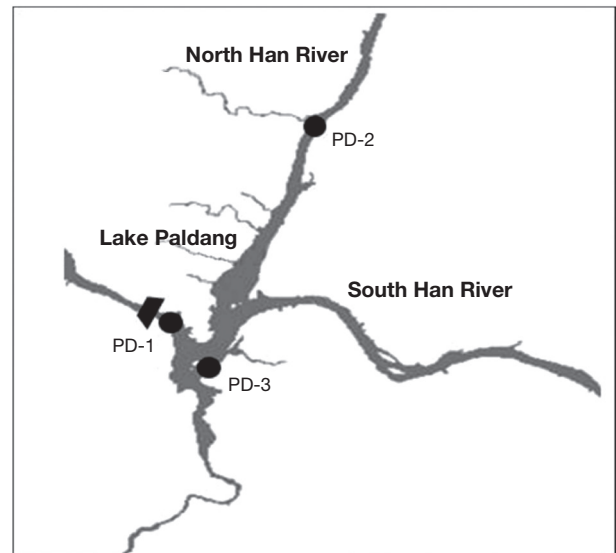


Fig. 1. A map showing the study sites in the Han River. PD-1, Lake Paldang; PD-2, Geumnamri; PD-3, Gwangdong Bridge.

리고 현장수 채집 수역 3개 지점(PD-1, PD-2, PD-3)에 대한 연중 영양염 변화 양상에 대한 수질평가를 위해 2014년 5월부터 2015년 4월까지의 환경부 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr/>) 자료를 이용하였다.

2. 휴면포자 및 영양세포 분리

남조 *A. circinalis* 휴면포자는 2014년과 2015년 3월에 북한강 수역 내 휴면포자 밀도가 높은 장소를 택하고 core sampler(Uwitec, Austria)를 이용하여 퇴적물을 각각 채취하여 실험에 이용하였다. Core tube에 있는 퇴적물은 냉암소(약 4°C)에 보관하여 실험실까지 이동하였다. 실험실에서 core tube 상층의 퇴적물 1 g(W/W)을 취한 후, 냉장 보관한 여과(0.2 μm) 멸균수로 현탁시킨 뒤, 초음파기(JAC 4020 type, 60 Hz, 620 w, Ultrasonic, Korea)로 20초간 2회 초음파 처리하여 현탁액을 분쇄하였다. 분쇄한 현탁액은 100 μm Nylon mesh와 60 μm Nylon mesh에서 각각 여과하였고, 최종적으로 10 μm Nylon mesh를 이용하여 여과하였다. 여과된 시료는 panning method(Matsuoka and Fukuyo, 2000)에 따라 상층에 부유하는 가벼운 입자를 분리하였고, 여과(0.2 μm) 멸균수와 함께 부피를 총 10 mL로 농축하여 암갈색 유리병에 옮겨 담아 냉장보관(4°C)하였다. 휴면포자 분리는 시료 1 mL을 Sedgwick-Rafter chamber에 취하여 도립현미경(Axiovert A1, ZEISS, Germany) 하에서 실시하였다. Microcapillary를 이용하여 휴면포자를 한 개체씩 직접 분리하였고, 이를 냉장 보관한 여과(0.2 μm) 멸균

수가 담긴 microtube에 축적하여 실험 할 때까지 보관하였다.

실험에 사용한 남조류 *Anabaena circinalis* 영양세포는 2012년 8월에 북한강 수역 팔당호에서 남조류가 대 발생하였을 때 분리, 배양하였다. 실험실에서 광학현미경 (AxioStarplus, ZEISS, Germany)으로 200배의 배율 하에서 Pasteur pipette을 이용하여 capillary method에 따라 조류 시료를 분리하였다. 최종 분리된 *A. circinalis* 영양세포는 BG-11 배지가 포함된 250 mL 용량 삼각플라스크에서 온도 25°C, 광도 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (14L: 10D)의 배양 조건으로 유지하였다.

3. 휴면포자 발아 잠재력

북한강 수역 팔당호의 여러 가지 현장수(PD-1, PD-2, PD-3)에 대한 *A. circinalis* 휴면포자의 발아 잠재력을 조사하기 위해 2014년 9월과 2015년 3월에 각각 채수한 현장수를 이용하여 발아실험을 진행하였다. 현장수는 실험에 이용하기 위해 Whatman GF/F (Whatman International LTD., Maidstone, England)로 여과하여 사용하였다. 현장수 0.2 mL를 96 well plate의 각 hole에 채우고 hole당 1개 체씩 접종하였다. 또한 서로 다른 현장수의 영양염 농도에 따른 휴면포자 발아율을 비교하기 위해 증류수(DW)를 대조구로 사용하였다. 여과된 각 현장수 배양액 및 증류수에 대한 처리당 개체수는 30개체였으며, 모든 환경조건에 대하여 3개의 실험군으로 배양하였다. 휴면포자 발아 잠재력 실험에는 선행연구(Park *et al.*, 2014)의 발아실험을 참고하여 광도 및 온도 조건을 설정하였다. 광도 조건은 발아에 최적인 30 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (14L: 10D)으로 조절하였고, 온도 조건은 발아에 최적인 25°C로 조절하였다. 또한 *A. circinalis* 휴면포자 발아가 시작하는 온도인 15°C 조건을 추가하여 휴면포자 발아 잠재력 조사를 실시하였다. 휴면포자의 발아율은 24시간 간격으로 도립현미경 하에서 휴면포자의 발아공 형성을 확인하여 조사하였다. 발아율은 각 실험군에 접종한 휴면포자의 개체수와 발아된 휴면포자 개체수의 비(%)로 계산하였으며, 14일간의 누적발아율의 변화를 평가하였다.

4. 영양세포 성장 잠재력

북한강 수역 팔당호의 여러 가지 현장수(PD-1, PD-2, PD-3)에 대한 남조류 *A. circinalis*의 조류성장 잠재력 (Algal Growth Potential; AGP)을 조사하기 위해 2014년 9월과 2015년 3월에 각각 채수한 현장수를 이용하여 조류의 성장을 분석하였다. 현장수는 실험에 이용하기 위해

GF/F filter로 여과하여 사용하였다. 또한 서로 다른 현장수의 영양염 농도에 따른 조류의 성장을 비교하기 위해 증류수(DW)를 대조구로 사용하였다. 조류 배양에는 온도와 광도를 각각 25°C와 60 $\mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (14L: 10D)을 설정하여 실험하였다. 초기 접종농도는 $5 \times 10^4 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 하였고, 성장은 최고 생물량에서 감소되는 사멸기까지 Chl-*a* 농도로 분석하였다. Chl-*a* 분석은 시료 5~10 mL을 취하여 Whatman GF/F (Whatman International LTD., Maidstone, England)로 여과한 후 90% 아세톤에서 추출하기 위해 냉암소(약 4°C)에 24시간 보관하고 흡광도를 측정하여 계산하였다. 조류의 성장률(μ) 분석은 배양 초기 접종된 Chl-*a* 농도부터 농도가 지수적으로 증가하는 단계와 감소하는 단계까지의 농도를 구하여 아래의 식에 의해서 계산하였다(APHA, 2005).

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

X1: 각 샘플링 시간 구간의 시작부에서의 Chl-*a* 농도 ($\mu\text{g L}^{-1}$)

X2: 각 마지막 샘플링 시간의 Chl-*a* 농도 ($\mu\text{g L}^{-1}$)

($T_2 - T_1$): 각 샘플링 시간 간격 (d)

결과 및 고찰

2014년 5월부터 2015년 4월까지 팔당댐(PD-1), 금남리(PD-2), 광동교(PD-3)에 대한 최근 1년 동안의 영양염 변화 특성은 금남리(PD-2)에서의 질소와 인 농도가 다른 두 지점에 비해서 상대적으로 높게 측정되었다(Fig. 2). 즉 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$), 암모니아성질소($\text{NH}_4\text{-N}$), 총질소(TN), 인산염인($\text{PO}_4\text{-P}$), 총인(TP) 등을 측정한 영양염 항목은 공통적으로 금남리(PD-2), 광동교(PD-3), 팔당댐앞(PD-1) 순서로 연 평균 영양염 농도가 감소하였다. 이와 같은 지점간 영양염 특징은 2014년 9월과 2015년 3월에 채수한 세 지점의 현장수 영양염 농도에서도 유사한 양상이 나타났다.

Carlson (1977)과 Kratzer and Brezonik (1981)에 따라서 조사수역의 TSI (TN)과 TSI (TP)를 각각 평가하였다. 팔당댐앞(PD-1), 금남리(PD-2), 광동교(PD-3)의 평균 TSI (TN)은 각각 64.6, 85.1, 69.9로 나타났으며, 팔당댐앞(PD-1)과 광동교(PD-3)는 부영양상태이며, 금남리(PD-2)는 과영양상태인 것으로 평가되었다(Fig. 3). 또한 팔당댐앞(PD-1), 금남리(PD-2), 광동교(PD-3)의 평균 TSI (TP)는 각각 48.7, 67.6, 55.6으로 조사되었는데, 팔당댐앞(PD-1)은 중영양상태, 금남리(PD-2)와 광동교(PD-3)는 부영양상태로

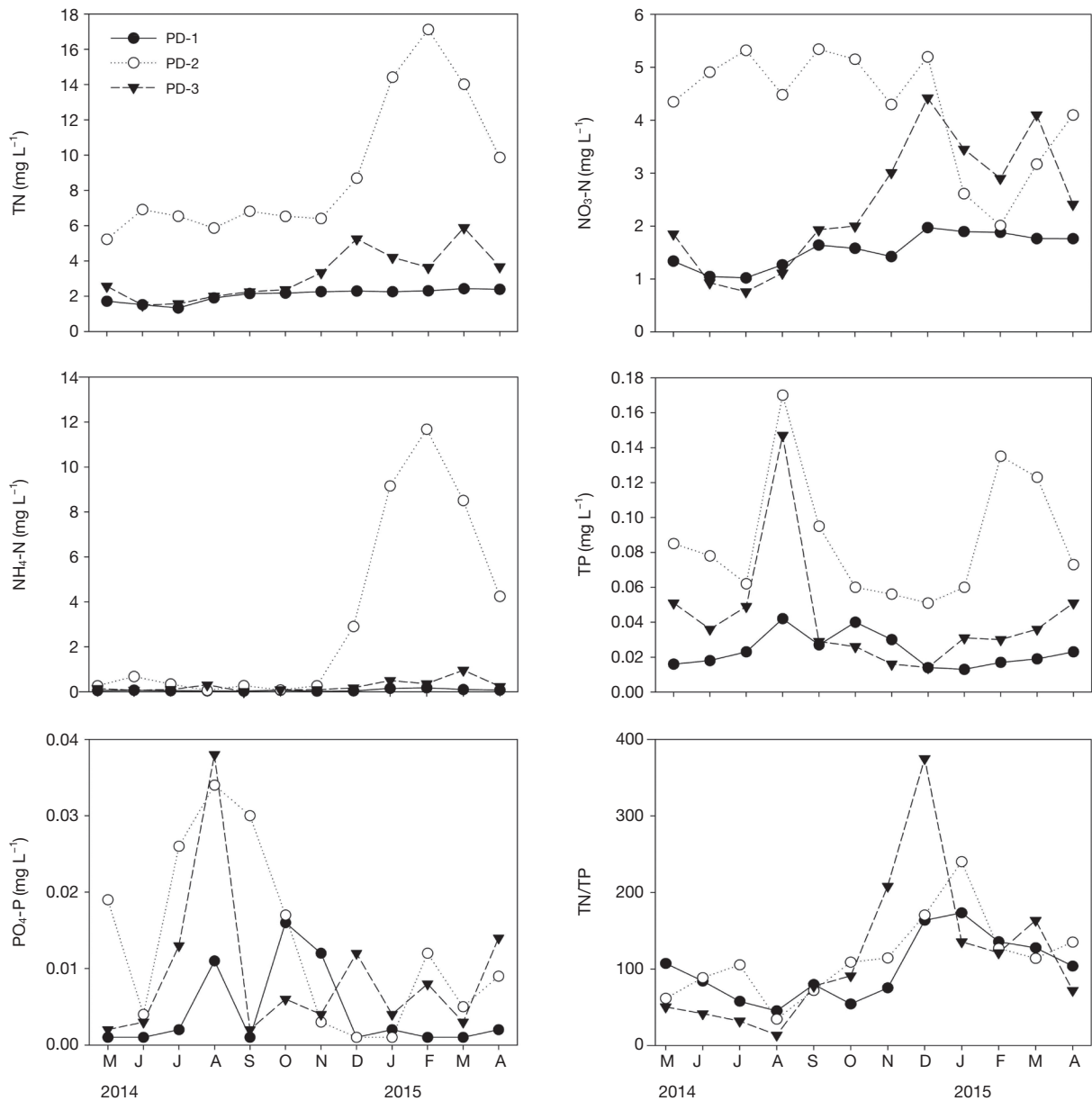


Fig. 2. Monthly changes of nutrients at the three field sites from May 2014 to April 2015.

나타났다(Fig. 3). 연구대상 수역인 팔당댐앞(PD-1), 금남리(PD-2), 광동교(PD-3)는 TP보다는 TN에 의해서 좀더 높은 부영양지수가 나타났다.

2014년 9월과 2015년 3월에 채수한 서로 다른 팔당호 내 3가지 현장수를 이용하여 15°C와 25°C의 온도 조건으로 *A. circinalis* 휴면포자 발아율을 각각 분석하였다. 15°C 배양 조건에서는 두 가지 시기에 채수한 모든 현장수에서 5%~15%의 낮은 발아율을 나타냈고, 함께 실험한 증류수에서는 휴면포자가 전혀 발아하지 않았다(Fig. 4A, C).

그러나 25°C 배양조건에서는 2014년 9월 시료 중 금남리(PD-2) 현장수에서 75%의 가장 높은 발아율을 나타냈고, 팔당댐앞(PD-1)과 광동교(PD-3) 현장수는 각각 45%와 30%의 발아율을 나타냈으며, 증류수에서는 5%의 매우 낮은 발아율을 나타냈다(Fig. 4B). 2015년 3월 시료에서도 금남리(PD-2) 현장수에서 55%의 높은 발아율을 나타냈고, 팔당댐앞(PD-1)과 광동교(PD-3) 현장수는 모두 30%의 발아율을 나타냈으며, 증류수에서는 전혀 발아하지 않았다(Fig. 4D). 두 가지 시기에 각각 채수한 현장수 중 15°C와

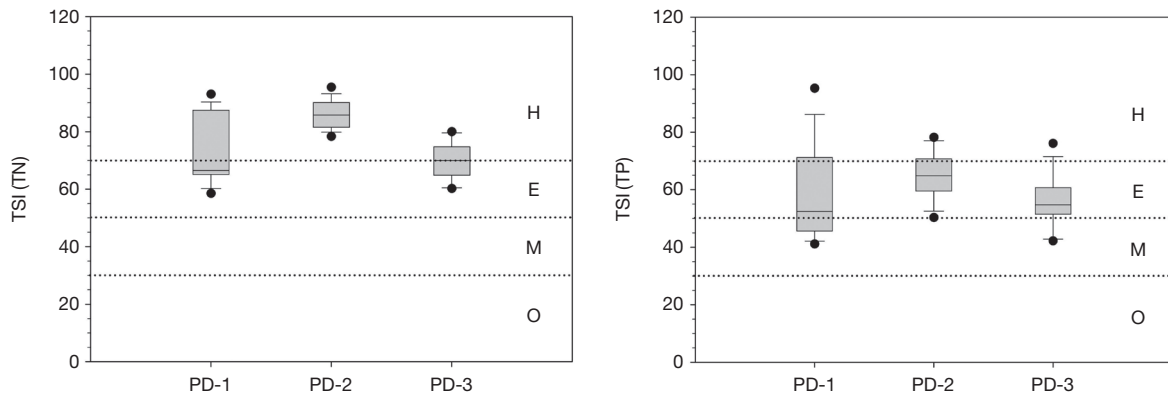


Fig. 3. Trophic state index (TSI) values at the three field sites from May 2014 to April 2015. O, oligotrophy; M, mesotrophy; E, eutrophy; H, hypertrophy.

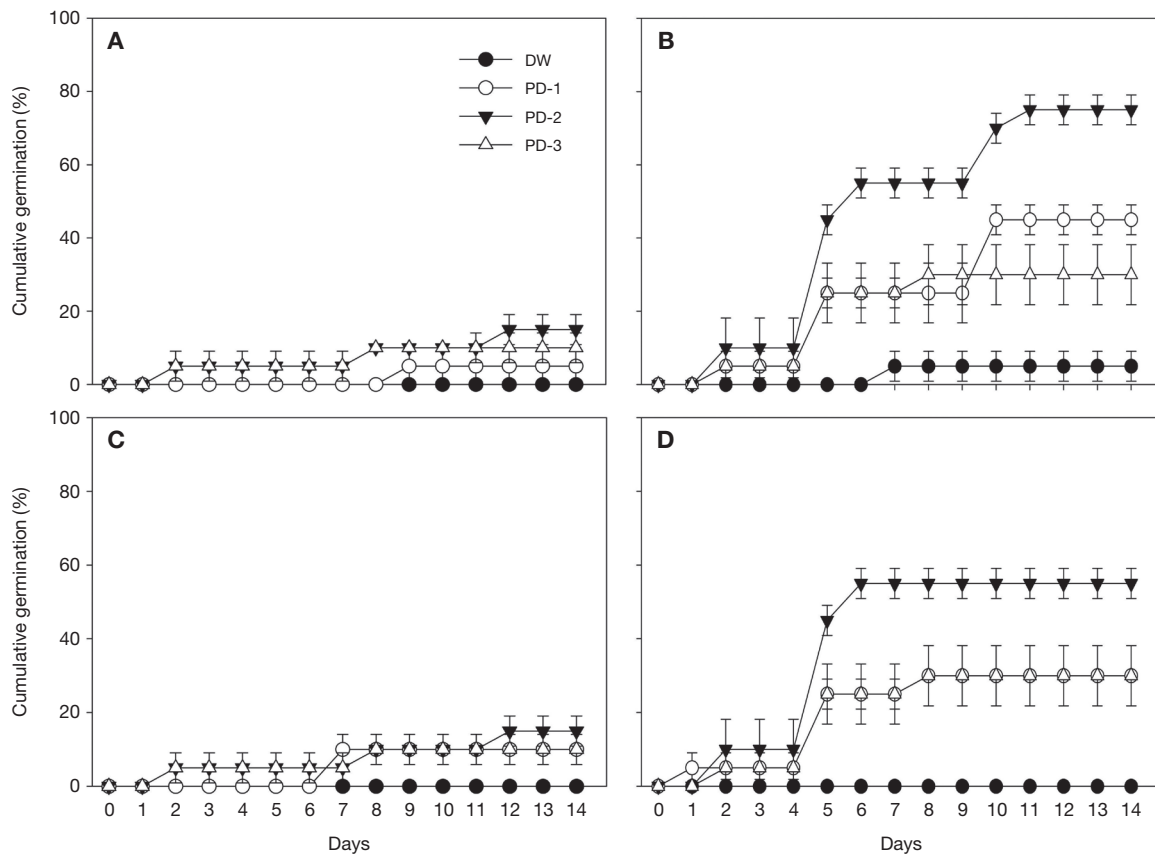


Fig. 4. Germination potential of *Anabaena circinalis* in the four types of culture media (DW, PD-1, PD-2 and PD-3). A, September 2014, 15°C; B, September 2014, 25°C; C, March 2015, 15°C; D, March 2015, 25°C.

25°C 배양조건에서 온도에 따른 발아율 차이가 나타났음에도 불구하고, 공통적으로 현장수 중 질소 및 인 농도가 가장 높았던 금남리(PD-2) 현장수에서 2014년 9월(TN: 6.970 mg L⁻¹; TP: 0.059 mg L⁻¹)과 2015년 3월(TN: 2.690

mg L⁻¹; TP: 0.046 mg L⁻¹)에 각각 최고의 발아율(15% 및 75%, 15% 및 55%)을 기록하였다(Figs. 4, 5). 반면에 금남리(PD-2) 현장수에 비해 낮은 질소 및 인 농도를 나타냈던 팔당댐앞(PD-1)과 광동교(PD-3) 현장수에서는 상대적으로

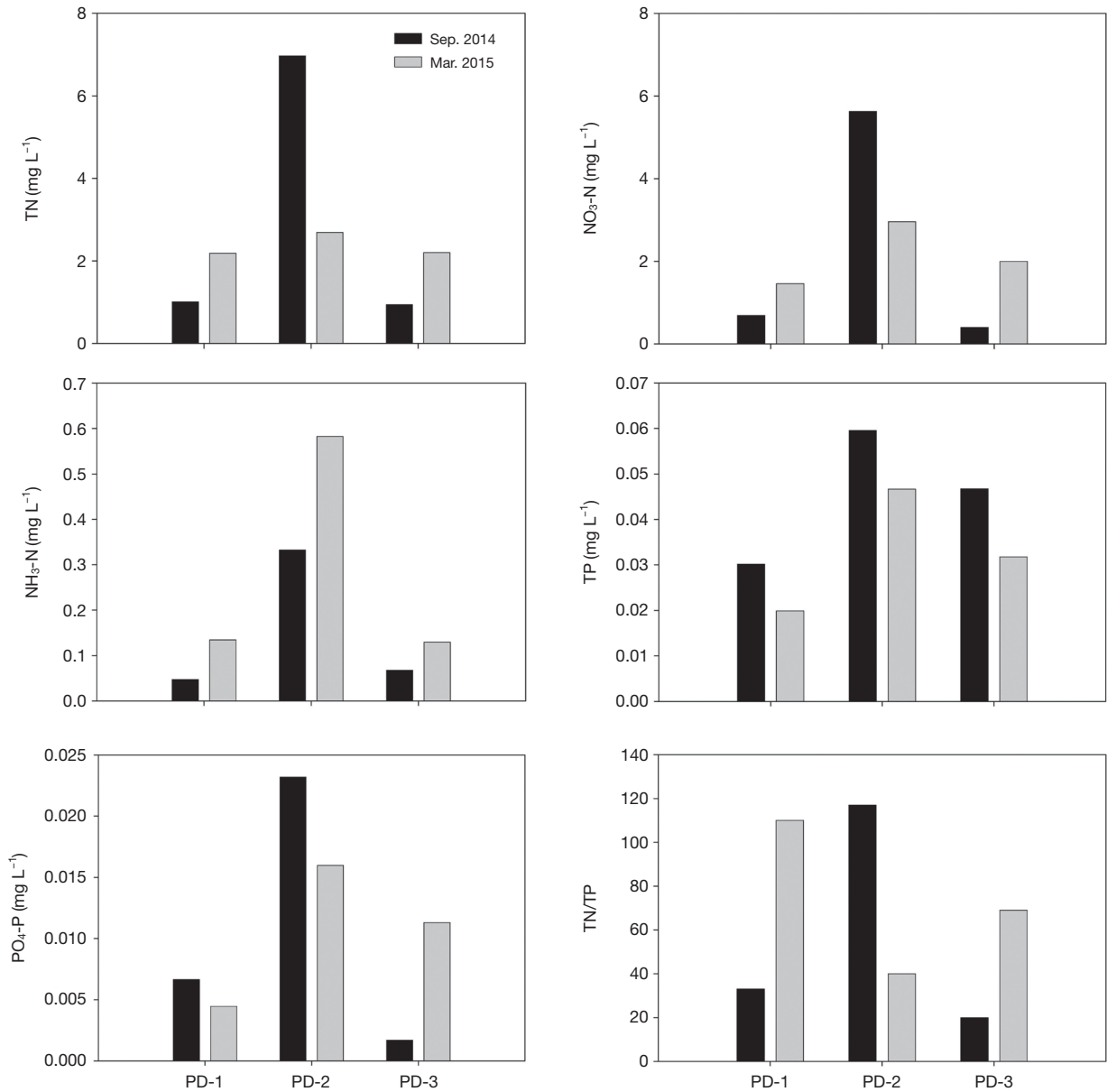


Fig. 5. Concentrations of nitrogen and phosphorus at the three study sites.

로 낮은 발아율을 기록하였다. 증류수 조건에서 발아가 거의 발생하지 않은 것은 영양염 조건이 *A. circinalis* 휴면포자 발아에 절대적인 영향을 미치는 것으로 볼 수 있으며, 고농도의 영양염 조건인 금남리(PD-2) 현장수에서 발아율 증가는 영양염의 증가에 따라 이루어진다고 판단된다. 일반적으로 질소와 인은 남조류 휴면포자 발아에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며(Agrawal and Misra, 2002), *A. circinalis* 휴면포자는 높은 농도의 질소와 인 조건에서 발아율이 현저히 증가하였다(Fay, 1988). 영양염 조건은 북

한강 수역에서 분리한 *A. circinalis* 휴면포자 발아에 영향을 미치는 주요한 요인이며, 특히 인보다는 질소의 첨가가 *A. circinalis* 휴면포자 발아율 증가에 더 큰 영향을 나타낸 것으로 보고되었다(Park *et al.*, 2014). 또한 질산성 질소와 암모니아성 질소를 이용한 두 가지 질소 영양염 요인에 따른 발아상태를 확인하여 보고한 자료(Hwang *et al.*, 2015)에 의하여 *A. circinalis* 휴면포자 발아율 증가에 암모니아성 질소가 좀 더 큰 영향을 미치는 것으로 조사되었다.

하수처리 방류수는 법적 기준 이하로 질소와 인 농도를

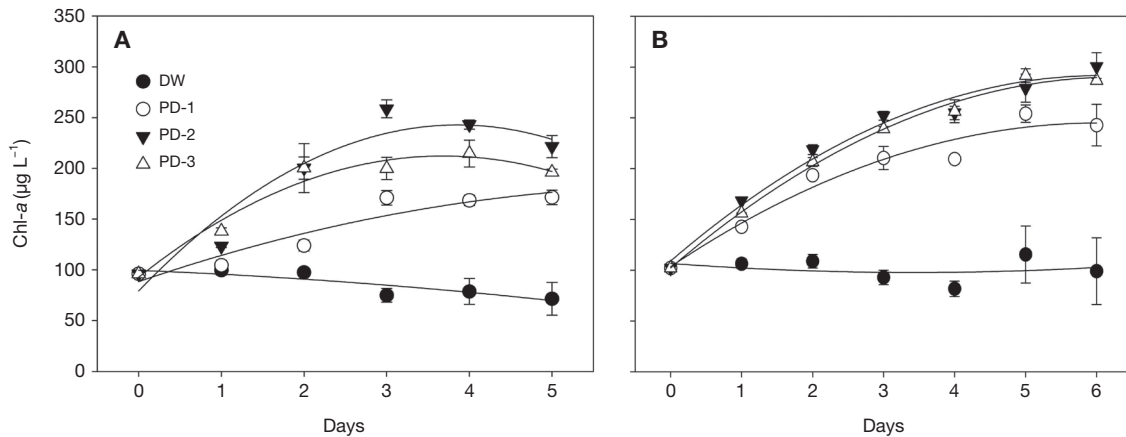


Fig. 6. Growth potential of *Anabaena circinalis* in the four types of culture media (DW, PD-1, PD-2 and PD-3). A, September 2014, 15°C; B, March 2015, 25°C.

유지하고 있다 하더라도 처리장 효율 및 시기(강우기 등)에 따라 방류수내 질소와 인 농도의 차이가 있다. 팔당댐앞(PD-1) 현장수는 상류 혹은 주변으로부터 점오염원과 비점오염원이 유입되지만 희석효과로 인해 낮은 영양염 농도를 보였으며, 따라서 휴면포자 발아율이 상대적으로 낮게 나타났다. 그러나 이러한 수준의 팔당호 영양염 농도도 휴면포자 발아에 어느 정도 기여하고 있으며, 특히 금남리(PD-2) 현장수에 영향을 미치는 화도 하수처리장 인근 수역인 묵현천의 경우에는 영양염 농도가 상대적으로 높아 북한강 본류로 유입된 이후에는 북한강 및 팔당호 수역에 일부 영향을 미칠 것이기 때문에 관심수역으로서 이곳에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

2014년 9월과 2015년 3월에 각각 채수한 현장수는 팔당댐앞(PD-1)과 광동교(PD-3) 현장수에 비하여 금남리(PD-2)에서 모두 *A. circinalis* 영양세포가 가장 높은 성장을 보였고, 팔당댐앞(PD-1) 현장수는 상대적으로 낮은 성장을 나타냈다. 즉 2014년 9월에 금남리(PD-2) 현장수의 Chl-a 농도는 258.5 µg L⁻¹를 나타내며 0.33 d⁻¹의 최고 조류성장률(µ)을 기록하였다(Fig. 6A). 또한 2015년 3월에 금남리(PD-2) 현장수의 Chl-a 농도는 300.3 µg L⁻¹를 나타내며 가장 높은 조류성장률(µ)인 0.38 d⁻¹을 기록하였는데, 광동교(PD-3) 현장수에서도 이와 유사하게 Chl-a 농도는 291.5 µg L⁻¹를 나타내며 조류의 성장률(µ)은 0.35 d⁻¹을 기록하였다(Fig. 6B). 이는 금남리(PD-2) 현장수에서 TN과 TP 등 영양염 농도가 가장 높았기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 화도하수처리장 인근 수역인 묵현천이 합류하는 금남리(PD-2) 현장수는 *A. circinalis* 영양세포의 성장 잠재능(Algal Growth Potential, AGP)에 가장 많은 기여를 하였다. 부영양화는 *A. circinalis*의 과다증식을 유발하며(Paerl,

1988), 높은 농도의 영양염을 포함하는 하수처리장 방류수는 인근 수역에 부영양화를 유도할 수 있다. 하수처리장 인근 수역을 대상으로 안정동위원소를 이용한 조류 세포 속에 있는 질소의 기원에 대해서 조사한 실험에서 본류 수역의 질소보다 하수처리장 방류수내 질소가 더 많이 포함돼있다는 보고(Shin, 2015)에 고려해 볼 때 하수처리장 방류수 영양염 저감에 대한 관심이 좀 더 요구된다.

광동교(PD-3) 현장수의 경우 질소 농도는 팔당댐앞(PD-1) 현장수와 서로 유사하였으나, 인 농도는 팔당댐(PD-1) 현장수 보다는 더욱 높은 값을 나타냈고, 이러한 영양염 조건에서 팔당댐앞(PD-1) 현장수에 비해 비교적 높은 성장을 보였다(Fig. 6). 팔당댐앞(PD-1) 현장수에 비교하여 금남리(PD-2)와 광동교(PD-3) 현장수는 TP 농도에 대한 상관분석을 통해 Chl-a 농도 및 조류성장률(µ)과 유의한 상관관계($r=0.986$, $p<0.01$)를 보였다. 질소고정 능력이 있는 *Anabaena*는 낮은 질소농도에서도 경쟁력이 있기 때문에 *A. circinalis*의 성장 잠재능은 질소보다 인에 의해 좌우 될 것으로 사료된다. 조류의 성장과 증식을 위해서는 광, 온도 등의 환경조건을 비롯해 영양염이 필수적 조건이다. 담수생태계내의 영양염 중에서, 인은 질소에 비해 조류 성장의 제한인자로서 알려져 있는데(Schindler *et al.*, 1971; Oh *et al.*, 1998), 영양염 비율을 토대로 한 영양상태 평가에서 TN/TP비가 10 이하의 범위에서는 질소가 제한요인으로 작용하며, TN/TP비가 30 이상의 범위에서는 인이 조류의 성장에 미치는 제한요인으로 작용한다(Smith, 1982; Sigua *et al.*, 2006). 팔당댐앞(PD-1), 금남리(PD-2), 광동교(PD-3)의 TN/TP비는 각각 45~173, 34~170, 13~374이었으며(Fig. 2), 대부분 100 이상의 TN/TP비를 나타냄으로써 조류의 성장에 인이 주요한 제한요인으로 작용할 가

능성을 보였다. 더욱이 수중의 인은 남조류의 이취미 주요 물질인 geosmin의 생성에 관여하는 중요한 인자인데 (Saadoun *et al.*, 2001), 최근의 음용수 이취미 문제와 관련하여 주요 상수원 호소에 부유습지를 적용한다면 인 제거 효과를 통한 조류 저감이 어느 정도 가능할 것으로 기대한다. 본 조사에서 화도 하수처리장 영향을 받는 금남리(PD-2)보다 분원 하수처리장 영향을 받는 광동교(PD-3)에서 영양염 농도가 좀 더 낮게 측정되었는데, 이는 광동교(PD-3) 지점 인근에 발달되어 있는 수생식물에 의해서 영양염 흡수의 효과가 일부 작용했기 때문으로 추측된다. 그리고 취수원이 인접한 팔당댐앞(PD-1) 현장수를 이용한 경우에도 *A. circinalis*의 성장이 높게 나타났다. 따라서 현재에는 팔당호 자체의 영양염 상태로도 *A. circinalis* 성장 잠재력이 충분히 있을 것으로 판단해 볼 수 있다.

결론적으로 다양한 수중환경 요인이 *Anabaena* 휴면포자의 발아와 영양세포의 성장에 영향을 미치는데, 이러한 요인들은 상호 복합적으로 작용하여 *A. circinalis*의 과다증식으로 이어진다. 그러나 수온과 광도 등을 포함한 환경요인들은 인위적으로 제어할 수 있는 것이 아니며, 다만 영양염은 인간의 활동에 의해서 유입되는 경우가 대부분이기 때문에 영양염 저감을 통한 조류의 발생을 억제하는 것이 우선적으로 고려할 사항이라고 시료된다. 따라서 하천으로 유입되는 하수처리 방류수 등을 포함한 여러 가지 오염원의 관리가 우선적으로 필요하다고 사료된다. 그러나 하수처리 방류수의 영향을 받는 수역을 포함한 부영양수역에서의 영양염 저감에 수생식물 또는 부유습지를 이용한 방안이 검토될 수 있지만, 실제 하천수 유량에 따라 습지 조성의 크기, 처리 능력 등 여러 사항이 고려되어야 하기 때문에 향후에는 이에 대한 면밀한 검토와 관련 연구가 필요할 것으로 본다.

적 요

본 연구는 2014년 9월과 2015년 3월에 채수한 팔당호 3지점의 현장수(PD-1, PD-2 및 PD-3)를 이용하여 북한강에서 우점하는 *A. circinalis*의 휴면포자 발아 및 성장 잠재력을 평가하였다. 질소와 인 농도는 팔당댐앞(PD-1)과 광동교(PD-3)에 비교하여 금남리(PD-2)에서 좀 더 높게 나타났다. 팔당호 3지점의 총질소에 대한 영양상태지수(TSI)는 65~85의 범위로 나타났으며, 부영양 또는 과영양 상태로 평가되었다. 또한 총인에 대한 영양상태지수(TSI) 값은 49~68의 범위로서, 중영양 또는 부영양 상태로 평가되었다. 휴면포자 발아 잠재력은 영양염 농도가 높은 금남리

지점(PD-2)에서 좀 더 높게 나타났으며, 영양세포 성장 잠재력도 영양염 농도가 높은 현장수에서 증가하였다.

사 사

본 연구는 2015년도 한강수계 환경기초조사사업(연구과제명: 유해조류에 의한 이취미 물질 발생원인 조사 및 관리방안 연구) 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- APHA. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st ed. American Public Health Association. Washington, D.C. USA.
- Agrawal, S.C. and U. Misra. 2002. Vegetative survival, akinete and zoosporangium formation and germination in some selected algae as affected by nutrients, pH, metals, and pesticides. *Folia Microbiologica* **47**: 527-534.
- Carlson, R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* **22**: 361-369.
- Fay, P. 1988. Viability of akinetes of the planktonic cyanobacterium *Anabaena circinalis*. *Proceedings of the Royal Society of London, series B* **234**: 283-301.
- Greene, J.C., W.E. Miller, T. Shiroyama and T.E. Maloney. 1975. Utilization of algal assays to assess the effects of municipal, industrial, and agricultural wastewater effluents upon phytoplankton production in the Snake River System. *Water, Air, and Soil Pollution* **4**: 415-434.
- Hwang, S.J., C.H. Park, J.H. Park, K.H. Kim, W.B. Seo, M.H. Park and B.J. Lim. 2015. Factors affecting akinete germination in *Anabaena circinalis*. Symposium on "Freshwater Ecology and Cyanobacterial Blooms Dynamics". pp. 49-67. Han River Environment Research Center, NIER, Korea.
- Hwang, S.J., K.A. You and J.K. Shin. 2006. Comparison algal growth potentials in the large reservoir and river mainstream of Nakdong River watershed. *Korean Journal of Limnology* **39**: 138-144.
- Ibelings, B.W., A.S. Gsell, W.M. Mooij, E. Van Donk, S. Van Den Wyngaert and L.N. De Senerpont Domis. 2011. Chytrid infections and diatom spring blooms: paradoxical effects of climate warming on fungal epidemics in lakes. *Freshwater Biology* **56**: 754-766.
- Kratzer, C.R. and P.L. Brezonik. 1981. A Carlson-type trophic state index for nitrogen in Florida lakes. *Water Resources Bulletin* **17**: 713-715.
- Kwon, D.R. 2015. Growth, buoyancy and geosmin production of cyanobacteria under different temperature and light condition. M. Sc. Thesis. Konkuk University, Seoul, Korea.

- 165 pp.
- Matsuoka, K. and Y. Fukuyo. 2000. Technical guide for modern dinoflagellate cyst study. WESTPAC-HAB 6-9.
- Miller, W.E. and T.E. Maloney. 1971. Effects of secondary and tertiary wastewater effluents on algal growth in a lake-river system. *Journal WPCF* **43**: 2361-2365.
- Miller, W.E., J.C. Greene, T. Shiroyama and E. Merwin. 1975. The use of algal assays to determine effects of waste discharges in the Spokane River System. Proceedings: Bio-stimulation and Nutrient Assessment Workshop. U.S. Environmental Protection Agency, EPA 660/3-75-034. pp. 113-130.
- Oh, H.M., S.J. Lee, S.B. Kim, M.K. Park, B.D. Yoon and D.H. Kim. 1998. Determination of limiting nutrient for algal growth by algal bioassay. *Korean Journal of Limnology* **31**: 150-157.
- Paerl, H.W. 1988. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. *Limnology and Oceanography* **33**: 823-847.
- 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.
- Park, H.J. 2013. Study on harmful cyanobacteria and off-flavor production in Lake Paldang. M. Sc. Thesis. Konkuk University, Seoul, Korea. 173 pp.
- Park, M.H., N.Y. Kim, S.J. Hwang, M.Y. Suh, Y.J. Kim and B.H. Kim. 2007. Evaluation of water quality after rehabilitation of Cheonggye Stream using AGP test. *Korean Journal of Limnology* **40**: 234-243.
- Peeter, N., J. Arvo, T. Lea and N. Tiina. 1998. The budgets of nitrogen and phosphorus in shallow eutrophic Lake Vortjärvi (Estonia). *Hydrobiologia* **363**: 219-227.
- Raschke, R.L. and D.A. Schultz. 1987. The use of the algal growth potential test for data assessment. *Journal WPCF* **59**: 222-227.
- Saadoun, I.M., K.K. Schrader and W.T. Blevins. 2001. Environmental and nutritional factors affecting geosmin synthesis by *Anabaena* sp. *Water Research* **35**: 1209-1218.
- Schindler, D.W., F.A.J. Armstrong, S.K. Holmgren and G.J. Brunskill. 1971. Eutrophication of Lake 227, experimental lake area, Northwestern Ontario, by addition of phosphate and nitrate. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* **28**: 1763-1782.
- Shi, L., Y. Cai, F. Kong and Y. Yu. 2011. Changes in abundance and community structure of bacteria associated with buoyant *Microcystis* colonies during the decline of cyanobacterial bloom (autumn-winter transition). *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology* **47**: 355-362.
- Shin, J.K. and S.J. Hwang. 2003. Algal growth potential test (AGPT) in the stream-reservoir of the Pyeongtaek Reservoir watershed, Korea. *Korean Journal of Limnology* **36**: 172-180.
- Shin, K.H. 2015. The use of stable isotopes to identify nitrogen source in Han River. Symposium on "Freshwater Ecology and Cyanobacterial Blooms Dynamics", pp. 163-173. Han River Environment Research Center, NIER, Korea
- Sigua, G.C., M.J. Williams, S.W. Coleman and R. Starks. 2006. Nitrogen and phosphorus status of soils and trophic state of lakes associated with forage-based beef cattle operations in Florida. *Journal of Environmental Quality* **35**: 240-252.
- Smith, V.H. 1982. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lake: An empirical and theoretical analysis. *Limnology and Oceanography* **27**: 1101-1112.
- 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.