

북한강 수계의 남조 *Anabaena* 대발생과 강우의 관계

변정환 · 조인환 · 황순진^{1,*} · 박명환¹ · 변명섭² · 김백호^{3,*}

한양대 환경과학과, ¹건국대 환경과학과, ²국립환경과학원, ³한양대 생명과학과

Relationship between a Dense Bloom of Cyanobacterium *Anabaena* spp. and Rainfalls in the North Han River System of South Korea. *Byun, Jeong-Hwan, In-Hwan Cho, Soon-Jin Hwang^{1,*}, Myung-Hwan Park¹, Myeong-Seop Byeon² and Baik-Ho Kim^{3,*}* (Department of Environmental Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea; ¹Department of Environmental Science, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea; ²National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea; ³Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

Abstract To evaluate the relationship between dynamics of Cyanobacterial bloom and rainfalls, a monthly monitoring of water quality and phytoplankton from the three serial lakes (Lake Ui-am, Lake Chung-pyeong and Lake Pal-dang) in the North Han River System were examined 12 times from May 2012 to March 2013. A dense bloom of cyanobacterium *Anabaena* spp., was occurred over three lakes in the summer season of 2012. In Lake Ui-am, the *Anabaena* population appeared in June, showed a peak in July (43,850 cells mL⁻¹) and disappeared in November 2012. In Lake Chung-pyeong and Lake Pal-dang, *Anabaena* population commonly appeared in July, showed the peaks (31,648 cells mL⁻¹ and 7,136 cells mL⁻¹, respectively) in August, and entirely disappeared in September 2012. Over the three lakes, the phytoplankton community was commonly dominated by diatoms before Monsoon, cyanobacteria during Monsoon, and diatoms after Monsoon, respectively, indicating a Monsoon-dependent succession. A correlation analysis revealed that dynamics of *Anabaena* population was strongly related with rainfall ($r=0.72$, $r=0.83$, $r=0.88$, $P<0.01$ for three lakes), and partly with nutrients, inflow and outflow of lakes. Therefore, this study indicates that the outbreak and destruction of *Anabaena* bloom in North Han River System between 2012 and 2013 was impacted by rainfalls. However, a high density of cyanobacteria in Lake Ui-am remained after Monsoon, and thus, may produce bad-order and toxins from phytoplankton.

Key words: algal bloom, *Anabaena*, cyanobacterium, North Han River System, rainfall

서 론

우리나라는 강수량의 계절적 변이가 심하고 연간 강수량의 50% 이상이 여름철에 집중되어 있어 하천으로

유입되는 수자원을 효율적으로 운용하지 못하는 실정이다. 우리나라의 연간 수자원 총량은 1,276억m³이며, 그 중 74%가 바다로 유실, 대기 증발, 지하 침투 등으로 손실되고 26%에 해당되는 331억m³만이 이용되고 있으며, 하천으로 유출되는 수체 중 수자원으로 이용하기 어려운 수체를 제외하면 238억m³에 불과하다 (Seo *et al.*, 2003). 따라서 국내 주요 하천의 상류에는 음용수를 비롯한 각종 용수를 공급하기 위한 크고 작은 인공댐이

Manuscript received 9 June 2014, revised 25 June 2014,
revision accepted 30 June 2014

* Corresponding author: Tel: +82-2-2220-0960, Fax: +82-2-2220-0960,
E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr, tigerk@hanyang.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.

건설되어 있다 (Jones *et al.*, 1997).

그러나 인공호를 건설하여 수자원을 확보한 후 수질 관리가 이루어지지 않으면 호소의 부영양화 현상이 일어나게 되며, 부영양화 된 호소에서는 식물플랑크톤의 대발생을 일으켜 심각한 문제를 야기하게 된다.

국내의 중·대형 수체(하천 및 호소) 연구에 따르면, 계절적 몬순강우가 이화학적 수질특성에 대한 직접적인 영향을 준다는 보고가 있으며 (An and Jones, 2000; Kim and Kim, 2004), 몬순강우로 인한 체류시간 변화는 식물플랑크톤 군집 변화에 주요한 요인으로 작용한다. 특히 체류시간의 증가는 영양염을 농축시켜 식물플랑크톤이 성장하는데 좋은 조건을 형성하여, 식물플랑크톤이 대발생을 일으킬 수 있는 환경을 만들 수 있다.

남조류 대발생 (Cyanobacteria bloom)은 인 (P) 등의 영양염 농도 증가, 많은 일조량, 수온의 증가, CO₂ 증가, 높은 pH 등에 의해 일어날 수 있으며, 대발생의 소멸은 흐린 날씨에 의한 일조량 감소, 물의 흐름에 의한 Flushing 효과, 수체로 유입되는 인 (P)의 감소 등으로 일어날 수 있다 (Soranno, 1997; Havens and Walker, 2002; Murrell and Lores, 2004; Havens, 2008). 실제로 2012년 여름철에 북한강 수계에서 남조 *Anabaena* spp.가 대발생을 일으켰으며, 여름철 몬순기 이후에 소멸하였다. 대발생을 일으킨 *Anabaena* spp.의 종은 형태적으로 유사한

Anabaena circinalis, *Anabaena crassa*, *Anabaena spirouides* 등 3종이 혼재 (co-existence)되어 나타난 것으로 조사되었으며 (Li *et al.*, 2013), 이러한 *Anabaena* 대발생은 Brazil에서도 *Anabaena* spp.가 혼재되어 대발생을 일으킨 사례가 있다 (Yunes *et al.*, 2003). 북한강 수계는 서울 및 수도권으로 유입되는 주요 상수원으로써 *Anabaena* 대발생은 이·취미 발생, 독소인 Anatoxin 생성 등의 문제를 일으켜 먹는 물 공급에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

본 연구는 북한강 수계에서 대발생을 일으킨 남조 *Anabaena* 개체군의 거동과 강우와의 관계를 파악하고자 2012년 5월부터 2013년 4월까지 북한강 수계 의암호, 청평호, 팔당호의 수리-수문, 수질 및 식물플랑크톤 현존량 등을 월 1회씩 총 12회에 걸쳐 조사하였다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 기간

조사는 남조대발생을 일으켰던 북한강 의암호 중도선 착장 (UA), 청평호 댐앞 (CP), 팔당호 댐앞 (PD) 등을 대상으로 각 호소별 1개 정점을 선정하고 2012년 5월부터 2013년 4월까지 매월 1회씩 총 12회를 실시하였다 (Fig.

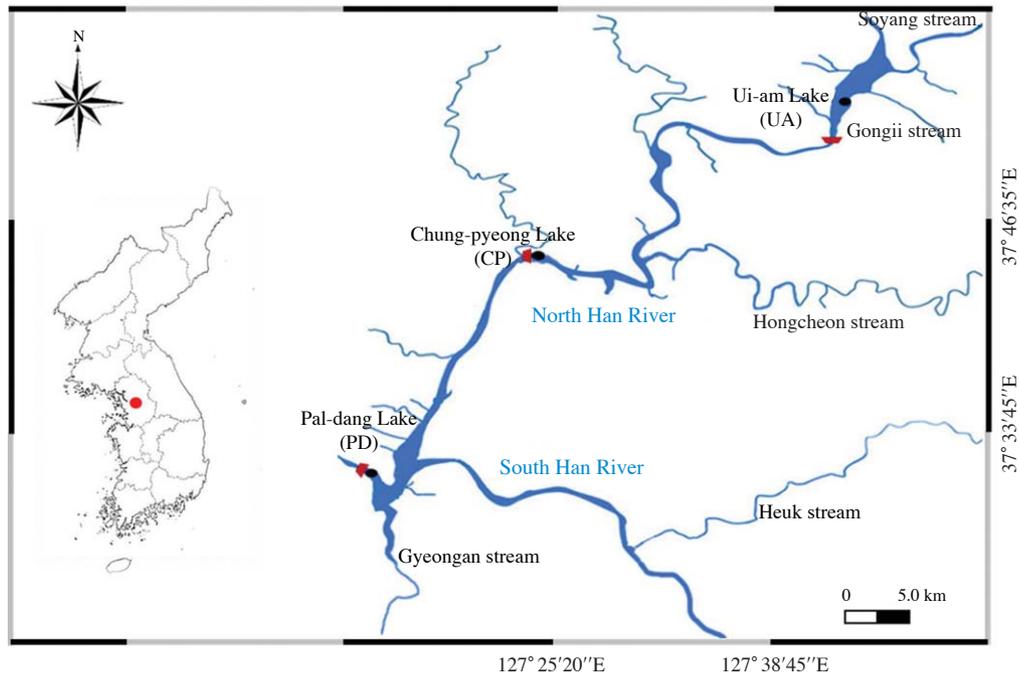


Fig. 1. A map showing the sampling sites in three serial lakes (Lake Ui-am, Lake Chung-pyeong, and Lake Pal-dang) in North Han River System from May 2012 to March 2013.

1). 남조류 *Anabaena* 개체군의 거동과 강우와의 관계를 파악하기 위하여, 한반도 강우의 특성을 고려하여, 초여름까지 1차 강우가 시작하기 전까지를 몬순전기(Before Monsoon), 강우가 집중되는 시기를 몬순기(Monsoon), 강우가 없거나 매우 적은 강수량을 보인 경우를 몬순후기(After Monsoon)등으로 구분하여 조사하였다(Ha *et al.*, 2005). 본 조사에서 몬순기 동안 100 mm 이상의 강우는 크게 2회 발생하였는데, 1차 강우는 6월 말~7월 초 사이에 발생하였고, 2차 강우는 8월 중순~9월 초 사이에 각각 발생하였다.

2. 환경요인 분석

조사지점별 시료채수는 호소환경조사지침에 따라 채수하였으며, 실험실 분석항목은 시료를 채수하여 냉암소에서 보관하여 실험실로 옮긴 후 분석하였다.

수질조사항목 중 수온(Water temperature), 수소이온농도(pH), 용존산소(Dissolved oxygen), 탁도(Turbidity)는 현장수질측정기(YSI-6600D, America)를 이용하여 현장에서 측정하였다. Chlorophyll *a*는 현장수 500 mL를 GF/F(Whatman 47 mm, 1.2 μ m porosity, England) filter로 여과하여 90% acetone 10 mL을 넣어 24시간 동안 냉암소에서 추출한 후 20분간 원심분리기로 분리하고 상층액을 취하여 범용분광광도계(UV VIS Spectrophotometer, SHIMADZU, Japan)를 사용하여 다중과장에서 측정하여 계산하였다. SS는 미리 100°C dry oven에서 건조하여 무게를 잰 GF/F filter를 이용하여 일정량의 시료를 여과하고 다시 100°C 건조기에서 24시간 건조시킨 후 측정된 무게의 차이를 계산하였다. 한편 CODMn는 알칼리성 과망간산칼륨법에 따라 측정하였다. 총질소는 흡광광도법을 이용하였으며, 총인은 흡광광도법 중 아스코르빈산 환원법으로 각각 측정하였다(APHA, 2005).

조사기간 중 각 댐에서의 날씨 및 강우, 수체의 유입, 방출량 등은 국가 수자원관리 종합정보 시스템(WAMIS)에 게재된 자료를 참고하였고, 강우와 각 요인과의 상관관계 분석을 위해 조사기간 동안 분석된 결과로 Pearson의 상관지수 분석법을 이용하여 상관관계를 분석하였다(SPSS Statistics 21. IBM).

3. 식물플랑크톤 분석

조사지점별 채수는 Van Dorn 채수기를 이용하여 표층(수심 30 cm) 현장수를 채수하였으며, 식물플랑크톤의 동정과 계수를 위해 채수한 시료를 250 mL 폴리에틸렌 채집병에 넣고, 현장에서 Lugol 용액으로(최종농도 1%)

고정하여 실험실로 운반하였다. 운반한 고정시료는 72시간 이상 침강시킨 후 조류 농도에 따라 Siphon을 이용하여 상등액을 제거하는 방법으로 2~5배 농축한 뒤 식물플랑크톤을 동정하였다. 동정은 광학현미경 400~1000배(Nikon eclipse E600, Japan)를 이용하여 중 수준까지 하였고, 규조류의 경우 산처리 방법을 이용하여 표본을 제작한 후 중 수준까지 동정하였으며, 동일 속에서 뚜렷한 식별 형질의 차이를 보이지 않는 종은 미동정종으로 처리하였다. 출현종의 동정은 규조류는 Cox(1996), 남조류는 Akiyama *et al.*(1981), 와편모조류는 Abe(1981) 등의 문헌을 참고하였다.

식물플랑크톤의 정량분석을 위해 고정된 시료를 잘 혼합한 후 1 mL를 Sedgwick-Rafter Chamber에 넣고 5분 이상 안정시킨 후 광학현미경 200~400배(Nikon eclipse E600, Japan)에서 군체 또는 세포수를 계수하였다.

결과 및 고찰

1. 강우의 특성

한반도 몬순기의 특성은 연간 강수량의 50% 이상이 여름철 장마기에 집중되어 있으며, 여름철 장마는 2번의 집중호우가 뚜렷히 나타난다. Ha *et al.*(2005)는 장마의 시작은 6월 이후 강수량이 급격하게 증가하면서 일사량은 감소하는 시기를 종관적 장마 시작일로 정의한 바 있다. 이에 따라 강우가 급격하게 증가하는 시기인 6월 23일 이후를 장마의 시작일로 판단하였으며, 북한강 수계에서도 여름철 2번의 집중호우가 뚜렷하게 나타났다.

본 연구에서 조사지점인 북한강 수계에서 조사기간 동안 강수량은 평균 1,654 mm로 나타났으며, 몬순기에 내린 강수량은 평균 1,081 mm로 조사기간 동안의 강수량의 65%를 나타냈다. 몬순기에 내린 집중호우는 1차 집중호우 기간에 평균 약 499 mm의 강수가 내렸으며, 2차 집중호우 기간에 약 582 mm의 많은 양의 강수가 내려 의암호, 청평호, 팔당호 수체의 유입량 및 방출량에 큰 영향을 미쳤다. 실제로 하천으로 유입되는 인(P)과 질소(N)는 강우와 밀접한 관계를 보이고, 몬순 초기 집중 강우로 인하여 증가되는 비휘발성 현탁물(Non-volatile suspended)의 급격한 증가는 수체내에서 이온화되어 하천 및 호수의 이화학적 특성을 바꾼다는 보고가 있다(Perkins and Jones, 1994). 이처럼 강우로 인한 수체의 유입은 수계내 영양염류의 유입을 유도하여 호소의 부영양화를 초래할 수 있으며, 하절기에 식물플랑크톤의 대

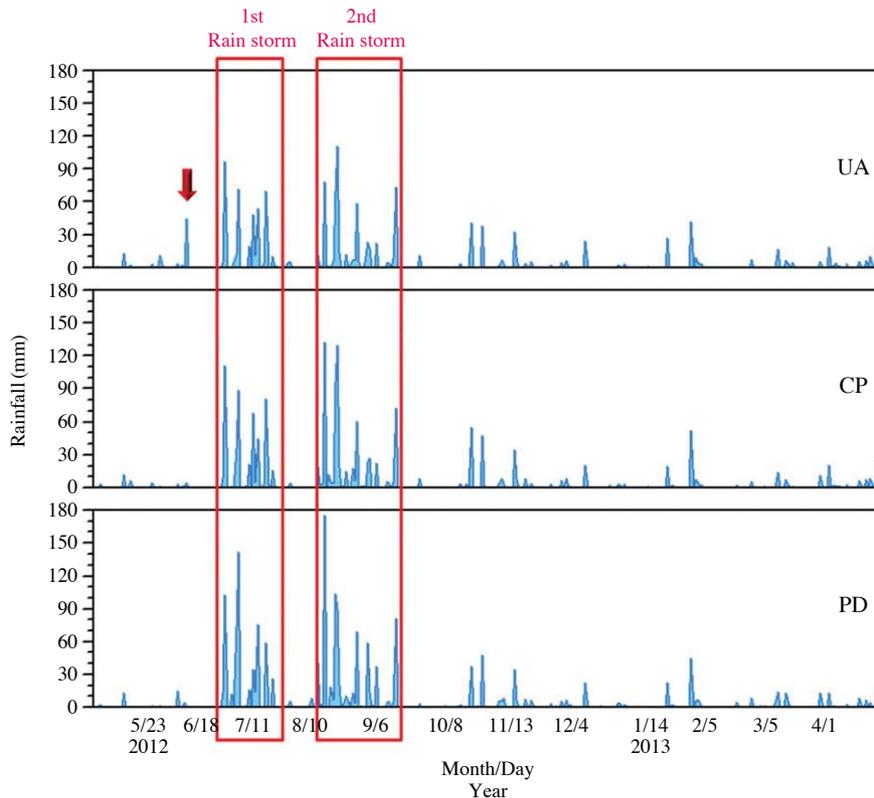


Fig. 2. A daily precipitations in three serial lakes in North Han River System from May 2012 to March 2013. Down-toward arrow in Lake Ui-Am is the first strong rainfall (> 45 mm) after drought. UA; Lake Ui-am, CP; Lake Chung-pyeong, PD; Lake Pal-dang.

규모 증식 현상이 나타날 수 있다. 특히 Reynolds (1987), Watson *et al.* (1997) 등의 연구결과에 따르면 하절기에는 양분 축적과 부력조절 기능을 가지고 있는 남조가 우점할 가능성이 높다는 보고가 있으며, 북한강 수계에서 역시 2012년 하절기에 남조인 *Anabaena* spp.가 대발생을 일으켰다.

2. 식물플랑크톤군집 동태

1) 의암호

조사기간 동안 의암호 총 강수량은 1,467 mm로써, 몬순기 동안 885 mm의 강수량을 보여 연간 총 강수량의 48%에 해당하였다(Fig. 2). 의암호 유역에는 청평호, 팔당호 유역과는 다르게 6월 12일에 45 mm의 갈수기 이후 첫 비가 내렸는데, 이 강수의 영향으로 의암호 수체 내에 갈수기 동안 토양에 축적되어 있던 유기물이 유입되었을 것으로 사료된다. 의암호의 수체는 춘천하수처리장의 방출수와 춘천시를 통과하며 국지적으로 오염이 심각한 공지천이 유입되기 때문에 영양염이 풍부하다 (Park *et al.*, 2004). 특히 도시하수에는 환원된 형태인

암모니아성 질소가 높은 농도로 존재하고, 인산염 인 또한 높은 농도로 존재하는 수체로 이러한 영양염의 유입은 식물플랑크톤이 성장하는데 큰 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 또한 의암호는 봄과 여름철에 수온이 낮은 소양강에 비해 비교적 수온이 높은 춘천댐 방류의 영향을 크게 받고, 일사량이 많은 기간으로 전체적으로 높은 수온의 수체 특성을 가져 남조인 *Anabaena* spp.가 성장하는데 좋은 조건을 형성하였을 것으로 판단된다 (Park *et al.*, 2013).

조사기간 동안 의암호에서 출현하였던 우점종은 2012년 5, 6월에 규조강인 *Fragilaria crotonensis*가 우점종으로 출현했던 수체에 6월부터 남조강인 *Anabaena* spp.가 출현하면서 7~10월까지 *Anabaena* spp.가 우점종으로 출현하였다. 이후 11, 12월에 다시 규조강인 *Aulacoseira italica*, *Fragilaria crotonensis*가 각각 우점종으로 출현하였고, 2013년 1월에 남조강인 *Phormidium mucicola*, 2월에는 갈색편모강인 *Cryptomonas ovata*가 일시적으로 우점종으로 출현하였으나, 다시 3, 4월에 규조강인 *Fragilaria crotonensis*, *Aulacoseira italica*가 각각 우점종으로 출현하였다 (Table 1).

Table 1. Dominant phytoplankton species and its abundance (%) in three serial lakes in North Han River System from May 2012 to March 2013.

Month	Lake Ui-am		Lake Chung-pyeong		Lake Pal-dang	
	DPS	cells mL ⁻¹ (%)	DPS	cells mL ⁻¹ (%)	DPS	cells mL ⁻¹ (%)
2012/5	<i>Fragilaria</i>	4,380 (91.4)	<i>Fragilaria</i>	1,420 (93.4)	<i>Cryptomonas</i>	120 (48.0)
6	<i>Fragilaria</i>	2,505 (38.2)	<i>Fragilaria</i>	1,802 (55.2)	<i>Aulacoseira</i>	612 (56.3)
7	<i>Anabaena</i>	43,850 (93.6)	<i>Anabaena</i>	3,106 (51.5)	<i>Anabaena</i>	2,128 (44.5)
8	<i>Anabaena</i>	13,504 (96.7)	<i>Anabaena</i>	31,648 (95.0)	<i>Anabaena</i>	7,136 (79.2)
9	<i>Anabaena</i>	776 (49.4)	<i>Aulacoseira</i>	316 (57.4)	<i>Chlamydomonas</i>	173 (31.4)
10	<i>Anabaena</i>	7,376 (75.2)	<i>Aulacoseira</i>	1,100 (71.9)	<i>Aulacoseira</i>	1,200 (64.9)
11	<i>Aulacoseira</i>	548 (90.7)	<i>Aulacoseira</i>	240 (36.1)	<i>Aphanizomenon</i>	1,696 (47.5)
12	<i>Fragilaria</i>	432 (90.0)	<i>Aulacoseira</i>	392 (61.3)	<i>Aulacoseira</i>	624 (67.2)
2013/1	<i>Phormodium</i>	376 (58.8)	<i>Cyclotella</i>	208 (46.4)	<i>Cyclotella</i>	224 (28.3)
2	<i>Cryptomonas</i>	696 (46.3)	<i>Asterionella</i>	640 (82.5)	<i>Asterionella</i>	208 (63.4)
3	<i>Fragilaria</i>	216 (79.4)	<i>Cyclotella</i>	224 (43.1)	<i>Cyclotella</i>	696 (47.3)
4	<i>Asterionella</i>	704 (67.7)	<i>Asterionella</i>	1,904 (71.0)	<i>Cyclotella</i>	1,612 (48.5)

DPS; dominant phytoplankton species

Anabaena; *Anabaena* spp., *Aphanizomenon*; *A. flos-aquae*, *Asterionella*; *A. formosa*, *Aulacoseira*; *A. italica*, *Chlamydomonas*; *C. globosa*, *Cryptomonas*; *C. ovata*, *Cyclotella*; *C. meneghiniana*, *Fragilaria*; *F. crotonensis*, *Phormodium*; *P. mucicola*

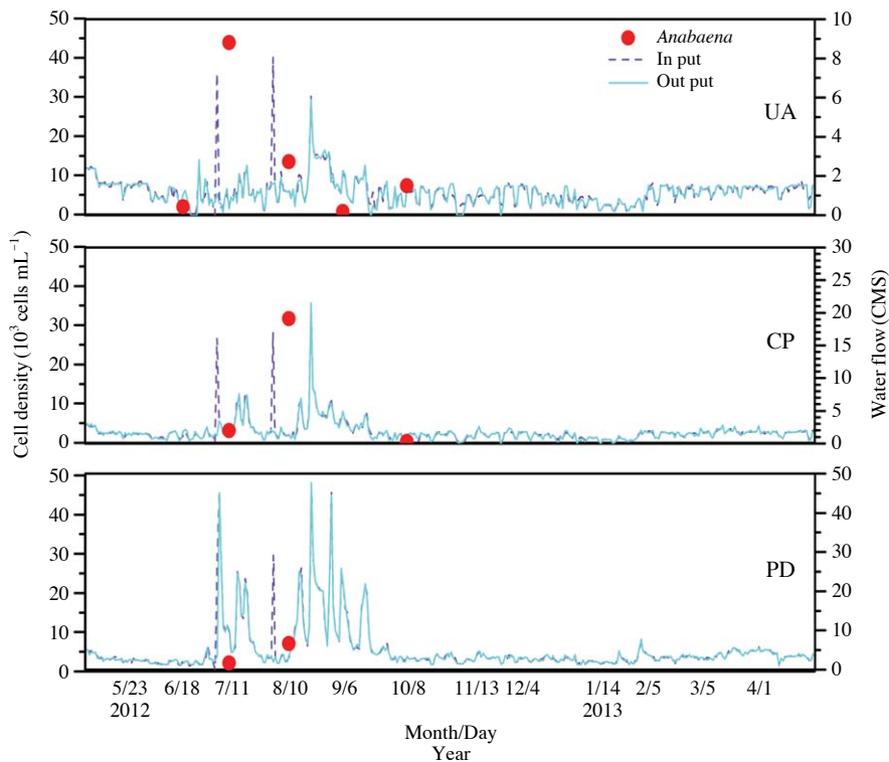


Fig. 3. Daily fluctuation of inflow and outflow and *Anabaena* spp. cell density of three serial lakes in North Han River System from May 2012 to March 2013. UA; Lake Ui-am, CP; Lake Chung-pyeong, PD; Lake Pal-dang.

의암호에서 식물플랑크톤은 7월에 46,858 cell mL⁻¹로 가장 높은 현존량이 출현하였으며, 그 중에 *Anabaena* spp.가 전체 현존량에 90% 이상(43,850 cells mL⁻¹)의 높은 비율로 차지했다(Fig. 4). 의암호에서 대발생을 일

으킨 *Anabaena* spp.는 6월에 처음 출현하였으며, 이는 청평, 팔당호 유역과 다르게 6월 12일에 갈수기 이후 첫 강우가 비교적 많은 양이 내림으로 인해 수체 내 유기물이 증가하여, *Anabaena* spp.가 빈번히 출현했던 공

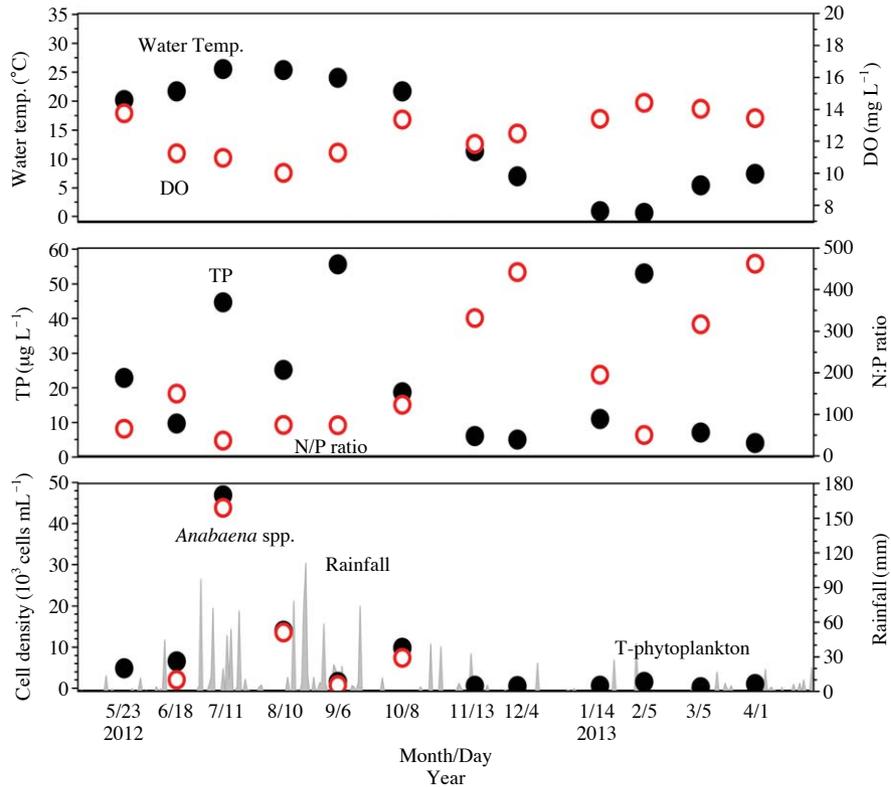


Fig. 4. Monthly fluctuation of water temperature, dissolved oxygen, total phosphorus, nitrogen : phosphorus ratio, total phytoplankton and *Anabaena* spp. cell density under daily precipitations in Lake Ui-am in North Han River System from May 2012 to March 2013.

지천과 중도선착장 지점에서 출현하였을 가능성이 높을 것으로 판단된다. 6월에 처음 출현한 *Anabaena* spp.는 7월에 peak를 보였는데, 이 지점은 중도 부근의 낮은 수심으로 인해 역류현상이 발생하여 체류시간이 증가하는 지점으로 연중 20일 이상의 체류시간을 보인다(Park *et al.*, 2013). 또한 부족한 수자원을 확보하기 위해 7월 1차 집중호우기간에 유입된 수체를 방류하지 않으면서 체류시간이 증가하여 수체내 영양염이 농축된다. 실제로 *Anabaena* spp.가 대발생을 일으켰던 7월에 TP가 조사기간 중 가장 높은 농도로 나타나 질소(N)를 고정하는 *Anabaena* spp.의 성장에 영향을 주었을 것으로 판단된다.

이후 *Anabaena* spp.는 8월에 급격히 현존량이 감소하였는데, 이는 집중호우로 인하여 영양염 및 조류 밀도가 희석효과에 의해 낮아지고, 비교적 저수용량이 적은 의암호에서 댐 방류가 빈번히 일어나면서 Flushing 효과를 일으키고 물의 흐름이 빨라져 수중에 존재하던 조류가 쓸려내려가 증식하지 못하기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 3). 이후 *Anabaena* spp.는 8월에 급격히 현존량이 감소하였는데, 이 역시 계속되는 집중호우로 인한

희석효과에 의해 *Anabaena* spp. 및 영양염이 희석되면서 현존량 감소가 나타난 것으로 보인다. 9월 또한 *Anabaena* spp.가 계속하여 감소하였는데, 이는 몬순기 두번째 peak의 강우에 의해 9월 현존량이 급격히 감소하였으며, 10월에 장마가 끝나고 수체가 안정됨에 따라 일시적인 증가를 보였다가 11월부터 *Anabaena* spp.가 출현하지 않았다.

2) 청평호

조사기간 동안 청평호의 총 강수량은 1,677 mm로써 몬순기 동안 905 mm로 연간 총 강수량의 54%에 해당하였다(Fig. 2). 청평호의 경우 많은 지역의 유로를 차단하여 형성된 대표적인 하천형 호수(Stream-lake hybrid)로 댐의 유입 및 유출량의 영향을 많이 받으며, 유역의 강우와 오염물질의 부하에 의하여 직접적인 영향을 받는다는 특징이 있어 상류 댐에서 방류한 수체에 영향을 많이 받는다(Jeon *et al.*, 2012).

청평호에서 식물플랑크톤 군집의 변화는 2012년 5, 6월에 규조강인 *Fragilaria crotonensis*가 우점종으로 출

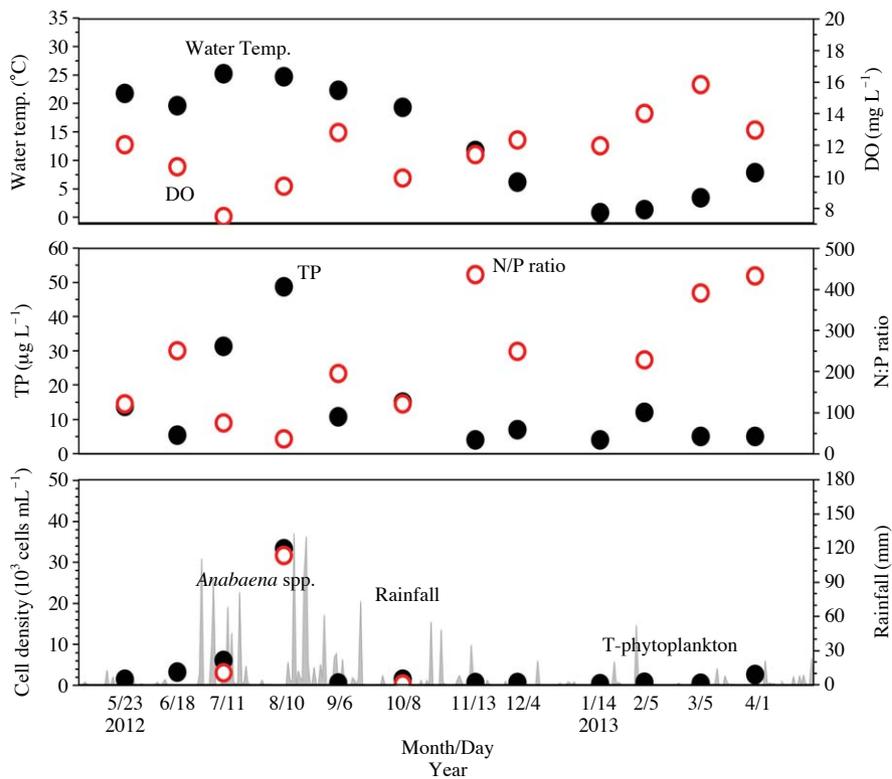


Fig. 5. Monthly fluctuation of water temperature, dissolved oxygen, total phosphorus, nitrogen : phosphorus ratio, total phytoplankton and *Anabaena* spp. cell density under daily precipitations in Lake Chung-pyeong in North Han River System from May 2012 to March 2013.

현하였고, 7월에 남조강인 *Anabaena* spp.가 출현하여 7, 8월 *Anabaena* spp.가 우점종으로 출현하였다. 이후 9~12월까지 규조강인 *Aulacoseira italica*가 우점종으로 출현하였고, 2013년 1~4월까지 규조강인 *Cyclotella meneghiniana*, *Asterionella formosa*가 우점종으로 출현하였다 (Table 1).

청평호에서 식물플랑크톤은 8월에 $33,312 \text{ cells mL}^{-1}$ 로 가장 높은 현존량을 보였으며, *Anabaena* spp.가 전체 현존량에 90% 이상 ($31,648 \text{ cells mL}^{-1}$)의 높은 비율로 차지했다 (Fig. 5). 청평호에서 대발생을 일으킨 *Anabaena* spp.는 의암호와 달리 7월에 처음 출현하였으며, 이는 청평호의 상류인 의암호에서 방류된 수체에 의해 청평호에 유입되었을 것으로 예상된다 (Fig. 3). 청평호에서 대발생한 *Anabaena* spp.는 1차 집중호우 시기에 대발생을 일으켰던 의암호의 *Anabaena* spp.가 Flushing 효과로 쓸려내려온 수체가 청평호에 유입되면서 처음 발생하였고, 유입된 수체가 방출되지 않으면서 지속적인 의암호의 *Anabaena* spp. 유입 및 체류시간 증가로 인한 영양염 농축 등의 영향으로 *Anabaena* spp.가 성장하기 좋은 조건을 형성하면서 청평호에서 8월에 대발생을 일으

킨 것으로 사료된다. 대발생을 일으킨 *Anabaena* spp.는 9월에 소멸하여 출현하지 않았는데, 이 역시 의암호와 같이 2차 집중호우로 인해 유량이 증가하면서 발생한 희석효과와 수문의 개방으로 인해 발생한 Flushing 효과로 사멸된 것으로 판단된다 (Ward and Stanford, 1983). 이후 *Anabaena* spp.는 10월에 적은양이 출현하였다가 11월에 소멸하였으며, 10월에 출현한 *Anabaena* spp. 또한 의암호에서 유입된 것으로 사료된다.

3) 팔당호

조사기간 동안 팔당호의 총 강수량은 1,819 mm로 나타났다. 몬순기 동안에 1,042 mm로 총 강수량의 57%를 나타냈다 (Fig. 2). 팔당호의 경우 의암호, 청평호보다 큰 유역면적과 유량을 가지고 있으며, 북한강 수계뿐 아니라 남한강 수계의 유입에도 많은 영향을 받는다는 특성이 있다.

팔당호에서 식물플랑크톤은 의암호, 청평호에 비해 종의 천이가 빈번하게 일어났다. 2012년 5월에 갈색편모강인 *Cryptomonas ovata*가 우점종으로 출현하였고, 6월에 일시적으로 규조강인 *Aulacoseira italica*가 우점종으

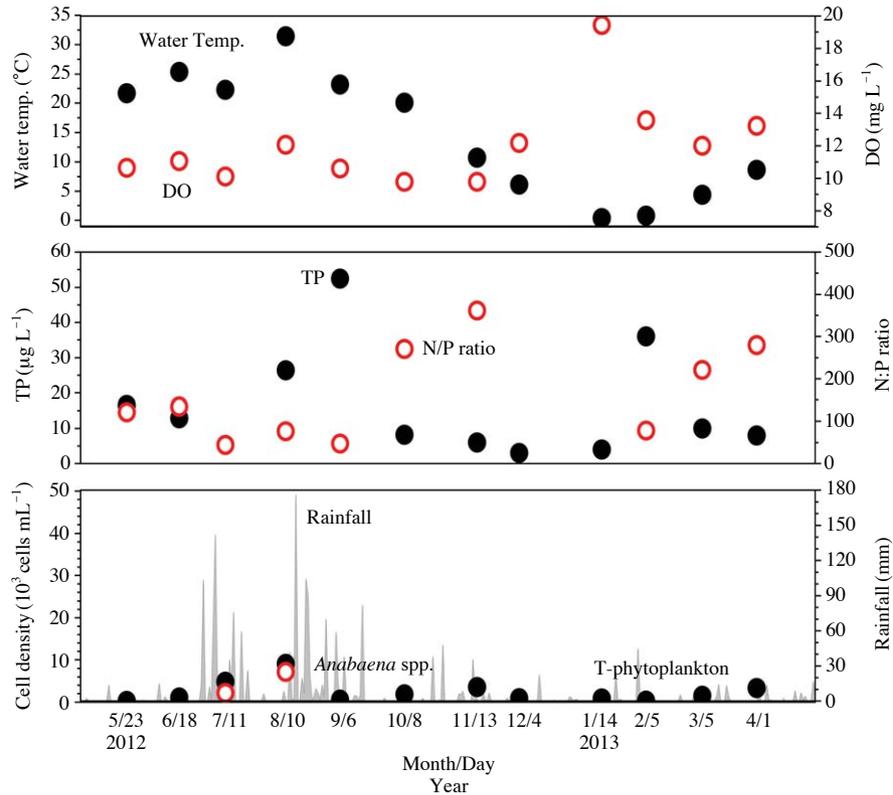


Fig. 6. Monthly fluctuation of water temperature, dissolved oxygen, total phosphorus, nitrogen : phosphorus ratio, total phytoplankton and *Anabaena* spp. cell density under daily precipitations in Lake Pal-dang in North Han River System from May 2012 to March 2013.

로 출현했으나, 7월 남조강인 *Anabaena* spp.가 출현함으로써 7, 8월에 *Anabaena* spp.가 우점종으로 출현하였다. 이후 9월에 녹조강인 *Chlamydomonas globos*, 10월에 규조강인 *Aulacoseira italica*, 11월에 남조강인 *Aphanizomenon flos-aquae*, 12월에 *Aulacoseira italica*가 각각 우점종으로 출현하였으며, 2013년 1~4월까지 규조강인 *Cyclotella meneghiniana*, *Asterionella formosa*가 우점종으로 출현하였다(Table 1).

팔당호에서 또한 청평호와 같이 8월에 9,008 cells mL⁻¹로 가장 높은 식물플랑크톤 현존량을 보였으며, *Anabaena* spp.가 전체 현존량의 75% 이상(7,136 cells mL⁻¹)의 비율을 차지하였다(Fig. 6). 팔당호 또한 *Anabaena* spp.의 거동이 청평호와 유사한 패턴을 나타내었다. 그러나 팔당호의 경우는 의암호나 청평호에 비해 낮은 현존량 수준을 보였는데, 이는 팔당호가 의암호, 청평호에 비해 비교적 유량이 많고, 1차 집중호우 시 유입된 수체를 저장하지 않고 방류하였기 때문으로 판단된다(Fig. 3). 또한 팔당호는 북한강 수계뿐 아니라 남한강 수계나 경안천 등이 유입되어 수체에 많은 영향을 미치기 때문

에 의암호나 청평호에 비해 비교적 *Anabaena* spp.의 현존량이 낮았던 것으로 판단된다(Han *et al.*, 1995; kim, 1998). 이후 *Anabaena* spp.는 의암호, 청평호에서와 같이 8월에 내린 몬순기 두번째 강우에 의한 희석효과 및 Flushing 효과에 의해 *Anabaena* spp.가 소멸된 것으로 판단된다.

3. 식물플랑크톤과 수질과의 상관성

영양염 제한성 여부를 판단하는 기준이 되는 현장의 N/P ratio에서 보면 한국 호소의 N/P 비의 경우 보통 100 정도로 인(P)이 제한요소로 작용하며(Hecky and Kilham, 1988; Kim *et al.*, 1997; Seo *et al.*, 2003), 조사지점 역시 TN/TP비가 100 이상의 높은 인(P) 제한 수체로 나타났다. 이러한 수체에서 인의 증가는 식물플랑크톤의 성장을 결정하는 중요한 요소로서 작용하였을 것으로 사료된다. 실제로 남조류가 번성하는 부영양 수체에서 TN/TP ratio가 30 이하로 나타나는 경우가 많았으며(Smith, 1983; Smith *et al.*, 1987), 외부 혹은 퇴적물로부터 인의

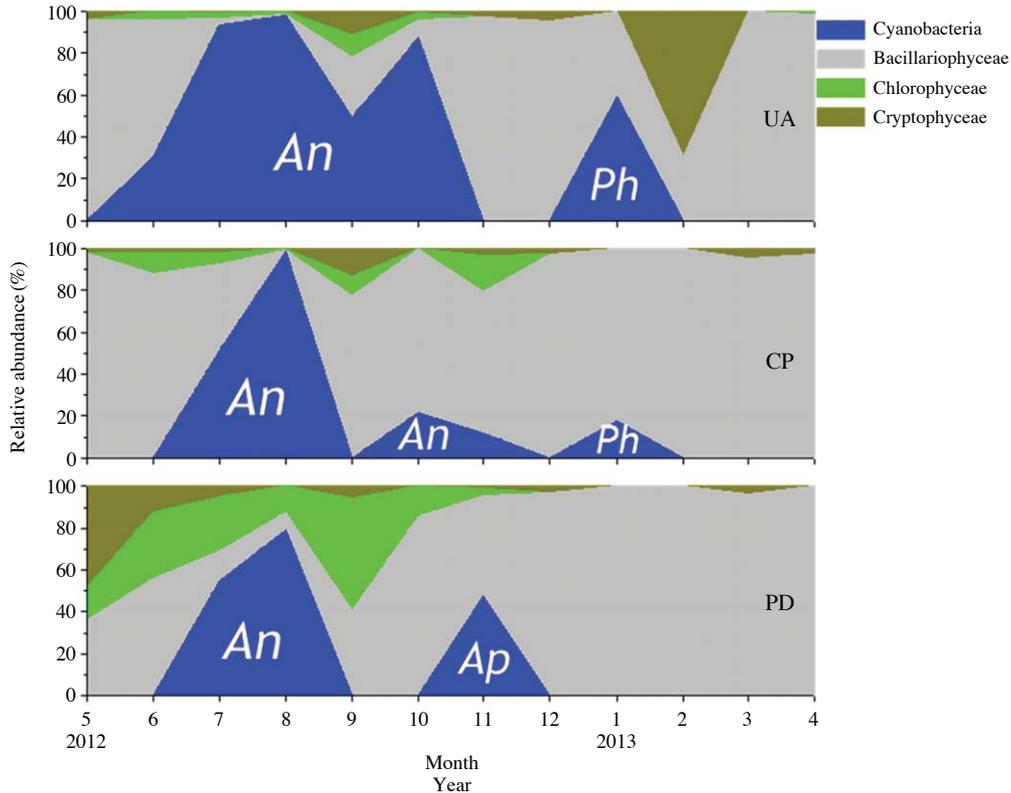


Fig. 7. Monthly fluctuation of relative abundance of phytoplankton in three serial lakes of North Han River System from May 2012 to March 2013. UA; Lake Ui-am, CP; Lake Chung-pyeong, PD; Lake Pal-dang. An: *Anabaena* spp., AP: *Aphanizomenon flos-aquae*, Ph: *Phormidium mucicola*.

공급량 증가로 인한 TN/TP ratio의 감소는 남조류의 발달에 중요한 원인이 된다 (Trimbee and Prepas, 1987; Sheffer *et al.*, 1997). 조사 정점들 역시 강우로 인해 국지적으로 오염된 수체가 의암호로 유입되어 인이 증가되는 시기와 *Anabaena* spp.가 출현한 시기가 일치하였으며, 이는 의암호를 비롯한 청평호, 팔당호 모두 비슷한 경향을 나타내었다. 한강수계에서 연속적인 인공댐이 하천의 이화학적 수질은 하천 구조변경에 의한 수질변화보다는 유입지천과 하천 유역의 점오염원으로부터 유입되는 방류수가 이화학적 수질 변화에 더욱 크게 영향을 미친다는 보고가 있는데 (Jeon *et al.*, 2012), 조사 정점 중 가장 상류에 있는 의암호에서 증가한 인이 청평호와 팔당호로 유입되면서 *Anabaena* spp.가 성장하는데 도움을 주었을 것으로 사료된다.

조사기간 동안 식물플랑크톤 종조성의 변화는 몬순기 전인 5, 6월에 의암, 청평호에서 규조강이 높은 비율을 차지하였고, 팔당호의 경우는 갈색편모강과 규조강, 녹조강이 고루 분포했다 (Fig. 7). 몬순기인 7~8월에는 의암, 청평, 팔당호 모두 남조강인 *Anabaena* spp.가 월등히

높은 비율로 차지하였으며, 이 시기에 현존량 또한 월등히 높았다. 몬순기 이후 의암호의 경우는 몬순기에 이어 9, 10월에도 남조강이 높은 비율로 차지하였고, 1월에 남조강, 2월에 갈색편모강이 높은 비율로 나타났고, 나머지 기간에는 모두 규조강이 높은 비율을 차지하였다. 청평호에서는 몬순기 이후에 모두 규조강이 높은 비율을 차지하였다. 팔당호에서는 팔당, 청평호와 다르게 9월에 남조강, 11월에 남조강이 높은 비율로 나타났고, 나머지 기간에는 모두 규조강이 높은 비율을 차지하였다.

의암호에서 발생한 강우와 각 요인과의 상관관계에 대해 살펴보면 댐의 유입량 ($r=0.68$) 및 식물플랑크톤 ($r=0.71$), *Anabaena* spp. 현존량 ($r=0.72$), 부유물질 (SS) ($r=0.72$) 등과 높은 양의 상관관계로 나타났고, 용존산소 (DO) ($r=-0.84$)는 높은 음의 상관관계로 나타나 강우가 식물플랑크톤 및 *Anabaena* spp. 현존량에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다 (Table 2).

청평호에서 발생한 강우는 댐의 유입량 ($r=0.92$), 방출량 ($r>0.88$), 식물플랑크톤 ($r>0.86$) 및 *Anabaena* spp. 현존량 ($r=0.83$), 총인 ($r=0.93$), COD ($r=0.90$) 등과 높

Table 2. Pearson's correlation coefficients between biological and physicochemical variables in three serial lakes in North Han River System from May 2012 to March 2013.

Variables	Lake Ui-am		Lake Chung-pyeong		Lake Pal-dang	
	Rainfalls	ANA	Rainfalls	ANA	Rainfalls	ANA
In put	0.667*	0.259	0.915**	0.831**	0.938**	0.807**
Out put	0.549	0.120	0.882**	0.823**	0.926**	0.792**
Temperature	0.706*	0.532	0.668*	0.408	0.678*	0.540
pH	0.592*	0.613*	0.452	0.599*	0.121	0.317
Dissolved oxygen	-0.835**	-0.492	-0.684*	-0.396	-0.253	-0.142
Suspended solids	0.716**	0.702*	0.414	0.301	0.390	0.179
Total phosphorus	0.411	0.381	0.933**	0.868**	0.632*	0.276
Total nitrogen	-0.081	-0.281	0.019	-0.144	0.238	-0.011
COD	0.534	0.529	0.896**	0.786**	0.550	0.523
ANA	0.722**		0.831**		0.880**	
TAP	0.705*	0.993**	0.862**	0.994**	0.839**	0.942**
Chlorophyll <i>a</i>	0.701**	0.669**	0.749**	0.795**	0.778**	0.537

ANA; *Anabaena* spp.

TAP; Total abundance of phytoplankton

COD; Chemical oxygen demand

*, P<0.05, **, P<0.01

은 양의 상관관계로 나타났으며, 용존산소($r=-0.69$)는 높은 음의 상관관계를 나타냈다. 또한, 유입, 방출량은 총인($r=0.89$), 식물플랑크톤($r=0.83$) 및 *Anabaena* spp. 현존량($r=0.82$) 등과 매우 높은 상관관계를 나타냈고, 총인 역시 식물플랑크톤($r=0.88$) 및 *Anabaena* spp. 현존량($r=0.87$)과 매우 높은 상관관계로 나타나 결과적으로 강우로 인해 유입, 방출되는 수체의 양과 인의 농도가 *Anabaena* spp.의 거동과 관계가 있는 것으로 나타났다.

팔당호의 강수 또한 유입량($r=0.94$), 방출량($r=0.93$), 식물플랑크톤($r=0.88$) 및 *Anabaena* spp. 현존량($r=0.84$), 총인($r=0.63$) 등과 높은 상관관계를 나타냈으며, 유입, 방출량은 총인($r>0.63$), 식물플랑크톤($r=0.75$) 및 *Anabaena* spp. 현존량($r=0.81$)과 매우 높은 상관관계를 나타냈다. 이와 같은 결과는 강우로 인해 유입, 방출되는 수체의 양과 인의 농도가 *Anabaena* spp.의 거동에 영향을 주는 중요한 요소임이 확인되었다.

동안 가장 높은 현존량을 보였던 남조 *Anabaena* spp.는 의암호에서 2012년 6월에 출현하여 7월에 최고치($43,850$ cells mL^{-1})를 보이고 높은 수준을 유지하다가 11월에 소멸되었다. 이에 비해 청평호($31,648$ cells mL^{-1})와 팔당호($7,136$ cells mL^{-1})에서는 공히 7월에 처음 출현하여 8월에 최고치를 보이다가 9월에 완전히 사라졌다. 수환경과 남조 *Anabaena* spp. 현존량과의 관계를 보면, 3개 저수지 모두 강우($r=0.72$, $r=0.83$, $r=0.88$, $P<0.01$ for all)를 비롯한 유입량, 유출량 및 영양염에 대하여 높은 상관성을 나타냈다. 따라서 2012년 봄철 갈수기 동안 북한강 수계 3개 저수지에서 일어난 *Anabaena* 대발생 및 소멸은 강우의 직, 간접적인 영향을 받았으며, 의암호는 강우 이후에도 상당기간 동안 다른 남조류가 비교적 높은 현존량을 유지하고 있어 상수원 저수지의 이취미 및 독소발생 가능성은 지속될 것으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 2012년 한강수계 환경기초조사사업의 일환으로 수행되었으며, 현장조사를 도와주신 박채홍, 이가람 군에게 심심한 감사를 드립니다.

REFERENCES

- APHA. 2005. Standard methods for the examination of water and wastewater, 19th ed., APHA-AWWA-WEF, Washing-

적 요

2012년 5월부터 2013년 4월까지 북한강 수계 3개의 연속댐(의암호, 청평호, 팔당호)의 수리-수문, 수질 및 식물플랑크톤 현존량 등을 월 1회씩 총 12회에 걸쳐 조사하였다. 3개 저수지의 식물플랑크톤 군집은 몬순전기에는 돌말류, 몬순기에는 남조류, 몬순후기에는 다시 돌말류가 우점하는 계절성을 보였으며, 팔당호에서는 몬순후기 저온기에 녹조류가 높은 밀도를 나타냈다. 조사기간

- ton D.C., USA.
- An, K.G. and J.R. Jones. 2000. Temporal and spatial patterns in ionic salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **436**: 179-189.
- Ha, K.J., K.S. Yun, J.G. Jhun and C.K. Park. 2005. Definition of onset/retreat and intensity of changma during the boreal summer monsoon season. *Journal of the Korean Meteorological Society* **41**(6): 927-942.
- Han, M.S., Y.Y. Auh, J.K. Ryu, K.I. Yoo and Y.K. Choi. 1995. Ecological studies on Pal'tang river-reservoir system in Korea 2. Changes in phytoplankton community structure. *Korean Journal of Limnological Society* **28**(3): 335-344.
- Havens, K.E. 2008. Cyanobacteria blooms: effects on aquatic ecosystems. In: Hudnell KH (ed). *Cyanobacterial Harmful Algal Blooms: State of the Science and Research* Springer: New York. **619**: 675-732.
- Havens, K.E. and W.W. Walker. 2002. Development of a total phosphorus concentration goal in the TMDL process for Lake Okeechobee, Florida (USA). *Lake and Reservoir Management* **18**: 227-238.
- Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments : A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnology and Oceanography* **33**: 796-822.
- Jeon, H.W., J.W. Choi and K.G. An. 2012. Spatio-temporal water quality variations at various streams of Han-river watershed and empirical models of serial impoundment reservoirs. *Korean Journal of Limnological Society* **45**(4): 378-391.
- Jone, J.R., M.F. Knowlton and K.G. An. 1997. Developing a paradigm to study and model the eutrophication process in Korean reservoirs. *Korean Journal of Limnological Society* **30**(Special Issue): 463-471.
- Kim, B.C. and Y.H. Kim. 2004. Phosphorus cycle in a deep reservoir in Asian monsoon area (lake Soyang, Korea) and the modeling with a 2-D hydrodynamic water quality model. *Korean Journal of Limnological Society* **37**(2): 205-212.
- Kim, Y.J. 1996. Ecological study of phytoplankton community and trophic states using indicators in lake paltang. *Korean Journal of Limnology Society* **19**(4): 323-345.
- Li, Z., M.S. Han, S.O. Hwang, M.S. Byeon, S.J. Hwang and B.H. Kim. 2012. Molecular identification of the bloom-forming cyanobacterium *Anabaena* from North Han river system in Summer. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**(2): 301-309.
- Murrell, M.C. and E.M. Loes. 2004. Phytoplankton and zooplankton seasonal dynamics in a subtropical estuary: importance of cyanobacteria. *Journal of Plankton Research* **26**: 371-382.
- 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, S.W., H.W. Lee, Y.S. Lee and S.S. Park. 2013. A hydrodynamic modeling study to analyze the water plume and mixing pattern of the Euiam. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**(4): 488-498.
- Perkins, B. and J.R. Jones. 1994. Temporal variability in a Mid-western stream during spring. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* **25**: 1471-1476.
- Reynold, C.S. 1987. Cyanobacterial Water-blooms. *Advances Botanical Research* **13**: 67-143.
- Seo, J.K., J.J. Yu, J.J. Lee, S.Y. Yang and I.K. Chung. 2003. Phytoplankton community dynamics and evaluation of trophic state in the lake Unmoon. *Algae* **18**(2): 135-148.
- Seo, M.Y., B.H. Kim and K.S. Bae. 2007. Fluctuation of environmental factors and dynamics of phytoplankton communities in lower part of the Han river. *Korean Journal of Limnological Society* **40**(3): 395-402.
- Sheffer, M., S. Rinaldi, A. Grangnani, L.R. Mur and E.H. Nes. 1997. On the dominance of filamentous cyanobacteria in Shallow. *Turbid lakes. Ecology* **78**: 272-282.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Science* **221**: 669-671.
- Smith, V.H., E. Willen and B. Karlsson. 1987. Predicting the summer peak biomass of four species of blue-green algae (cyanophyta/cyanobacteria) in Swedish lakes. *Water Resources Bulletin* **23**: 397-402.
- Soranno, P.A. 1997. Factors affecting the timing of surface scums and epilimnetic blooms of blue-green algae in a eutrophic lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **54**: 1965-1975.
- Tirimbee, A.M. and E.E. Prepas. 1987. Evaluation of total phosphorus as a predictor of the relative biomass of blue-green algae with emphasis on Alberta lake. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **44**: 1337-1342.
- Ward, J.V. and J.A. Stanford. 1983. Serial discontinuity concept of lotic ecosystems. In: Fontaine, T.D. and S.M. Bartell (eds) *Dynamics of lotic systems*. Ann Arbor Science, Ann Arbor, pp. 29-42.
- Watson, S.B., E. McCauley and J.A. Downing. 1997. Patterns in phytoplankton taxonomic composition across temperate lakes of differing nutrient status. *Limnology and Oceanography* **42**: 487-495.
- Yunes, J.S., N.T. Cunha, L.A.O. Proença, L.P. Barros and J.M. Monserrat. 2003. Cyanobacterial neurotoxins from Southern Brazilian freshwaters. *Comments Toxicol* **9**: 103-115.