

의암호 남조류 발생 제어를 위한 수질 장기모니터링 및 환경요인 분석

이석종 · 임병찬 · 이건호 · 정원구 · 허범녕 · 허인량[†]

강원도보건환경연구원

Long Term Monitoring for the Control of Cyanobacterial Blooms in Lake Uiam

Seog-Jong Lee, Byung-Chan Lim, Geon-Ho Lee, Won-Gu Jeong, Beom-Nyung Hur, and In-Ryang Hur[†]

Gangwon Institute of Health and Environment, Gangwon-do 24203, Korea

Received April 26, 2016/Revised May 19, 2016/Accepted June 7, 2016

We monitored the water quality and algal communities to analyze the environmental factors that contributed to the development of cyanobacterial blooms in lake Uiam from 2012 to 2015. *Anabaena* species were isolated as the dominant type of cyanobacteria in the lake, and these were first observed at sites S6~S9 from June to July. The total phosphorus (T-P) concentration was estimated at 0.015 mg/L in 2015 and 0.043 mg/L in 2011, which represents a reduction of 65%. Hence, the N/P ratios in the lake also changed, i.e., the ratios were 110~130 in 2014~2015, and 40~70 in 2010~2013. The daily loads of T-P were reduced 5.3 kg/d and 8.8 kg/d in 2014 and 2015, respectively, which were better loading rates than the value of 23.0 kg/d and 16.6 kg/d in 2012 and 2013, respectively. Algae blooms did not occur in Lake Uiam during 2014 to 2015. According to our analysis of critical environmental conditions, blooms will readily occur when N/P ratios are 20~30 and water temperatures are maintained at 20~25°C over a period of 30 days; moreover, 50~60 mm of precipitation is needed from the middle of June to early July.

Key words: Cyanobacterial bloom, Uiam lake, Load amounts of pollutants, Optimum N/P ratio

1. 서 론

의암호는 북한강 수계 상류에 위치해 있으며, 총 저수량 약 8천만 톤, 평균 체류 시간 약 7.7일의 하천형 호수이다. 또한, 춘천호와 소양호 방류 형태에 따라 이 화학적 수질 및 수체의 공간적 변화는 달라진다.¹⁾ 의암호에서 남조류 대량 발생은 2010~2013년 반복적으로 매년 발생하였으며, 의암호 녹조 문제를 해결하고자 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다. 최근의 연구 결과로부터 의암호 남조류 발생의 메커니즘이 서서히 밝혀지고 있으나, 아직까지 의암호 남조류 발생 예측 및 대응을 위한 현장에서 쉽게 판단하고 신속히 대응할 수 있는 예측 기법은 제공되지 않고 있다. 한편, 막대한 예산

을 투입하고도 수질개선 효과가 나타나지 않는다는 우려도 제기되고 있어²⁾ 그간 정책의 방향을 검토할 필요가 있다. 일반적으로 알려진 남조류 발생의 주요 원인으로 호소의 수심, 형태와 기울기, 수온과 성층, 퇴적층, 물의 운동을 포함하는 호소 구역의 형상이 관여하며, 또한 질소와 인 등 수질의 화학적 특성이 관여하는 것으로 알려져 있다. 한편, 대발생된 조류는 일조량 감소, Flush out 효과 그리고 수체로 유입되는 인이 감소될 경우 사라진다고 알려져 있다.³⁾ 최근 의암호 연구에 따르면 남조류 발생은 수온 및 인의 농도와 양의 상관관계를 가지며, 총질소(TN)/총인(TP) 비율과 음의 상관관계를 갖는다 하였다.⁴⁾ 또한, 춘천댐과 소양댐의 방류량 그리고 강우가 남조류 발생에 영향을 미치며, 춘천하수처리장의

[†]To whom correspondence should be addressed.

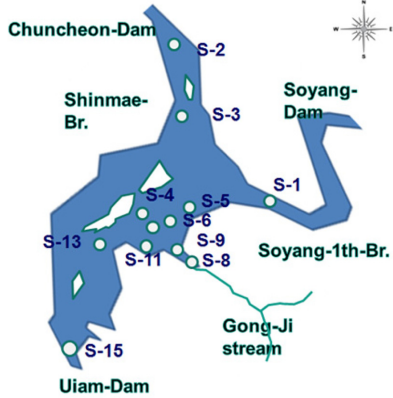


Fig. 1. Location map for the research conducted at Lake Uiam.

배출수와 공지천 유입 후 정체지점에서 영양염이 축적되어 남조류 발생 우심지역이다 라고 하였다.⁵⁾ 한편, 의암호에서 2012년 이후 매년 반복되던 유해 남조류의 대발생은 2014~2015년 2년 연속 관찰되지 않았다. 지금까지 미 발생의 원인에 대해서는 명확하지 않으나, 이 결과는 그간 의암호에서 남조류 대발생을 일으키는 환경인자의 변화가 진행되었고, 그 변화된 환경인자가 남조류 발생을 억제한 것으로 사료된다. 따라서 의암호 남조류 발생이 심했던 기간과 발생이 없었던 기간의 환경요인 및 수질변화 등을 비교 평가함으로써, 의암호 남조류 발생의 원인 및 제어 방법을 모색하고자 하였다. 따라서 본 연구에는 최근 2014년과 2015년의 남조류 대량 발생이 일어나지 않은 원인을 추적하고, 2012~2013년 남조류 발생 시기의 자료를 비교 평가하여 의암호에서 신속히 적용할 수 있는 남조류 제어 기법을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사기간 및 조사지점

의암호에서 남조류 발생은 2010년부터 매년 발생한 것으로 기록되어있으나, 체계적인 연구가 시작된 것은 2012년부터이다. 따라서 의암댐 대표지점(S15)에 대한 수질조사는 2010년부터 조사한 결과를 이용하였으며, 2012년부터는 의암호 대표지점과 함께 남조류 발생 우려 지점에 대한 지점별 조사를 2015년까지 실시하였다. 의암호 수질을 평가하는 지점으로 소양호 유입수 지점(S1), 춘천호 유입 지점(S2), 신매대교(S3), 소양호 합수 지점

(S4)을 선정하였고, 조류 발생 빈번한 지점으로 상중도 배터(S5), 춘천시 오수처리장 방류수 영향지점(S6), 공지천 유입지점(S8), 공지천으로부터 유입되는 비점오염원이 의암호와 합류하는 지점(S9), 수체정체지점(S11) 그리고 의암호 유역의 말단부인 의암댐 앞(S15) 지점 등 총 12개소를 선정하였다. 의암댐 앞(S15) 지점에 대해서는 1회/주 시료를 채수하였고, 그 외 지점에 대해서는 수온이 20°C에 근접하여 초기 남조류 발생 징후가 포착되는 5~8월에 집중적으로 조사를 실시하였다. 또한 의암호에서 남조류 발생 우려 지점인 S6와 S9 지점에서는 남조류 초기 발생 메커니즘을 밝히기 위해 5월 이후 하절기에 집중 시료를 채수하였고, 이화학적 수질 분석과 함께 남조류 발생 현황을 조사하였다.

2.2. 수질 분석항목 및 질소/인 비율 선정

현장측정 항목 중 수온은 디지털 수온계를 사용하여 측정하였고, 용존산소(DO)는 YSI 58(YSI, USA)을 사용하여 현장에서 측정하였다. 그 외 pH와 전기전도도는 각각 수소이온농도 측정기(Orion, 3-stare)와 전기전도계(Orion, model 142)를 사용하여 측정하였다. 유기물 및 영양염류 분석 항목으로 화학적 산소요구량(COD_{Mn}), 총질소(T-N), 질산성질소(NO₃-N), 암모니아성질소(NH₃-N), 인산염인(PO₄-P) 그리고 총인(T-P) 등 10개 항목에 대해 분석을 실시하였다. 그중 T-N 분석은 Cadmium copper reduction method에 따라 농도를 측정하였고, T-P 분석은 Standard methods의 Ascorbic acid method를 이용하였으며, 이후 흡광도를 측정하여 농도를 측정하였다. 그 외 수질항목은 수질오염공정시험기준에⁶⁾ 준하여 측정하였다. 이화학적 수질분석 결과를 이용 우심지점에서 남조류 발생을 일으키는 최적 질소/인 비율(N/P ratio)을 산정하였고, 그와 관련된 총인 및 총질소의 변화에 주목하였다.

2.3. 식물성플랑크톤 분석 및 조류 종 분류

의암호에서의 조류 천이를 밝히기 위해 2014년 1~12월까지 매월 4회(주 1회) 측정하였으며, 그 조사 결과를 토대로 월별 조류 발생 현황 및 규조류, 녹조류 그리고 남조류의 발생 시기 및 계절별 천이과정을 관찰하였다. 조류 현존량 조사와 함께 클로로필-a 분석을 실시하였다. 실험방법은 시료 250 mL를 GF/F로 감압여과 한 후 95% acetone 10 mL를 넣고 어두운 곳에서 하룻밤 방치하였고, 이후 흔들어 마쇄한 후 500g 원심력으로 20분간 원심분리하였다. 전처리한 시료를 이용 UV 663,

645, 630 및 750 nm에서 흡광도를 측정하였다. 또한, 채취한 시료에서 담수 조류 중 분류를 위해 현미경 검경(Nikon Ni2, Japan)을 실시하였다. 정성 및 정량분석을 위해 시료 500 mL에 Lugol solution을 가해 식물성 플랑크톤을 고정시킨 후 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 개체 수를 계수하였다.

2.4. 질소 및 인 성분 오염부하량 조사 및 평가

하천으로 유입되는 인과 질소는 강우와 밀접한 관계를 보인다.⁷⁾ 의암호로 유입되는 주요 영양염은 강우 시 공지천으로부터 유입되는 질소 및 인 성분과 주요 하수처리장의 방류수를 들 수 있다. 따라서 총 강수량과 함께 여름철 발생하는 강우 형태 분석을 위해 기상청 기상자료를 이용하였으며, 또한 의암호로 직접 유입되는 하수처리장의 질소 및 인 성분의 배출부하량 평가를 위해 강원도보건환경연구원 분석 자료와 춘천시 오수처리 시설 자체 측정 자료를 이용하여 평가하였다. 하수처리장에서의 배출부하량은 농도와 평균 방류량을 이용하여 산정하였다.

2.5. 춘천호 및 소양호 수문 자료 평가 및 기상자료

의암호 남조류 예측 및 제어에 있어 강우량과 댐 수문 현황 평가는 필수적이다. 집중강우는 수온, 성층형상 그리고 영양염의 공간적 변화를 발생시키고⁸⁾, 춘천호 및 소양호의 방류량 변동은 의암호의 수질 및 수체에 영향을 주기 때문이다. 따라서 연구 기간 동안 두 댐의 방류량 변화에 따라 의암호에서의 수질 및 남조류 발생과의 영향을 평가하기 위해 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)의 수문 자료를 사용하였다. 연구 기간 동안 의암호 유역의 강수량 분석을 위해 기상청 기상자료를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 남조류 대량 발생 현황 및 의암호 조류 천이과정
 의암호에서 이루어진 대부분의 연구 및 조사는 남조

류가 대량 발생한 이후 확산 및 소멸하는 과정을 추적하는 수준에서 이루어졌고, 남조류 발생의 근본 원인을 밝히고자 하는 노력은 최근에 서야 활발히 진행되고 있다. 최근 의암호에서 발생한 남조류 발생 패턴을 보면, 유해 남조류는 매년 여름철 발생하여 약 한 달간 지속하는 경향을 보였다(Table 1). Table 1에 의하면 2010~2011년에는 *Microcystis* sp.가 최고 38,000 cell/mL 및 2,500 cell/mL 관찰되는 등 이 기간 동안 유해 남조류 우점종은 *Microcystis* sp.이었으나, 2012년 조사결과에서는 우점종이 기존의 *Microcystis* sp.가 아닌 *Anabaena* sp.가 14,100 cell/mL 관찰되어 우점종의 천이가 나타났다. 그 이후부터 2015년까지 의암호에서 유해 남조류 우점종은 *Anabaena* sp.로 나타났다. 그러나 2014년 S6 지점 인근 자갈 섬에서 일시적으로 *Microcystis* sp.가 약 20,000 cell/mL 발생된 후 추가 확산 없이 바로 사라졌으며, 사라진 이후 다시 *Anabaena* sp.가 우점종으로 관찰되었다. 이 결과로부터 의암호에서 남조류 우점종은 유역환경 변화에 따라 바뀔 수 있는 것으로 사료되었다. 한편 2014년과 2015년의 경우 의암호에서 우려할 수준의 남조류 대발생이 없었다. 최근 남조류 미발생 원인에 대해서 소양댐 방류량 증가 및 유입되는 영양염류의 감소가 추정되나, 그동안 의암호 유역에서 남조류 발생을 억제하기 위한 유역환경의 변화가 영향을 미쳤을 것으로 사료된다. 한편 지금까지 의암호에서 남조류 조사는 주로 유역 말단지점(S15)을 기준으로 이루어졌으나, 의암호 남조류는 상류 어느 지점에서 먼저 발생된 후 확산 및 증식의 과정을 거치는 것으로 추정되었다. 따라서 의암호에서 남조류가 발생하는 최초시작 지점을 찾고자 2013년 이후 우려지역에 대한 지점별 조사를 추가로 실시하였다(Table 2). Table 2에 의하면 7월 1일 오수 방류수 영향지점(S6) 및 공지천 합류지점(S9)에서 *Anabaena* sp.가 7,605 cell/mL 및 7,953 cell/mL로 대발생 된 것이 관찰되었고, 의암댐 앞(S15) 지점에서는 현저히 낮은 1,276 cell/mL이 관측되었다. 이 당시 클로로필-a의 농도 및 T-P 농도 비교에서도 지점별 차이가 나타났다. 즉, 같은 날 채수한 시료이지만

Table 1. Status of harmful cyanobacteria blooms at Lake Uiam for 2010~2015

Year	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Dominant species	M. sp. ^{a)}	M. sp.	A. sp. ^{b)}	A. sp	M. sp.(A. sp)	A. sp
Maximum (cell/mL)	38,000	2,500	14,100	2,325	20,000, (400)	975
Duration	8.10~9.01	9.23,	7.15~8.20	7.01~7.09	7.17~7.22	7.20~9.07
Algae alert level	Alert level	Alert level	Alert level	Alert level	Not occur	Not occur

a) M. sp: *Microcystis* species, b) A. sp: *Anabaena* species.

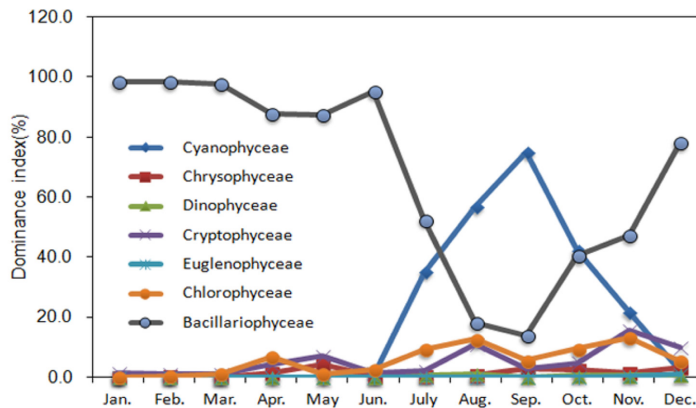
Table 2. Variation of water quality parameters and the density of cyanobacterial algae at each site in 2013

Site	Dates	Water Temp. (°C)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)	Anabaena (Cell/mL)
S4	7.01	29	2.114	0.062	28.1	4,990
S6	7.01	31	3.254	0.158	91.5	7,605
S8	7.01	30	2.333	0.130	17.1	10
S9	7.01	30	2.414	0.091	69.6	7,953
S11	7.01	30	2.264	0.073	59.8	5,925
S13	7.01	28	1.497	0.017	12.6	440
S15	7.01	28	1.343	0.012	11.8	1,276

S6~S9 지점의 남조류 밀도가 가장 높았고, 그 주변은 서서히 시차를 두고 높아지는 결과를 보였다. 따라서, 의암호에서 남조류 발생이 시작되는 곳은 S6와 S9 지점이라 판단하였다. 이러한 결과는 S6와 S9 인근이 조류 발생의 핵심지역이라고 한 보고와¹⁾ 일치하였다. 또한 의암호에서 총 조류의 발생 현황을 파악하기 위해 2014년 S15 지점에서 월별 발생 조류를 분류 동정하였고, 월별 상대 우점도(%)와 유해 남조류 발생 시기를 평가하였다 (Fig. 2). 조사결과 규조강의 경우 1~6월까지 87~98%로 발생 조류의 대부분을 차지하였고, 7월 52.3%로 낮아지기 시작해 9월 최저치인 13.6%를 보였다. 이후 10월 다시 높아지기 시작해 12월에는 78.1%로 높아지는 패턴을 보였다. 남조강은 6월에 0.5% 수준으로 발생한 후, 7월에 34.9%, 그리고 9월에 최고치인 74.9%를 보였다. 규조강이 높아지는 10월에는 42.2%로 낮아지기 시작했다. 본 결과로부터 의암호에서 남조류는 6월부터 발생하여 여름철에 영향을 주는 것으로 나타났고, 규조류의 천이대와 정반대 패턴을 보이는 것을 알 수 있었다. 그 외 녹조강과 갈색 편모조강은 연중 4~12월에 주로 발생되나 약 5~12%로 상대점유율은 낮았다.

3.2. 의암호 대표 지점에서의 총질소 및 총인 성분 장기변화

의암호 유역 말단인 의암댐 앞 지점(S15)과 남조류 우려지점(S6 및 S9)에서의 수질변화를 비교 분석하였다. 의암호 남조류 발생에 영향을 주는 이화학적 수질 인자로 유기물, NH₃-N 그리고 PO₄-P도 함께 분석하였으나, 이들 성분은 T-N 및 T-P의 농도 변화와 유사하게 변동하였고, 각각의 인자가 남조류 발생에 미치는 영향과의 관계를 명확하게 규명하게 어려웠다. 따라서 T-N 및 T-P 성분의 변화에 초점을 맞추어 평가하였다. 특히 여름철 높은 수온 조건에서 조류의 생장은 P에 의하여 제한되며, 유역관리에 있어 중요한 것은 P 유입을 줄이는 것이며⁹⁾, 또한 종에 따른 최적영양 염류 요구비율(N/P ratio)의 차이가 특정 환경에서 종간경쟁을 결정한다고 알려져 있다.¹⁰⁾ 의암호에서 2010년부터 2015년까지 6년간 T-N 및 T-P 변화를 평가하였다(Fig. 3). T-N 및 T-P의 연도별 평균 농도를 비교한 결과 2011년 T-N 2.565 mg/L와 T-P 0.043 mg/L로 최고치를 보였다. T-N의 5년간 평균은 1.776 mg/L이었으며, 특히하게 높았던 2011년을 제외하면 T-N 평균은 1.619 mg/L로 낮아졌고, 이

**Fig. 2.** Annual trends in the dominant species of phytoplankton in Lake Uiam (2014).

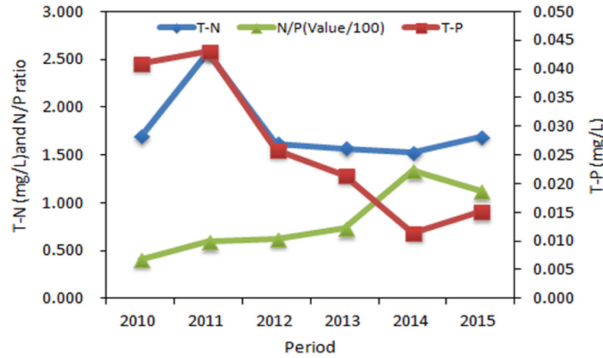


Fig. 3. Variation of annual T-N and T-P concentrations at site S15 during 2010 to 2015.

후 의암호 유역의 T-N 성분은 1.619 mg/L 수준에서 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 그러나 T-P 성분의 경우, 2011년 최고치인 0.043 mg/L을 보인 이후 지속해서 감소하여 최고치 대비 2015년에는 0.015 mg/L로 4년간 약 65% 감소하였다. 영양염 제한성 여부를 판단하는 기준이 되는 한국 호소의 N/P 비의 경우 보통 100 정도로 인이 제한 요소로 작용하며 이러한 수체에서 P의 증가는 식물성플랑크톤의 성장을 결정하는 중요한 요소로 작용한다.^{11,12)} 의암호에서 질소 및 인 성분의 변화에 따른 N/P비 변화는 총인 성분이 감소함에 따라 남조류 발생이 극심했던 2012~2013년 40~73:1로 낮았으나, 최근 2014~2015년간은 110~130:1으로 약 2배 높아졌다(Fig. 4). 한편, 연구에 따르면 인의 유입으로 N/P비가 감소하면 질소 고정 능력이 있는 *Anabaena* sp.류의 출현 시기가 빨라지게 되며 우점 기간도 길어지는 것으로 보고되어 있다.¹³⁾ 따라서 최근 2년간 신연교 지점(S15)에서 인 성분의 감소에 따른 N/P 비율의 증가가 남조류 발생 시기와 우점기간 감소에 영향을 주었을 것으로 사

료된다.

3.3. 남조류 우점 지점에서의 최적 질소/인 비율 분석

의암호 내 남조류 발생 우려 지점에서 지점별 수질변화를 비교 관찰하였다. 남조류 발생을 유도하는 주요한 환경요인 중 하나는 높은 수온이며^{13,14)} 수온은 휴면포자의 발아 유도 기간을 결정하는 요인 중 하나이다.¹⁵⁾ 한편, 5년간 우심지역에서의 평균 수온은 6월 초부터 25°C를 넘었고 8월 말에는 28°C까지 유지하는 일정한 패턴을 보였다. 따라서 높은 수온은 남조류 발생에 중요한 자이나, 최근 의암호에서의 남조류 대발생과 미발생의 원인 중 하나라고 판단하기 어려웠다. 지금까지 연구에 의하면, TP 농도가 증가할수록 남조류가 우점하며, N/P 비에 따라 질소 고정 남조류의 우점이 결정된다고 보고하였다.¹⁶⁾ 호소에서 TN 농도가 감소할 때 남조류 개체 수가 증가하는 음의 상관성을 가지며, TP 농도가 증가할 때 남조류 개체 수가 증가하는 양의 상관관계를 갖는다 하였다.^{17,18)} 그 외 TN/TP 비가 29:1 이하로 떨어

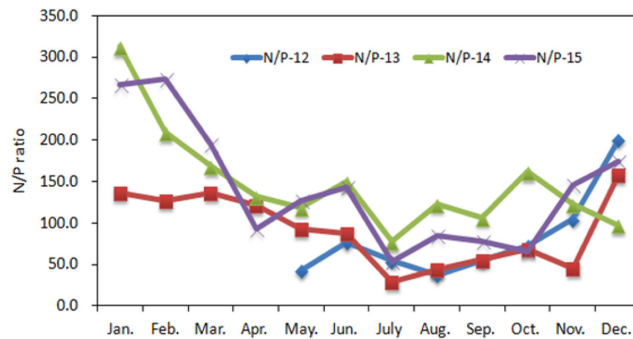


Fig. 4. Comparison of monthly N/P ratio trends at S15 during 2013~2015.

질 때 남조류 개체수가 증가하고 29:1 이상으로 증가할 때 감소하며^{19,20)}, 질소와 인은 남조류의 휴면포자 발아에도 영향을 주며²¹⁾, 최근 박 등의 연구에서 질소와 인이 결핍된 조건과 비교해서 질소와 인이 충족된 조건에서 가장 높은 발아율을 보인다 하였다.⁵⁾ 따라서 최적 질소와 인의 비율(N/P ratio)을 찾아내는 것이 남조류 초기 발생을 예측할 수 있는 주요 인자로 판단되었다. Fig. 5는 2013년 시기에 따른 지점별 N/P 비율의 변화를 나타낸 것이다. 결과와 같이 의암호 내에서 지점별 N/P 비율은 채수 날짜별 그리고 지점별 서로 다른 값의 차이를 보였다. 춘천시 하수처리장 방류수의 영향을 받는 지점(S6)과 공지천이 합류되는 지점(S9)의 3월에서 7월까지의 TN 및 TP 평균 농도는 TN 3.080 mg/L 그리고 TP 0.072 mg/L로 조사되었고, 6~7월로 접어들면서 TN 농도는 약 2.400 mg/L로 점차 낮아지고, TP 농도는 약 0.070 mg/L 수준으로 점차 높아지는 경향을 보였다. 이 기간 N/P 비율은 3월 87.6~122.5 수준을 보이다, 남조류 발생 직전에는 N/P 비율이 20.6~26.5로 낮았다. 이러한 N/P 비율의 변화는 2013년에 이후에도 유사하게 진행되었다. 가장 낮은 N/P 비율을 보인 7월 1일의 경우 대부분 지점에서 20~60 최저치를 보였고, 이 시기 S6~S9 지점에서 유해 남조류인 *Anabaena* sp. 가 7,600~8,000 cells/mL로 대발생되어 남조류 대발생과 N/P 비율 감소는 서로 인과관계가 있다고 판단되었다. 한편, 신연교 지점의 경우 7월 1일 N/P 비율이 111.9를 보여 우심지역보다 약 2배 높았고, 유해남조류인 *Anabaena* sp. 개체수 또한 1,276 cell/mL로 S6~S9 지점보다 약 5배 낮았다(Table 2). 보고에 따르면 *Anabaena* sp.는 자체 질소 고정능력이 있어 최적 N/P 비율을 산정하기 어렵다고 하였는데²²⁾, 지금까지 S6~S9

지점에서 주로 발생하는 남조류는 *Anabaena* sp.이고, 지점 S6 및 S9에서 N/P 비율이 20.6~26.5로 낮아질 때 남조류가 발생한다는 점에서 의암호에서 *Anabaena* sp.의 최적 N/P 비율은 20.6~26.5 수준일 것으로 추정되었다. 한편, 유해 남조류 발생이 거의 없었던 2014년과 2015년의 경우 S6~S9 지점의 N/P 비율이 다소 낮아지는 경향은 보였으나, N/P 비율이 80~100 수준으로 2013년과 비교하여 약 3~4배 높았다. 지금까지의 결과로부터 의암호에서 남조류인 *Anabaena* sp. 대발생이 발현되기 위해서는 약 30일간의 25°C 이상의 높은 수온 조건하에, 인 성분의 유입에 따른 최적영양 염류 비율(N/P)이 20~30 수준일 때 발생하며, 이 조건이 지속하는 기간에 따라 대발생으로 이어지는 것으로 판단되었다.

3.4. 점오염원에 의한 질소 및 인 성분의 오염부하량 변화

지점 S6~S9은 남조류 발생 우심지역임에도 불구하고 2012~2013년은 대발생이 관측되었고, 2014~2015년 최근 2년간 남조류 대 발생은 없었다. 연구 기간 동안 질소 및 인 성분 수질변화 분석결과 인 성분이 감소하는 것으로 평가되었으므로, 그 감소 원인을 추적하였다. 지점 S6~S9에 직접 영향을 주는 점오염원은 춘천하수처리장 처리수와 공지천으로 유입되는 인 성분으로, 최근의 총질소 및 총인의 배출부하량은 다음과 같다(Fig. 6). 연구기간 동안 춘천하수처리장의 T-N 연 평균 배출부하량은 931~1,369 kg/d로 2013년 최저치를 보였고, 매년 서서히 증가하여 2015년에는 1,368 kg/d로 최저치 대비 약 32% 증가하는 패턴을 보였다. 그러나 TP 배출부하량은 2012년 23.0 kg/d 그리고 2013년 16.6 kg/d로 연구 기간 동안 최고치를 보이다, 2014년과 2015년에는

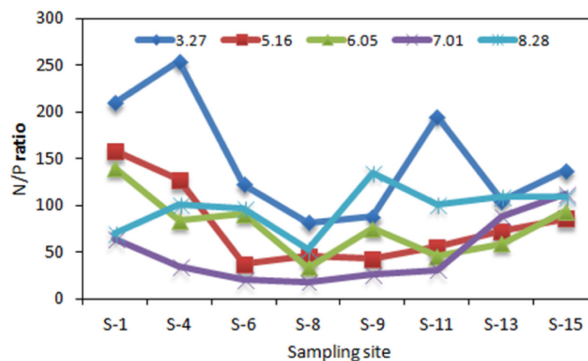


Fig. 5. Change in the TN/TP ratio according to the sampling sites in 2013.

5.3 kg/d 과 9.6 kg/d로 2012년 대비 약 66~77% 감소하는 경향을 보였다. 두 성분 변화는 서면하수처리장에서도 유사한 패턴을 보였다. 즉, 총인 성분 배출부하량 감소요인으로 2012년부터 운영하기 시작한 총인 고도처리시설 운영에 따라 최근 총인 부하량이 급격히 낮아진 것으로 판단된다. 따라서, 지점 S6~S9에서의 총인 성분 감소는 최적영양염류 조건인 N/P비 20~30을 충족시키지 못했고, 따라서 2014년과 2015년 남조류 대발생을 억제하는 주요 요인으로 작용했을 것으로 판단된다. 실제 2014년과 2015년 조사결과에서 S6~S9 지점에서의 N/P 비는 80~100 수준으로 높았다.

3.5. 여름철 선행강우에 따른 남조류 초기 발생 분석

의암호에서 남조류가 발생하기 위해서는 높은 수온(25°C) 조건에서 선행강우가 수반될 때 발생하는 것으로 추정된다. 보고에 의하면, 계절적 몬순 강우가 이화학적 수질특성과 체류시간에 변화를 주며²³⁾ 또한, 집중강우는 식물성플랑크톤 군집 구조에 영향을 미치는 수온, 성층현상, 일사량 및 영양염의 변화를 발생시켜 군집구조를 변화시킨다 하였다.^{24, 25)} 따라서, 지난 5년간 남조류 발생이 시작되는 시기인 6~7월 초 의암호 유역 선행강우 패턴을 살펴보았다(Fig. 7). Fig. 7에서와 같이 남조류 발생이 심했던 2012년은 6월 10일경 16.5 mm가 내렸

고, 6월 29~30일 사이 약 90 mm의 강우가 발생되었다. 7월의 경우 하루 50~80 mm의 강한 강우가 관측되었고, 선행강우가 있는 직후인 7월 15일 남조류 대량 발생이 관측되었고 이후 약 한 달간 지속하였다. 남조류 대량발생이 관찰되었던 2013년은 6월 18일경 약 10 mm의 선행강우가 있었고, 이후 6월 25~28일까지 약 56 mm의 누적 강우량이 있었다. 이후 7월 1일 의암호 남조류 우려 지점(S6~S9)과 유역 말단 지점(S15)에서 남조류 대량 발생이 관찰되었다. 2014년과 2015년 또한 선행강우 후 남조류가 관측되는 패턴을 보였으나 대량 발생은 없었다. 2014년은 6월 21일~24일 45.8 mm의 누적강우량이 발생되었으나, 소양댐 방류량의 영향을 받았고, 2015년은 6월 말 22.5 mm, 7월 중순 11.7 mm와 26.7 mm의 강우로 예년보다 적은 양의 강우가 관측되었다. 지금까지 결과로부터 의암호에서 남조류가 발생하기 위해서는 6월 중순 이후 50~60 mm 수준의 선행강우가 필요하며, 강우 직후 남조류 발생 우려가 커진다고 추정하였다. 따라서 향후 보다 정밀한 선행강우 분석이 이루어질 경우 의암호에서 남조류 발생의 예측 인자로 활용할 수 있을 것으로 사료되었다.

3.6. 소양호 및 춘천호 방류량 변화

소양댐 방류량은 공지천 말단과 춘천 하수처리장 방

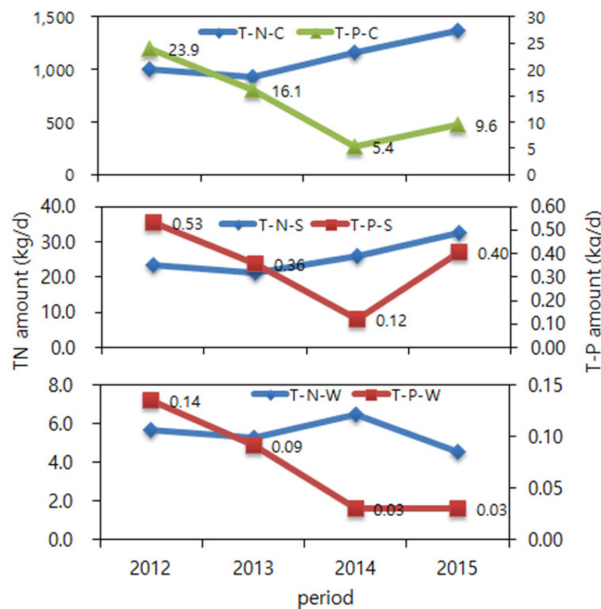


Fig. 6. Changes in the loads of T-N and T-P from major sewage treatment plants in the Uiam watershed (Chuncheon sewage treatment: C, Seo-myon sewage treatment: W, Shinbuck sewage treatment: S).

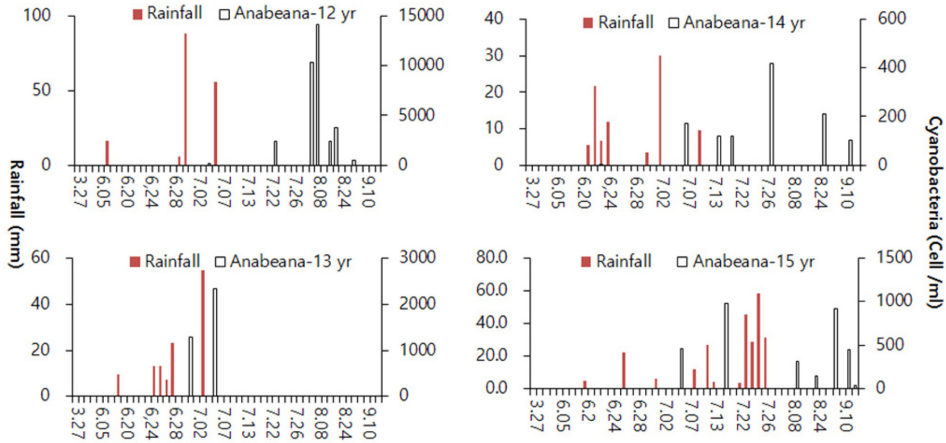


Fig. 7. Comparison of rainfall events and cell densities of dominant cyanobacterial algae at the end of Lake Uiam (S15) for 2012~2015.

류구 수질에 영향을 미치고, 춘천댐의 방류량은 의암호 좌안 수질에 영향을 준다.²⁾ 따라서 의암호에서 남조류가 대량 증식할 경우 소양호 방류량을 증가시켜 남조류를 제어하는 기법이 실제 현장에서 적용되어 왔다. 최근 5년간 소양댐 및 춘천댐 방류량 패턴을 분석하였다(Fig. 8). 남조류 대량 증식이 관측되었던 2010~2013년까지 봄에서 초여름(2~6월) 그리고 가을철 소양댐 방류량은 평균 약 30~100 m³/sec으로 소양댐 방류량이 춘천댐 방류량보다 약 40~60% 많이 방류하는 패턴을 보였으나, 여름철인 7~9월까지는 소양댐 방류량이 줄어들고 춘천댐 방류량이 늘어나는 패턴을 보였다. 소양호의 댐 방류량은 하류의 홍수관리를 위해 7월과 8월에 적게 방류하고, 6월 하순에는 장마대비를 위해 평수기보다 하류로 많은 물을 방류하기 때문이다.²⁶⁾ 남조류 발생이 없었

던 2014년의 경우 과거와 다르게 6~8월 소양댐 방류량이 66~80 m³/sec으로 춘천댐 방류량 23~28 m³/sec보다 약 3배 많았다. 소양댐 방류량과 춘천시 오수방류수의 영향을 받는 S6 지점에서의 2013과 2014년의 N/P 비율을 분석해 보면(Table 3), 소양댐 방류수의 방류량이 적었던 2013년 7월 초 N/P 비율은 20.6까지 떨어진 반면 2014년의 N/P 비율은 낮아지지 않고 전반적으로 150 수준인 것을 알 수 있다. 즉, 2013년과 비슷한 선행강우와 수온 상승이 있었음에도 2014년 남조류 발생이 없었던 원인은 남조류 발생이 우려되는 초여름에 소양호 방류량의 증가에 따라 희석효과로 2014년 남조류 발생이 일어나지 않은 것으로 추정되었다. 따라서 초여름 춘천호보다 소양호 방류량을 늘리는 것이 의암호 남조류 대 발생 억제에 중요한 요인으로 인식되었다. 한편, 2015년

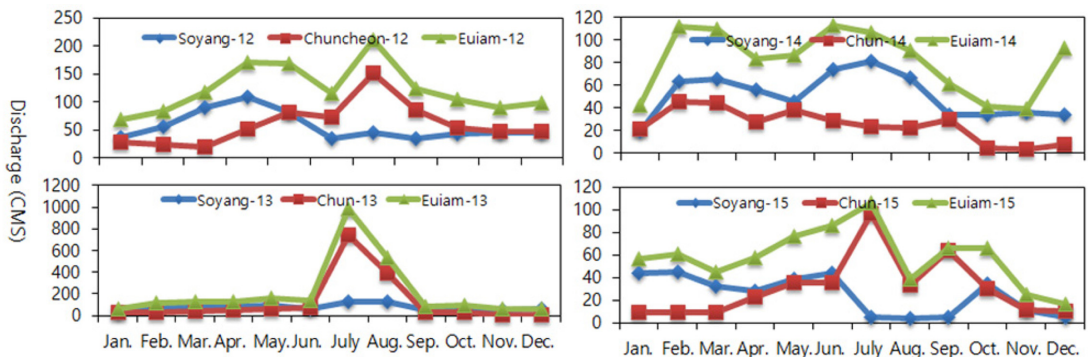


Fig. 8. Comparison of the annual discharges at Soyang, Chuncheon, and Uiam dams for 2012~2015.

Table 3. Comparison of the N/P ratios at site S6 between 2013 and 2014

2013		2014	
Date	N/P ratio	Date	N/P ratio
3.27	122.5	4.22	129.7
5.16	37.5	5.20	130.8
6.05	90.7	6.02	158.8
		6.18	335.9
		6.26	231.9
7.01	20.6	7.07	142.4
		7.16	79.9
8.28	96.6	8.22	45.8

은 전국에 극심한 가뭄으로 소양댐 저수량이 감소함에 따라 초여름 소양댐 방류량을 급격히 줄이고, 예년과 같이 7~8월에 춘천댐 방류량을 늘려 유지하였다. 따라서 2015년은 남조류 대발생이 일어날 것으로 예측되었다. 그러나 우려와는 다르게 2015년 우려할 수준의 남조류 대발생은 없었다. 즉, 여름철 소양댐 방류량을 늘리는 것이 S6와 S9 지점 사이의 회석효과를 일으켜 남조류 발생을 억제할 수 있지만, 소양댐 방류량이라는 인자와 함께 선행강우 그리고 최적 N/P 비율이라는 다른 수질인자가 충족되어야만 남조류가 발생한다고 사료되었다.

4. 결 론

의암호에서 유해 남조류 초기 발생 메커니즘 규명을 위한 장기 모니터링을 실시하였다. 주로 발생하는 유해 남조류는 *Anabaena* sp.인 것으로 조사되었고, 최근 의암호 유역에서는 인 성분의 감소, 춘천시 오수처리장에서의 배출부하량 감소, 춘천댐과 소양호 여름철 방류량 변화 그리고 강수량의 감소가 두드러지게 나타났다.

1. 의암댐 앞 지점(S15)에서의 T-N 평균은 1.526~1.694 mg/L을 보였고, T-P 성분의 경우, 2011년 최고치인 0.043 mg/L에서 2015년에는 0.015 mg/L로 4년간 약 65% 낮아졌다. 총인 성분 감소에 따라 N/P 비는 남조류 발생이 극심했던 2010~2013년 40~73을 보인 이후, 2014~2015년은 110~130으로 약 2배 높은 비율을 보였다. 총인 성분 감소에 큰 영향을 주는 춘천시 오수처리장 배출부하량은 2014년과 2015년에는 5.3 kg/d과 8.8 kg/d로 2012년 대비 약 66~77% 감소하는 경향을 보였다.

2. 춘천시 하수처리장 방류수의 영향을 받는 지점(S6)과 공지천이 합류되는 지점(S9)의 N/P 비율은 남조류

발생 직전에 20.6~26.5로 낮아졌고, 의암호에서 남조류 대발생과 N/P 비율 감소는 상관관계가 있음이 시사되었다. 즉 *Anabaena* sp. 최적영양 염류 비율은 20~30 수준인 것으로 추정되었다.

3. 의암호에서 남조류가 대발생되기 위해서는 6월 중순 이후 50~60 mm 수준의 강우 이벤트가 필요하며, 소양댐 방류량 조절을 통한 남조류 억제도 유효하지만 호소에 인 성분 유입을 줄여 최적 N/P 비율이 형성되지 않게 관리 하는 것이 더 중요한 것으로 사료되었다.

4. 의암호에서 제일 먼저 남조류가 발생하는 곳은 S6와 S9 인근 지점이며, 이곳에서 남조류 발생의 예측 인자로 25°C 이상의 높은 수온 조건이 약 30일 지속되는 조건에서 최적 N/P 비율 20~30을 만족하고, 6월 중순 이후 50~60 mm의 강우로 인해 인 성분이 축적될 경우 남조류 발생이 된다고 제시하였다. 제한된 인자만을 가지고 평가하였기에 추가적인 연구가 필요하겠으나, 현장에서 신속히 판단하는 예측 인자로 활용할 수 있을 것으로 사료되었다.

감사의 글

본 연구는 2015년 환경부 국제기반구축사업 지원사업으로 수행한 연구로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Choi, J. K., Min, J. H. and Kim D. W., "Three-Dimensional Algal Dynamics Modeling Study in Lake Euiam Based on Limited Monitoring Data", *Journal of Korea Society on Water Environment*, **2015**, 31(2), 181-195.
2. Park, S. W., Lee, H. W., Lee, Y. S., and Park, S. S., "A Hydrodynamic Modeling Study to Analyze the Water Plum and Mixing Pattern of the Lake Euiam", *Korea J. Limnol*, **2013**, 46(4), 488-498.
3. Murnell, M. C. and Lores, E. M., "Phytoplankton and Zooplankton Seasonal Dynamics in a Subtropical estuary : Important of Cyanobacteria.", *Journal of Plankton Research*, **2004**, 26, 371-382.
4. Lim, B. J., "Investigation of cause of off-flavor material production by harmful algae and management strategy (II)", **2014**.
5. Park, C. H., Lim, B. J., You, K. A., Park, M. H. and Hwang, S. J., "Effect of Environmental Factors on Akinete Germination of *Anabaena Circinalis*(Cyanobacteriaceae) Isolation from the North Han River", *Korea J. Limnol.*, **2014**, 47(4), 292-301.

6. "Water pollution standard method, Ministry of Environment Notification No. 2014-163 (2014.09.22)", Republic of Korea.
7. Perkins, B. and Jones, J. R., "Temporal Variability in a Mid-western Stream During Spring", *Verhandlungen des International Vererin Limnology*, **1994**, 25, 1471-1476.
8. Seo, K. A., Jung, S. J., Park, J. H., Hwang, K. S., and Lim B. J., "Relationships Between the Characteristics of Algae Occurrence and Environmental Factors in Lake Juam", *Journal of Korea Society on Water Environment*, **2013**, 29(3), 133-328.
9. Schindler, D. W., "The Dilemma of Controlling Cultural Eutrophication of Lakes", *Proc. R. Soc.*, **2012**, B (279), 4322-4333.
10. Rhee, G. Y., "Effect of N:P atomic Ratios and Nitrate Limitation on Algal Growth, Cell Composition and Nitrate Uptake", *Limnology Oceanography*, **1978**, 23, 10-25.
11. Kim, Y. J., "Ecological Study of Phytoplankton Community and Trophic Status using Indicators in Paldang", *Korean Journal of Limnology Society*, **1996**, 19(4), 323-345.
12. Seo, J. K., Yu, J. J., Lee, S. Y., Yang, S. Y. and Chung I. K., "Phytoplankton Community Dynamics and Evaluation of Trophic state in the Lake Unmoom", *Algae*, **2003**, 18(2), 135-148.
13. Reynolds, C. S., "Phytoplankton Periodicity: The Interaction of Form, Function and Environmental Variability", *Freshwater Biology*, **1984**, 14(2), 111-142.
14. Hong, Y., Steinman, A., Biddanda, B., Rediske, R. and Fannestiel, G., "Occurance of the Toxic Producing Cyanobacterium *Cylindrospermopsis Raciborskii* in Mona and Muskegon Lakes", *Journal of Great Lakes Research*, **2006**, 32, 645-652.
15. Probert, R. J., "The Role of Temperature in the Regulation of Seed Dormancy and Germination", *Fenner, M. ed., Wallingford, UK*, **2000**, 261-292.
16. Smith, V. H., "Predictive Models for the Biomass of Blue Green Algae in Lakes", *Water Resour. Bullet.*, **1985**, 21, 433-439.
17. Ahn, C. Y., Lee, J. Y. and Oh, H. M., "Control of Microalgal Growth and Competition by N:P Ratio Manipulation", *Korean J. Environ. Biol.*, **2013**, 31(2), 61-68.
18. Kim, T. K., Choi, J. H., Lee, K. J., Kim, Y. B., and Yu S. J., "Study on Introduction to Predicting Indicator of Cyanobacteria Dominance in Algae Bloom Warning System of Hangang Basin", *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **2014**, 36(5), 378-385.
19. Smith, V. H., "Low Nitrogen to Phosphorus Ratios Flavor Dominance by Blue Green Algae in the Lake Phytoplankton", *Science*, **1983**, 221(4611), 669-671.
20. Xie, L., Xie, P., Li, S., Tang, H. and Liu, H., "The Low TN;TP ratio, A Cause or a Result of Microcystis Bloom?", *Water Research*, **2003**, 37, 2073-2080.
21. Agrawal, S. C. and Misra, U., "Vegetative Survival, Akinete and Zoosporangium Formation and Germination in Some Selected Algae as Affected by Nutrients, pH, Metal, and Pesticide", *Folia Microbiologica*, **2002**, 47, 527-534.
22. Oh, H. M. and Rhee, "A Comparative study of microalgae isolated from flooded rice paddles: light-limited growth C fixation, growth efficiency and relative N and P requirement", *J. Appl. Physiol.*, **1991**, 3, 211-220.
23. Kim, B. C. and Kim Y. H., "Phosphorus cycle Community and Trophic Status Indicators in Lake Paldang", *Korea Journal of Limnology Society*, **2004**, 19(4), 323-345.
24. Joung, S. H. and Park, H. K., "Seasonal Succession Characteristic of Phytoplankton Community in Lake Doam", *Journal of Korean Society of Water Environment*, **2010**, 26(4), 673-680.
25. Winder, M. and Schindler, D. E., "Climatic Effect on the Phenology of Lake Processes", *Global Change Biology*, **2004**, 10, 1844-1856.
26. Park, H. K., Byun, M. S., Kim, E. K., Lee, J. H., Chun, M. J. and Jung D. L., "Water Quality and Phytoplankton Distribution Pattern in Upper Inflow River of Lake Paldang", *Journal of Korea Society on Water Environment*, **2004**, 20(6), 615-624.