

한강유역 조류경보제에 남조류 우점 예측인자 도입에 관한 연구 Study on Introduction to Predicting Indicator of *Cyanobacteria* Dominance in Algae Bloom Warning System of Hangang Basin

김태균[†] · 최재호 · 이경주 · 김영배 · 유성종
Tae Kyun Kim[†] · Jae Ho Choi · Kyung Ju Lee · Young Bae Kim · Sung Jong Yu

서울시상수도사업본부 암사아리수정수센터

The office of Waterworks, Seoul Metropolitan Government Amsa Arisu Water Purification Center

(2014년 2월 11일 접수, 2014년 5월 15일 수정, 2014년 5월 19일 채택)

Abstract : The chlorophyll-a concentration in algae bloom warning system of Hangang basin did not predict the *cyanobacteria* dominance. In this study, suggest the predicting indicator of *cyanobacteria* dominance through analyzing the environmental factors affecting on the cell count of *cyanobacteria*. Firstly, the dominance of algae was analyzed with seasonal variation during Jan. 2012~Sep. 2013. The diatom dominated phytoplankton communities during the period of January~April. In the May~June, the green algae dominated. And, the dominance of algae was changed to *cyanobacteria* in the July~August. Also, the environmental factors affecting to *cyanobacteria* blooms ; nutrients (TN, TP), temperature, precipitation, dam-discharge were evaluated during the study period. Rather than temperature factor, relatively low dam discharge causes *cyanobacteria* to grow rapidly and create a blooms. The low dam-discharge may increase the water retention time. Finally, it is proved that a low ratio of TN to TP (<29:1) can favour the development of *cyanobacteria* blooms. Thus, the predicting indicator (TN:TP) have need to apply to the alarm bloom warning system of Hangang basin.

Key Words : Algae bloom warning system, *Cyanobacteria*, Geosmin, TN, TP

요약 : 한강유역 조류경보제의 클로로필-a 농도는 남조류의 우점을 예측할 수 없어 본 연구에서는 남조류 개체수에 영향을 미치는 환경인자를 분석하여 남조류 우점 예측인자를 제시하였다. 2012년 1월-2013년 9월까지 하천의 계절변화에 따른 조류의 우점종을 분석한 결과, 저수온기인 1~4월에는 규조류, 5~6월에는 녹조류, 7~8월에는 남조류가 우점하는 것으로 나타났다. 또한, 남조류 개체수 증감에 영향을 미치는 영양염류(TN, TP), 기온, 강수량, 댐 방류량과의 상관성을 분석한 결과, 기온보다는 낮은 댐 방류량으로 댐 내의 체류시간이 길어져 남조류 개체수가 급속히 증가한 것으로 나타났다. 마지막으로 남조류 개체수와 TN:TP 농도 비를 분석한 결과 TN:TP 농도 비가 29 이하로 낮아질 때 남조류가 우점하는 것으로 분석되어 한강유역 조류경보제에 남조류 우점 예측인자인 TN:TP 농도 비를 도입할 필요가 있다.

주제어 : 조류경보제, 남조류, 지오스민, 총질소, 총인

1. 서론

남조류는 클로로필-a를 가지고 광합성을 통해 산소를 만드는 세균이며,¹⁾ 2-MIB(곰팡이냄새)와 Geosmin(흙냄새) 등과 같은 맛·냄새 물질을 발생시킨다. 2012년 여름철 팔당호 Geosmin은 795 ppt까지 증가하였으며, 암사 취수원도 379 ppt까지 상승하여 수질관리에 많은 어려움이 발생하였다. 기상예보처럼 남조류 발생을 예측해 주는 수질예측시스템이 존재하였다면, 수질관리에 많은 도움이 될 수 있었을 것이다. 환경부에서도 수질예보시스템을 도입하여 내부적으로 운영 중에 있으나, 한강에서 남조류를 예측하는 시스템은 아직까지 존재하지 않는다. 현재 조류경보제²⁾가 발령되는데, 조류경보제는 클로로필-a와 남조류 세포수에 의해 결정된다 (Table 1). 조류경보제는 팔당댐 상류의 경우 환경부, 한강구간은 서울시에서 발령하고 있으며 발령기준은 클로로필-a와 남조류 세포수가 1회 초과하면 발령하고 있다.

Table 1. Standard of *cyanobacteria* bloom warning system in the Hangang basin

Item	Attention	Warning	Bloom
Chlorophyll-a (mg/m ³)	over 15	over 25	over 10 ²
<i>Cyanobacteria</i> (cells/mL)	over 500	over 5,000	over 10 ⁶

한편, 클로로필-a는 규조류, 녹조류, 남조류를 포함하고 있기 때문에 남조류만 발생하는 것을 예측할 수 없으며, 연중 90% 이상이 규조류로 구성되어 있어 남조류 보다는 규조류와 높은 상관성을 가진다.³⁾

일반적으로 광합성을 통하여 유기물을 합성하는 식물성 플랑크톤 즉 조류의 세포구성비는 탄소: 질소: 인이 106:16:1이기 때문에 주로 질소와 인이 식물성 플랑크톤 번식을 결정하는 제한 요소가 되며, 이를 레드필드 비(redfield ratio)라고 한다.⁴⁾

질소와 인은 폐쇄 수역인 호소나 해역에서 부영양화의 원

[†] Corresponding author E-mail: ss531034@seoul.go.kr Tel: 02-3146-5758 Fax: 02-3146-5708

인이 되는 물질로 조류 등을 증식하게 하여 수질오염을 악화시킨다. 현재, 질소와 인은 하수방류수 처리기준인 5개 항목(BOD, COD, SS, TN, TP)⁵⁾에 포함되어 방류기준을 준수하게 하여 조류발생 등과 같은 수질오염을 사전에 방지하고 있다.

그러나, 현행 운영 중인 조류경보제는 규조류와 높은 상관성이 있는 클로로필-a 농도만 제시되고 남조류 우점을 예측하는 수질인자가 제시되지 않아 정수처리공정 운영에 많은 어려움이 발생되고 있다. 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 남조류 우점을 예측하는 연구가 수행되어 왔다. 그 예로 Schindler 등⁶⁾은 TP 농도가 증가할수록 남조류가 우점한다고 하였으며, Smith 등⁷⁾은 TN:TP 농도 비에 따라 질소 고정 남조류의 우점이 결정된다고 하였다. 그러나, 지역마다 대기환경과 수질이 다르기 때문에 본 연구에서는 암사취수원이 위치한 한강유역에 적합한 남조류 우점 예측인자를 제시하고자 한다. 구체적인 연구절차는 다음과 같다. 2012년과 2013년 계절변화에 따른 우점종(규조류, 남조류, 녹조류)을 분석 후 남조류 개체수와 환경인자인 영양염류(TN, TP), 기온, 강수량, 댐 방류량과의 상관성을 평가하였다. 영양염류인 TN:TP 농도 비와 남조류 발생과의 상관성을 분석 후 남조류 우점 여부를 예측할 수 있는 TN:TP 농도 비를 제시하였다.

2. 연구방법

2.1. 분석대상

암사취수장은 남한강과 북한강이 만나 팔당호를 통해 서울로 흐르는 지점에 위치하고 있다(Fig. 1). 취수장의 용량은 1,710,000 m³/d 으로 제1취수장과 제2취수장으로 구분되어 있으며, 서울시 인구 3,510,000 명에게 급수가 가능하다. 조사기간은 2012년 1월~2013년 9월이며, 제1취수장(1,390,000 m³/d)의 샘플링 관로와 연결되는 실험실에서 시료를 채취 후 무균병에 담아 분석하였다.



Fig. 1. Amsa station in the Hangang basin.

2.2. 조류개체수 측정방법

조류개체수 측정은 수질오염공정시험기준⁸⁾의 식물성플랑크톤-현미경계수법을 이용하였으며, 검경배율 100~1,000 배 시야에서 조류의 종류를 분석한 후 세즈윅-라프터 챔버(sedgwick-rafter cell)를 이용하여 정량 분석하였다. 구체적인 분석방법은 다음과 같다. 원수를 채수 후 조류세포가 분해되지 않도록 보존료인 루골용액을 첨가한다. 이 루골용액(lugol's solution)은 요오드화칼륨, 요오드, 아세트산을 이용하여 제조하였다. 마이크로 피펫(micro pipet)을 이용하여 1 mL의 원수를 세즈윅-라프터 챔버에 분산시킨다. 이때 세즈윅-라프터 챔버의 규격은 길이 50 mm, 폭 20 mm, 깊이 1 mm이다. 현미경(Axiovert 200 microscope, Zeiss)을 이용하여 챔버 내에서 일정한 크기의 격자를 무작위로 10회 이상 반복 계수한 후 다음 계산식으로부터 1 mL의 조류개체수를 산출하였다.

$$\frac{\text{Algae cell counts}}{\text{mL}} = \frac{C}{A \times D \times N} \times 1,000 \quad (1)$$

여기서,

- C: 계수된 개체수의 합
- A: 격자의 면적(mm²)
- D: 검경한 격자의 깊이(세즈윅-라프터 챔버 깊이, 1 mm)
- N: 검경한 시야의 횡수

2.3. 총질소(TN), 총인(TP) 분석방법

총질소는 자외선/가시선 분광-산화법을 사용하였으며, 구체적인 실험방법은 다음과 같다. 시료 50 mL를 분해병에 주입하고 알칼리성 과황산칼륨 용액 10 mL를 넣어 마개를 닫고 섞은 다음 고압증기멸균기에 넣고 가열하였다. 약 120℃ 도달 후 30분간 가열분해 한 후 분해병을 꺼내어 방냉하였다. 전처리 한 시료의 상정액을 취하여 유리섬유 여지로 여과한 후 처음 여액 5~10 mL는 버린 다음 여액 25 mL를 정확히 취하여 50 mL 비이커로 옮겼다. 여기에 염산(1+16) 5 mL를 넣어 pH 2~3으로 하고 이 용액의 일부를 층장 10 mm 흡

수셀에 옮겨 검액으로 하였다.

바탕시험액을 대조액으로 하여 220 nm에서 검액의 흡광도를 측정하고 미리 작성한 검량선으로부터의 질소의 양을 구하여 시료중의 총질소 농도를 산출하였다.

총인은 자외선/가시선 분광-산화법을 사용하였으며, 구체적인 실험방법은 다음과 같다. 시료 50 mL를 분해병에 넣고 과황산칼륨용액(4 W/V%) 10 mL를 넣어 마개를 닫고 섞은 다음 고압증기멸균기에 넣고 가열하였다. 약 120°C에 도달 후 30분간 가열분해 한 후 분해병을 꺼내어 방냉하였다.

전처리한 시료의 상등액 25 mL를 취하여 마개있는 시험관에 넣고 몰리브덴산암모늄, 아스코르빈산 혼합액 2 mL를 넣고 섞은 다음 20~40°C에서 15분간 방냉하였다.

이 용액의 일부를 증장 10 mm 흡수셀에 옮겨 시료용액을 따로 물 50 mL를 취하여 시료의 시험방법에 따라 시험하여 바탕시험액으로 하였다. 바탕시험액을 대조액으로 하여 880 nm에서 시료용액의 흡광도를 측정하고 미리 작성한 검량선으로부터 총인의 양을 구하여 시료중의 총인의 농도를 산출하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1. 계절변화에 따른 우점종(규조류, 녹조류, 남조류) 분석

조류는 서로 경쟁관계에 있기 때문에 기온, 영양염류, 체류시간 등과 같은 수질인자에 따라 출현하는 종이 달라진다. Fig. 2는 2012년 1월~2013년 9월까지의 우점종을 나타낸 그래프이다.

총조류 중 규조류가 2012년 93%, 2013년 96%로 연중 규조류가 대부분을 우점하고 있는 것으로 나타났으며, 2012년

2월(최대 21,790 cells/mL)과 2013년 2월(최대 18,130 cells/mL)에 규조류가 가장 많이 발생하였다. 규조류는 깨끗한 하천 환경에서 존재하며, 봄철 초기에는 상층혼합층에 영양물질이 풍부하고 충분한 빛을 포함하여 규조류가 빠르게 번식하는 것으로 알려져 있다.⁹⁾ 2012년과 2013년 1~4월 하순까지는 냉수성 조류인 규조류가 우점하였으며, 기온이 상승하는 5월초부터는 녹조류가 발생하기 시작했다. 2013년 4~6월 평균기온이 9.1°C에서 17.9°C 및 23.8°C로 급속히 상승하였으며, 평균수온도 10.5°C에서 16.9°C 및 22.5°C로 증가하였다 (Table 2).

녹조류는 빛이 강도가 높아지는 시기에 증식속도가 높아지는데, 2012년과 2013년 6월 하순의 녹조류 개체수는 각각 930 cells/mL과 614 cells/mL까지 증가하였다.

2012년 7월 1일~9월 12일 사이에 규조류가 급격히 감소되었지만(최대 3,640 ⇒ 최소 390 cells/mL), 남조류는 최대 1,640 cells/mL까지 증가하였다. 그러나, 2013년 7월 1일~9월 12일 사이에 규조류가 급속히 감소하였지만(최대 6,460 ⇒ 최소 310 cells/mL), 남조류는 최대 140 cells/mL로 발생 정도가 낮았는데, 이는 2012년 8월 남조류 최대 발생개체수의 8.5%에 해당하는 수치이다. 우점(competition)의 차이는 기온에 영향을 많이 받는데 Frank 등¹⁰⁾의 연구에 의하면, *Nitzschia sp.*의 규조류는 10°C와 15°C에서 우점이 되며, 25°C에서는 남조류가 우점종이 되는 것으로 나타났다. 본 연구결과에서도 2012년과 2013년 7~8월 평균기온은 25°C 이상으로 측정되고, 이 시기의 평균수온도 24°C로 나타나 여름철에 남조류가 우점종이 되는 것으로 조사되었다.

그러나, 이 시기의 평균기온은 2013년이 2012년보다 높았지만(Table 2), 개체수는 1/10 이하로 감소(1,640 ⇒ 140 cells/mL)되어 기온상승이 남조류 개체수 증가에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

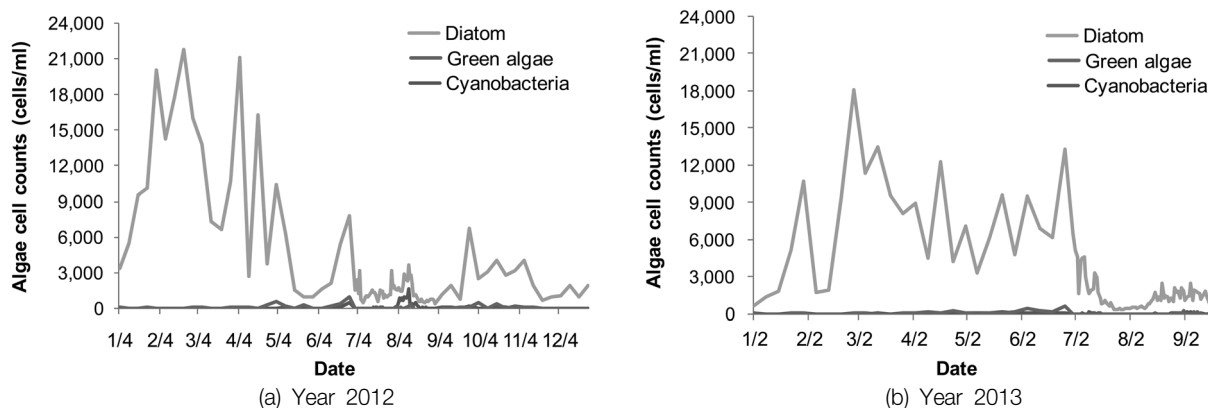


Fig. 2. Seasonal variation of algae dominance.

Table 2. Average monthly temperature for 2012 and 2013

	4 month		5 month		6 month		7 month		8 month		9 month	
	12 yr	13 yr	12 yr	13 yr	12 yr	13 yr	12 yr	13 yr	12 yr	13 yr	12 yr	13 yr
Ambient temp. (°C)	11.7	9.1	18.2	17.9	23.1	23.8	25	25.3	25.9	26.7	19.1	20.2
Water temp. (°C)	10.9	10.5	17.9	16.9	22.4	22.5	23.2	23.4	25.0	25.1	21.2	23.2

3.2. 남조류 발생과 환경인자간의 상관성 분석

3.2.1. 영양염류(TN, TP)

조류는 주요 원소의 수가 특색 있는 원자비(C : N : P = 106 : 16 : 1)로 존재하며, 질소와 인이 조류생성에 중요한 인자이기 때문에 2012년과 2013년 계절에 따른 총질소와 총인의 변화를 분석하였다.

Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 2012년 1월초~3월 중순 사이에 TN 농도가 3.0 mg/L에서 2.2 mg/L로 감소할 때 남조류 개체수는 30 cells/mL 존재하였으며, 2012년 5월초~6월 하순에 TN 농도가 2.5 mg/L에서 1.8 mg/L로 감소할 때에는 남조류 개체수가 470 cells/mL까지 증가하였다. 2012년 7월 11일에 TN 농도가 3.3 mg/L까지 증가한 후 8월 8일에는 2.4 mg/L로 감소하였으며, 동일시기에 남조류 개체수는 10 cells/mL에서 950 cells/mL까지 증가되었으며, 8월 11일에는 최대 1,640 cells/mL까지 증가하였다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 2013년 2월초~5월 중순까지 TN 농도가 3.0 mg/L에서 1.9 mg/L로 감소하자 남조류 개체수는 오히려 120 cells/mL까지 증가하였다.

TN 농도가 증가한 이후 7월초에 2.3 mg/L에서 1.9 mg/L로 감소하자 남조류 개체수는 120 cells/mL로 증가하였으며, 8월 중순~9월초에도 TN 농도가 2.2 mg/L에서 1.8 mg/L로 감소할 때 남조류 개체수는 140 cells/mL까지 증가하였다.

전체적으로 TN 농도가 감소할 때 남조류 개체수가 증가

하는 것으로 나타나 서로 음의 상관성을 가지는 것으로 판단된다.

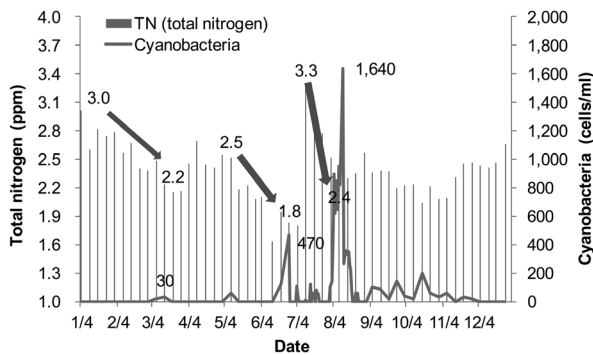
Fig. 3(c)에서와 같이 2012년 2월말~3월 중순에 TP 농도가 0.022 mg/L에서 0.056 mg/L로 증가할 때 남조류 개체수는 30 cells/mL 정도이었으나, 6월 초순~6월 하순 사이에 TP 농도가 0.023 mg/L에서 0.055 mg/L로 증가할 때에는 남조류 개체수가 470 cells/mL까지 증가하였다. 또한, 8월 초순~8월 중순에 TP 농도가 0.032 mg/L에서 0.079 mg/L로 증가한 경우에도 남조류 개체수가 100 cells/mL에서 1,640 cells/mL까지 증가하였다.

한편, 2013년의 경우(Fig. 3(d)), 3월 하순~5월 중순 사이에 TP 농도가 0.027 mg/L에서 0.063 mg/L로 증가할 때 남조류 개체수는 120 cells/mL까지 증가하였으며, 8월 중순~9월 상순에도 TP 농도가 0.033 mg/L에서 0.064 mg/L로 증가할 때 남조류 개체수는 최대 140 cells/mL까지 증가하는 것으로 나타났다.

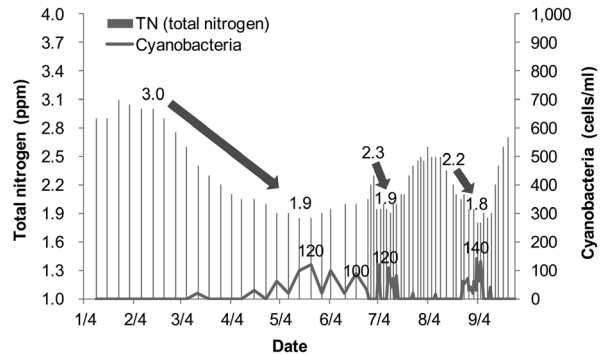
이와 같이 TP 농도가 증가할 때 남조류 개체수가 증가하여 TP 농도와 남조류 개체수는 양의 상관성을 가지는 것으로 판단되며, 이는 Downing 등¹¹⁾의 연구결과에서도 언급된 바가 있다.

3.2.2. 기온(Temperature)

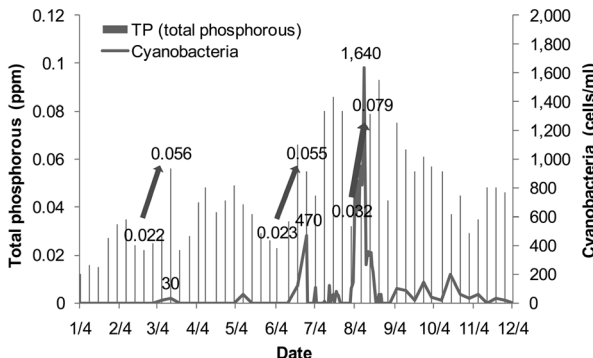
Fig. 4의 (a)와 (b)는 2012년과 2013년 기온변화에 따른 남



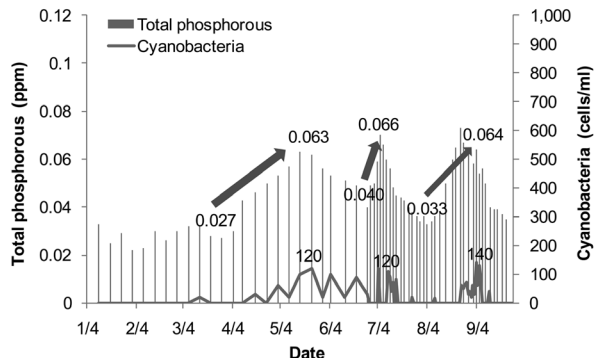
(a) Population density of *cyanobacteria* and concentration of TN in 2012



(b) Population density of *cyanobacteria* and concentration of TN in 2013

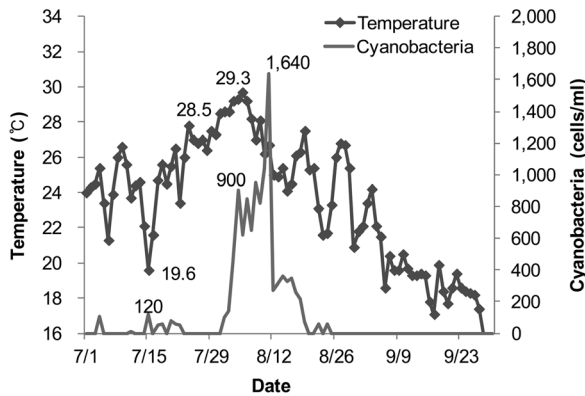


(c) Population density of *cyanobacteria* and concentration of TP in 2012

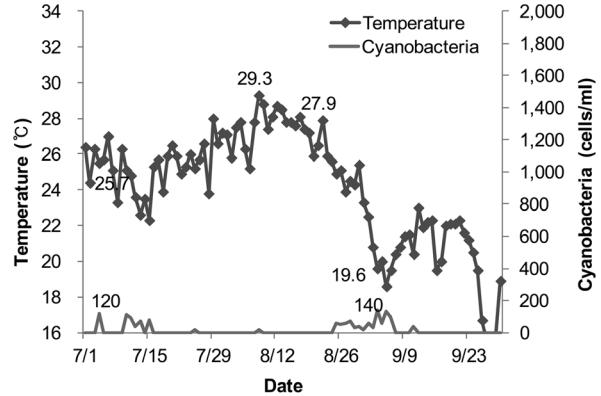


(d) Population density of *cyanobacteria* and concentration of TP in 2013

Fig. 3. Variation of population density of *cyanobacteria* with concentration of TN and TP from 2012 to 2013.



(a) Population density of *cyanobacteria* and temperature in 2012



(b) Population density of *cyanobacteria* and temperature in 2013

Fig. 4. Variation of population density of *cyanobacteria* with temperature from 2012 to 2013.

조류 발생정도를 나타낸 그래프이다. Fig. 4(a)에서 2012년 7월 중순 이후 기온이 상승하기 시작한 후 7월 말에 28.5°C 까지 증가하였으며, 8월 4일에는 29.3°C까지 상승하였다. 이 시기의 남조류 개체수는 900 cells/mL까지 상승하였으며, 8월 11일에는 최대 1,640 cells/mL까지 증가한 이후 급속하게 감소하였다.

한편, 2013년 7월초에 기온이 25.7°C일 경우에는 남조류 개체수는 120 cells/mL로 나타났으나, 8월 8일에 기온이 29.3°C까지 상승하였음에도 불구하고 남조류 개체수는 30 cells/mL로 거의 증가하지 않았다. 8월 중순 이후 기온이 급격히 감소하기 시작하면서 9월 초에 기온이 19.6°C로 낮아지자 남조류 개체수는 최대 140 cells/mL까지 상승하였다.

Robarts 등¹²⁾은 남조류의 최대 성장속도는 기온이 25°C 이상일 때 도달하고, 남조류의 최적기온(optimum temperature)은 녹조류와 규조류보다 높아 여름철에 많이 발생한다고 보고하였다. 본 연구결과에서는 2013년 7~8월 평균기온이 25°C 이상으로 나타났지만 2012년에 비하여 남조류 발생 정도가 1/10로 낮아지는 것으로 조사되었다. 유 등¹³⁾은 2011년 11월 28일~12월 30일 사이에 북한강 수계에서 기온상승 및 하강에 따른 남조류 개체수 증감을 조사한 결과, 수온이 4°C 이하인 경우에 남조류 개체수가 급격히 감소되어 기온이 남조류 발생에 큰 영향을 미친다는 연구결과를 발표하였다. 본 연구에서는 북한강 수계가 연결되는 한강유역에서 2012년 11월 28일~12월 30일 사이에 남조류는 최대 20 cells/mL로 거의 발생되지 않았으며, 오히려 여름철에 남조류가 우점하여 최대 1,640 cells/mL까지 증가하는 것으로 조사되었다.

3.2.3. 댐 방류량 및 강수량(Dam-discharge and Precipitation)

강수량이 적어 댐의 수위가 제한수위 미만으로 떨어지는 경우에는 방류를 하지 않는데, 방류량이 적을 경우에는 댐 내부의 정체시간이 증가되어 남조류 성장에 유익한 환경을 제공할 수도 있어 2012년과 2013년 강수량과 팔당댐 방류

량에 따른 남조류 발생정도를 평가하였다.

Fig. 5의 (b), (d)에서 보는 바와 같이 2013년 7월의 강수량이 871 mm가 2012년 7월 286 mm 보다 3배 이상 증가한 것으로 분석되었다. 특히, 2012년 7월 25일~29일, 7월 31일~8월 11일 시기에는 강수량이 없는 반면, 2013년 7월초에는 강수량이 지속적으로 증가하여 7월 15일에 최대 140 mm까지 상승하여 7월 하순까지 지속되었다.

Fig. 5의 (a), (c)에서 2013년 7월 방류량 82,327 cms로 2012년 7월 방류량 30,342 cms에 비해 2.7배 증가한 것으로 나타났다. 특히, 2012년 7월 21일~8월 13일 평균 방류량은 407 cms(최대 987 cms)로 2013년 7월 21일~8월 13일 평균 방류량 2239 cms(최대 6395 cms)의 18%만 방류하여 2012년 여름철에 남조류 개체수가 급속히 증가(최대 1,640 cells/mL)한 것으로 판단된다.

따라서, 2012년 7월 중순~8월 중순 시기에 낮은 강수량과 댐 방류량으로 댐 내의 정체시간 증가로 남조류 개체수가 2013년 비해 10배 이상 증가한 것으로 판단된다.

Liere 등¹⁴⁾에 의하면 동일한 조건에서 녹조류(Single-celled green algae)의 성장속도는 1.3~2.3 doublings/day, 규조류는 0.8~1.9 doublings/day, 남조류는 가장 낮은 0.3~1.4 doublings/day 성장속도를 가지는 것으로 알려져 있다. 여기서, doublings/day는 조류세포(algae cell)가 2배로 증가되는 시간을 하루를 기준으로 산정한 단위이다.

또한, 남조류의 성장속도는 많은 다른 종들보다 낮아 체류 시간이 높을수록 남조류 발생정도가 높은 것으로 나타났다.¹⁵⁾ 결론적으로, 2012년 여름철에 비해 2013년에 남조류 대 발생이 일어나지 않는 이유는 지속적인 댐 방류로 인해 체류시간이 짧아졌기 때문이다. 현행 댐 방류기준에 강수량에 따른 댐 제한수위 뿐만 아니라 남조류 개체수 발생 정도를 도입하여 원수에서 맛·냄새 물질 발생을 저감할 필요가 있다.

3.3. 남조류 우점 예측인자

조류경보제는 클로로필-a 농도와 남조류 세포수를 측정하

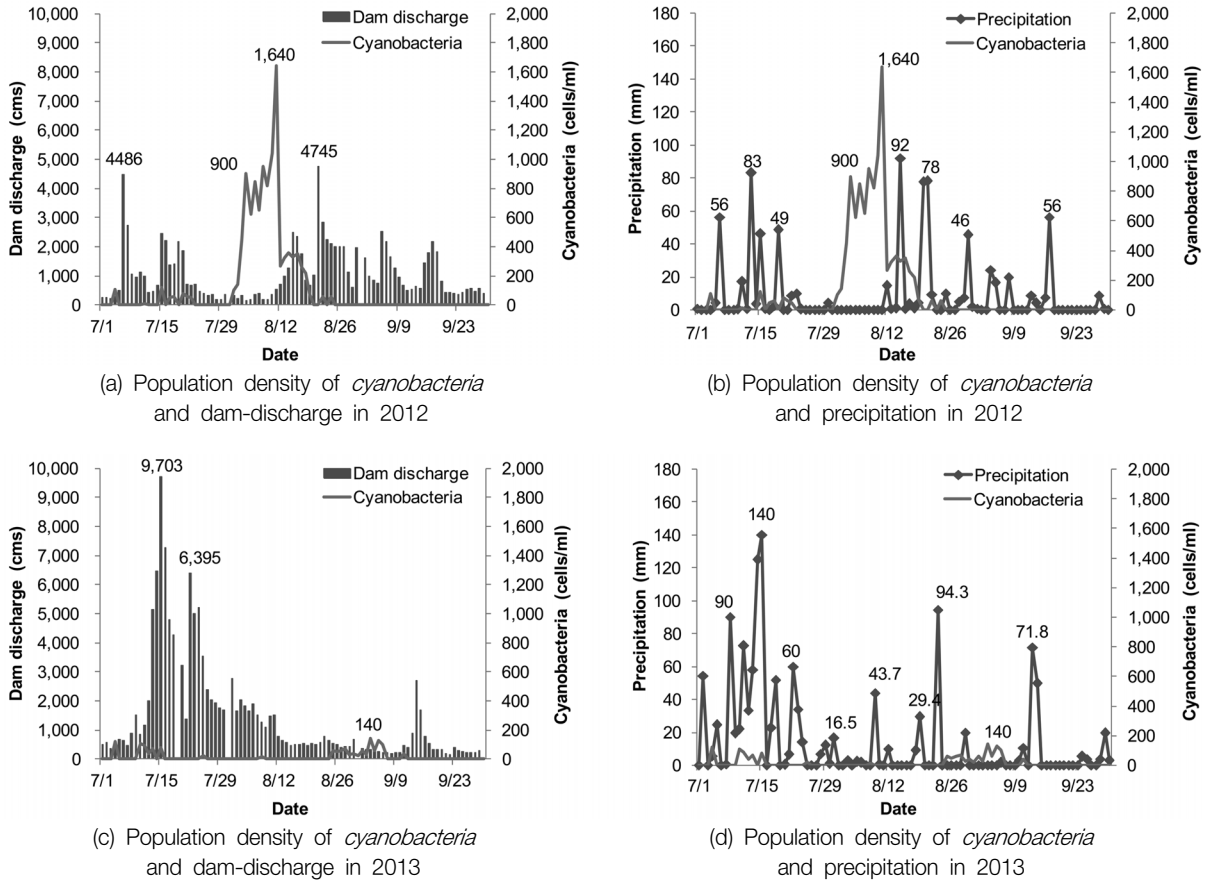


Fig. 5. Variation of population density of *cyanobacteria* with dam-discharge and precipitation from 2012 to 2013.

여 발령기준에 해당될 때 발령하는 제도이다. 클로로필-a 농도가 조류주의보 이상으로 검출된 경우, 정수장에서는 전염소 처리강화 및 이산화탄소를 투입하여 정수처리공정을 효율적으로 운영해야 한다. 그러나, 현 정수장에서의 중요한 관심사는 규조류가 아닌 남조류 발생에 따른 맛·냄새 물질을 효과적으로 제어하는 방안이기 때문에 남조류를 사전에 예측할 수 있는 보조지표를 도입할 필요가 있다.

앞서 언급한 결과에서와 같이 TN과 TP 농도가 남조류 발생과 상관성이 높은 것으로 나타났기 때문에 남조류 우점을 예측하기 위해 TN과 TP 수질항목을 이용하고자 한다. Fig.

6의 (a), (b)는 2012년, 2013년 TN:TP 비에 따른 남조류 개체수 변화를 나타낸 결과이다.

Fig. 6(a)에서와 같이 1월 중순~2월초에 TN:TP 비가 188에서 73, 2월 중순~3월 중순에는 111에서 40으로 감소하였지만, 남조류 개체수는 30 cells/mL 정도로 거의 증가하지 않았다. 그러나, 6월 초~6월 말에 TN:TP 비가 92에서 29로 감소된 경우에는 남조류 개체수가 470 cells/mL까지 증가하였으며, 8월 1일~22일에 TN:TP 비가 79에서 25로 감소된 경우에도 남조류 개체수가 최대 1,640 cells/mL까지 증가하였다. 한편, 2013년의 경우(Fig. 6 (b)), 2월 초~3월 중순에 TN:TP

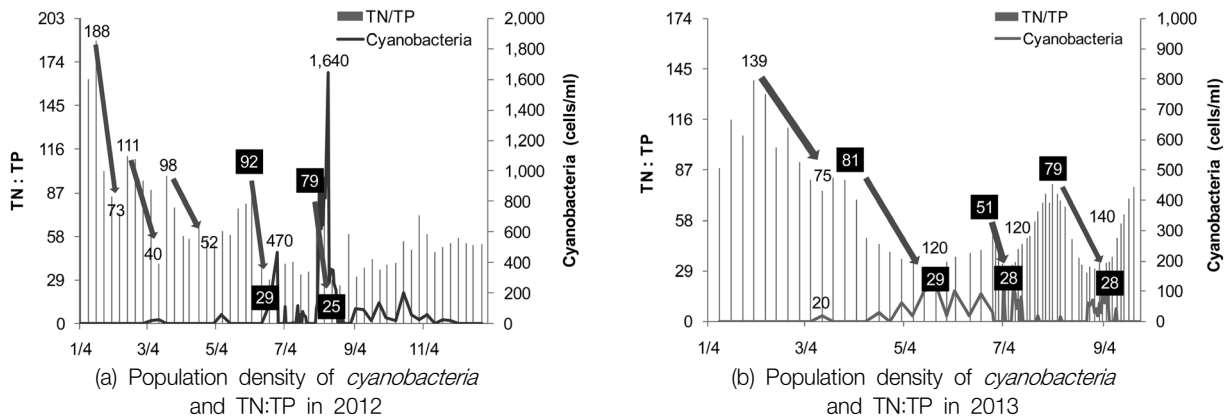


Fig. 6. Variation of population density of *cyanobacteria* with TN:TP ratio from 2012 to 2013.

Table 3. Proposed standard of *cyanobacteria* bloom warning system in the Hangang basin

Item	Attention	Warning	Bloom
Chlorophyll-a (mg/m ³)	over 15	over 25	over 10 ²
<i>Cyanobacteria</i> (cells/mL)	over 500	over 5,000	over 10 ⁶
$\frac{TN}{TP}$	below 29 (<i>Cyanobacteria</i> bloom)		

비가 139에서 75로 감소하였으나, 남조류 개체수는 20 cells/mL로 거의 증가하지 않았다. 그러나, TN:TP 비가 81에서 29로 감소된 3월 중순~5월 말에는 남조류 개체수가 120 cells/mL까지 증가하였으며, 6월 말~7월 초에는 51에서 28, 8월 초~9월 초에는 79에서 28로 낮아졌을 때 남조류 개체수는 각각 120 및 140 cells/mL까지 증가하였다.

결과적으로 2012년과 2013년 TN:TP 비가 29 이하로 낮아질 때 남조류 개체수가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 TN:TP비가 29:1 (by weight) 이하로 떨어질 때 남조류 개체수가 증가하고, 29:1 이상으로 증가할 때 감소한다는 Smith 등¹⁶⁾과 Liqiang 등¹⁷⁾의 연구와 유사한 결과인 것으로 나타났다. 또한, Amano 등¹⁸⁾도 TN:TP의 비가 0에 가까울 때 남조류인 마이크로시스티스의 성장이 최소화 되고, TN:TP의 비가 최적의 값을 나타낼 때 마이크로시스티스 성장이 최대화 된다는 연구결과도 TN:TP의 비가 남조류 우점과 상관성이 높다는 것을 알려주는 결과이다.

따라서, 현재 클로로필-a와 남조류 세포수로 발령하는 조류경보제에 Table 3과 같이 남조류 우점 예측인자인 TN:TP 농도 비를 도입하면 정수장에서 수질관리의 효율성이 높아져 시민들에게 안전하고 깨끗한 물을 공급할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서 제시한 남조류 우점 예측인자는 한강유역을 대상으로 모니터링을 하였기 때문에 한강유역 조류경보제에만 적용해야 할 것이며, 향후 타 유역에서도 모니터링을 실시하여 적용범위를 넓힐 필요가 있다고 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 남조류 발생의 영향인자를 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 계절변화에 따른 우점종을 분석한 결과, 총조류 중 규조류가 2012년은 93%, 2013년은 96%로 조사되어, 저수온기인 1~4월에 규조류가 많이 발생되었다. 녹조류는 5~6월에 많이 번식하였으며, 7~8월에는 규조류가 급격히 감소하고 남조류가 우점하는 것으로 조사되었다. 따라서, 정수장에서는 1~4월의 규조류 우점시에는 전염소를 강화하고 7~8월 남조류 우점시에는 중간염소를 강화하여 정수처리공정을 효율적으로 운영할 필요가 있다.

2) 남조류 발생 영향인자인 영양염류(TN, TP), 기온, 강수량, 댐 방류량을 분석한 결과, TN 농도와 남조류 개체수는

음의 상관성, TP 농도와 남조류 개체수는 양의 상관성이 있는 것으로 나타났다. 2013년은 2012년 보다 평균기온이 높았지만 남조류 개체수는 1/10 이하로 감소되어 남조류의 급격한 증가에 대한 기온의 영향은 낮은 것으로 나타났다. 또한, 2012년 7월 방류량은 2013년 7월에 비해 2.7배 낮아 댐 내의 체류시간 증가로 남조류 개체수가 2013년에 비해 10배 이상 상승한 것으로 조사되었다. 따라서, 남조류 발생을 사전에 억제하기 위해서는 남조류 발생정도를 댐 방류기준에 도입할 필요가 있다.

3) 2012년과 2013년에 TN, TP의 농도와 남조류 개체수의 상관성을 분석한 결과, TN:TP 비가 29 이상인 경우 남조류가 거의 발생되지 않았으며, 29 이하로 낮아질 때 남조류의 우점이 높아지는 것으로 나타났다. 따라서, 클로로필-a 농도와 남조류 개체수로 발령하는 한강유역 조류경보제에 남조류 예측인자인 TN:TP 농도 비를 도입하여 남조류 우점을 사전에 파악하여 정수처리공정의 효율성을 증대시킬 필요가 있다.

KSEE

Reference

- Schmetterer G., "Cyanobacterial respiration," In : Bryant DA (ed.) the molecular biology of *cyanobacteria*, Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, pp. 409~435(1994).
- Operating manual of algae warning system, seoul metropolitan government(2013).
- Gleitz, M., Greossmann, S., Scharekm, R. and Smetacek, V., "Ecology of diatom and bacterial assemblages in water associated with melting summer sea ice in the weddell sea, antarctica," *Antarctic Sci.*, **8**(2), 135~146(1996).
- Redfield, A. C., "On the proportions of organic derivations in sea water and their relation to the composition of plankton," In James Johnstone Memorial Volume, University Press of Liverpool, pp. 177~192(1934).
- Water quality and ecosystem conversation act, MOE(2014).
- Schindler, D. W., "Evolution of phosphorus limitation in lakes," *Science*, **195**, 260~262(1977).
- Smith, V. H., "Predictive models for the biomass of blue green algae in lakes," *Water Resour. Bulletin.*, **21**, 433~439 (1985).
- Testing standard for water quality pollution process, MOE (2012).
- Furnas, M. J., "In situ growth rates of marine phytoplankton : Approaches to measurement, community and species growth rates," *J. Plankton Res.*, **12**(6), 1117~1151(1990).
- Waterman, F., Hillebrand, H., Gerdes, G., Krumbein, W. E. and Sommer, U., "Competition between benthic *cyanobacteria* and diatoms as influenced by different grain sizes and temperatures," *Mar. Ecol. Prog. Series*, **87**, 77~87(1999).
- Downing, J. A., Watson, S. B. and McCauley, E., "Predicting *cyanobacteria* dominance in lakes," *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, **58**, 1905~1908(2001).

- 12 Robarts, R. D. and Zohary, T., "Temperature effects on photosynthetic capacity, respiration, and growth rates of bloom-forming *cyanobacteria*," *New Zealand J. Mar. Freshwater Res.*, **21**, 391~399(1987).
- 13 You, K. A., Byeon, M. S., Youn, S. J., Hwang, S. J. and Rhew, D. H., "Growth Characteristics of Blue green Algae (*Anabaena spiroides*) Causing Tastes and Odors in the North Han River," *KJEE*, **46**(1), 135~144(2013).
- 14 Van Liere, L. and Walsby, A. E., "Interactions of *cyanobacteria* with light," In: N.G. Carr and B. A. Whitton. Eds. *The Biology of the Cyanobacteria*, Blackwell Science Publications, Oxford, pp. 9~45(1982).
- 15 Reynolds, C. S., "The Ecology of Freshwater Phytoplankton," Cambridge University Press, UK, 384(1984).
- 16 Smith, V. H., "Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton," *Science*, **221**(4611), 669~671(1983).
- 17 Xie, L., Xie, P., Li, S., Tang, H. and Liu, H., "The low TN:TP ratio, a cause or a result of microcystis blooms?," *Water Res.*, **37**, 2073~2080(2003).
- 18 Amano, Y., Machida, M., Tatsumoto, H., George, D., Berk, S. and Taki, K., "prediction of microcystis blooms based on TN:TP ratio and lake origin," *Sci. World J.*, **8**, 558~572 (2008).