

낙동강 친수활동구간 유해 남조류 분포와 피코시아닌(Phycocyanin) 농도 상관성에 관한 연구

김효진^{a,†} · 김민경^b

부산광역시 보건환경연구원

A Study on the Correlation between the Harmful Cyanobacterial Density and Phycocyanin Concentration at Recreational Sites in Nakdong River

Hyo-Jin Kim^{a,†} · Min-Kyeong Kim^b

Busan Metropolitan City Institute of Health & Environment

(Received 19 September 2023, Revised 13 November 2023, Accepted 20 November 2023)

Abstract

Harmful cyanobacterial monitoring is time-consuming and requires skilled professionals. Recently, Phycocyanin, the accessory pigment unique to freshwater cyanobacteria, has been proposed as an indicator for the presence of cyanobacteria, with the advantage of rapid and simple measurement. The purpose of this research was to evaluate the correlation between the harmful cyanobacterial cell density and the concentration of phycocyanin and to consider how to use the real-time water quality monitoring system for algae bloom monitoring. In the downstream of the Nakdong River, *Microcystis* spp. showed maximum cell density (99 %) in harmful cyanobacteria (four target genera). A strong correlation between phycocyanin(measured in the laboratory) concentrations and harmful cyanobacterial cell density was observed ($r = 0.90$, $p < 0.001$), while a weaker relationship ($r = 0.65$, $p < 0.001$) resulted between chlorophyll a concentration and harmful cyanobacterial cell density. As a result of comparing the phycocyanin concentration (measured in submersible fluorescence sensor) and harmful cyanobacterial cell density, the error range increased as the number of cyanobacteria cells increased. Before opening the estuary bank, the diurnal variations of phycocyanin concentrations did not mix by depth, and in the case of the surface layer, a pattern of increase and decrease over time was shown. This study is the result of analysis when *Microcystis* spp. is dominant in downstream of Nakdong River in summer, therefore the correlation between the harmful cyanobacteria density and phycocyanin concentrations should be more generalized through spatio-temporal expansion.

Key words : Harmful cyanobacteria, Nakdong River, Phycocyanin, Real-time measurement

^a Corresponding author, 환경연구사(Researcher), hyojin1@korea.kr, <https://orcid.org/0009-0007-1410-6112>

^b 환경연구사(Researcher), kmink@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0002-9369-8086>

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, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

녹조는 하천과 호소 등에서 조류가 대량으로 증식하는 현상(Water bloom)을 말하며, 조류의 범주에 속하는 모든 종들은 Water bloom을 일으킬 수 있는 잠재력을 지니고 있다고 볼 수 있는데(ME, 2014), 이 중에서 남조류의 대량 증식에 의한 녹조가 대표적이라 할 수 있다.

남조류는 남세균(Cyanobacteria)이라고도 하는 원핵생물로서 세포 내에 핵막 등 세포기관이 발달하지 않아 세균의 형태에 가까우나 엽록소가 있어 광합성을 통해 성장하고 이분법으로 번식한다. 또한 체내에 기낭(Gas vesicle)을 가지고 있어 물 표면에 부유하는 특성이 있으며, 모양이 사상형(Filamentous)의 종인 경우 이형세포(Heterocyte)가 존재해서 공기 중의 질소를 고정할 수 있다(ME, 2014). 이러한 남조류는 질소와 인의 저장능, 세포 내 기낭 등 다른 조류와 구별되는 특성을 가지고 있어 빈영양상태에서 과영양상태까지 매우 다양한 환경에서 서식하면서(Gallon, 1992; Whitton, 2012), 일부는 특이한 맛이나 냄새를 유발하고 마이크로시스틴 등 독소 물질을 생산하는 것으로 알려져 있다.

최근 전 세계적인 이상 기후로 인해 유해 남조류의 출현 및 지속 기간이 점진적으로 변화하고 있고 국내 주요 하천 호소 등에서도 다양한 기상요인과 수리수문학적 환경요인에 따라 남조류 발생이 지점별, 시기별로 다양한 변화 특성을 나타내고 있어 지속적인 모니터링과 관리가 필요하다(Lee, 2022).

환경부는 조류 발생에 따른 정수처리 기능 저하 및 일부 남조류의 독성피해를 최소화하기 위해 수계별 경보체계 구축을 통해 상수원 및 친수활동의 안전성 확보를 위한 조류경보제를 운영하고 있다. 단계별 경보 발령은 독성물질 등을 생산하는 유해 남조류[마이크로시스티스(*Microcystis*), 아나베나(*Anabaena*), 아파니조메논(*Aphanizomenon*), 오실라토리아(*Oscillatoria*) 속(屬)] 세포수의 합이 제시된 기준에 해당될 때 발령을 한다(NIER, 2020). 이러한 기준 초과 여부 판단은 시료를 직접 채수하여 실험실에서 현미경을 이용한 조류동정과 계수를 통해 판단하고 있으나, 현미경 검경에 숙련된 전문인력이 필요하고, 많은 시간이 소요되어 급격한 조류 증식에 신속한 대응이 어려워, 최근 국내에서도 시공간적 변이가 큰 조류 발생에 대응하기 위해 남조류 보조색소인 피코시아닌(Phycocyanin) 등을 활용한 간편한 지표들이 제안되고 있다(Ahn et al., 2007; Park et al., 2015).

최근 남조류 모니터링 기술 중 현장에서의 형광 측정센서를 활용한 기술은 남조류 색소에서 방출한 고유의 파장을 이용하여 신속하고 비침습적으로 정량 분석하는 방법으로 현미경 검경이나 색소 추출과 같은 기존 모니터링 방법에 비해 비용과 공간적 및 시간적인 측면에서 많은 장점을 가지고 있다(Rousso et al., 2022). 하지만 실시간 남조류 측정치와 조류 밀도 간의 비교 사례가 충분하지 않아 조류경보제 지표로서 타당성 연구는 매우 제한적이다.

이에 본 연구에서는 낙동강 하류 친수활동 구간을 대상으로 유해 남조류 4속의 출현량과 조류 지표인 클로로필 *a*, 피코시아닌 농도를 비교 분석하여 남조류 모니터링에 피코시아닌이 적합한 인자인지 평가하였다. 또한 현장에서 실시간으로 모니터링된 남조류 피코시아닌 농도와 남조류 세포수와의 상관성을 분석하여 향후 녹조 모니터링에 실시간 수집된 데이터를 활용할 수 있는 기초자료를 확보하고자 한다.

2. Materials and Methods

2.1 조사지역 및 조사기간

본 연구는 2022년 하절기 녹조 발생량이 많았던 낙동강 하류구간에서 수상레저 활동 등 친수 활동을 하는 생태공원 2지점(화명생태공원 35°22'63.9"N, 128°99'74.7"E, 삼락생태공원 35°16'83.9"N, 128°96'40.7"E)과 구포대교(35°20'57.9"N, 128°99'12.2"E) 지점을 대상으로 하였다(Fig. 1). 시료는 2022년 6월부터 9월까지 선박에서 조류경보제 운영 매뉴얼의 시료 채취 방법에 따라 반톤채수기나 비커를 사용하여 수표면이 포함되도록 50 cm 이내 표층수를 주 1회 채수하였다.

2.2 분석방법

수온, pH, 용존산소 등은 시료 채취와 동시에 다항목 수질 측정기(기술과 환경, M-3000)을 이용하여 현장에서 측정하였으며, 투명도는 직사광선을 피해 배의 그늘 등에서 투명도판을 이용하여 측정하였다. 채취한 시료는 4°C 냉장으로 보관하여 실험실로 운반하여 분석하였으며 탁도, 클로로필 *a* 농도는 수질오염공정시험기준에 따라 측정하였다(ME, 2022). 조류분석을 위한 시료는 현장에서 루골용액을 (시료의 1~2%) 가하여 냉장으로 보관하여 실험실로 운반하였다.

2.2.1 남조류 세포수 검정

침강성이 좋지 않은 남조류는 현장에서 루골용액으로 고정 후 희석하거나 일정량을 플랑크톤 넷트 또는 핸드 넷트로 걸러 일정 배율로 농축하여 시료로 하였으며, 현미경(Axio Imager A2, Carl Zeiss, Germany) 검경 배율 100배~1,000배 시야에서 세포의 형태와 내부구조 등의 미세한 사항을 관찰하면서 남조류의 종류를 조사하였다. 세포수 계수는 Sedwick-Rafter chamber에서 일정한 크기의 격자를 반복 계수하며 1 mL의 세포수를 산출하였으며, 군체를 형성하여 정확한 계수가 어려운 *Microcystis* 속은 1차로 동정 후 초음파 파쇄기(Sonics & Materials, Inc., US/VCX500)로 군체를 깬 다음 2차 계수를 실시하였다.

2.2.2 피코시아닌 분석

국내 공정시험기준 중 피코시아닌 농도 측정에 대해 규정된 시험법은 따로 없으며, 해외에서는 주로 Sarada et al. (1999)가 제시한 5가지 피코시아닌 색소 추출법에 기초하고 있는데, 5가지 추출 방법은 증류수를 이용한 자연 추출, 외력을 통한 세포벽 파쇄를 통한 추출, 동결·해동을 이용한 추출, 분쇄기기를 이용한 추출, 염산 등을 활용한 추출법으로 구분할 수 있다.

Ha et al. (2016)의 국내 선행 연구에서 Sarada et al. (1999)의 동결 및 해동 방법을 바탕으로 피코시아닌 색소의



Fig. 1. Sampling sites in the study.

회수율을 높이기 위한 연구를 수행하였으며, 회수율을 비교하기 위해 여과지 사용 여부, 동결 및 해동 횟수, 초음파 파쇄 조건, 사전 균질화 시간 등의 조건을 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 Ha et al. (2016)의 피코시아닌 추출 방법을 이용하여 남조류 피코시아닌 농도를 분석하였다. 분석을 위해 농축한 시료 30 mL를 분취하여 50 mL 원심분리관에 담은 후, 200 W의 초음파를 이용하여 5초간 3회 파쇄하여 시료를 균질화하였다. 원심분리기를 이용하여 5°C로 유지한 후 4,000 rpm의 속도로 15분간 원심 분리 후, 상등액을 제거하고 phosphate buffer (pH 7.2) 용액 5 mL를 넣은 후 - 20°C에서 24시간 동결하였다. 시료는 상온에서 자연해동을 하였으며, 색소가 buffer 용액에 잘 스며 나오도록 진탕배양기를 이용하여 37°C 환경에서 15분간 교반하였다. 이후 동일한 조건으로 2차 원심분리 과정을 통해 색소가 추출된 시료의 상등액을 적당량 분취하여 분광광도계 (SHIMADZU, UV-2450)를 이용하여 620 nm와 652 nm 파장의 흡광도를 측정하였으며, Bennett and Bogorad (1973)가 제안한 식 (1)에 적용하여 농도 값을 계산하고, 현장 시료 농축 배수를 고려하여 최종 농도값을 도출하였다.

$$Phycocyanin(mg/m^3) = \left[\left\{ \frac{OD_{620} - (0.474 \times OD_{652})}{5.34} \right\} \times V_1 \right] / V_2 \quad (1)$$

OD_λ = λ 파장에서의 흡광도(Optical Density)

V_1 = 상등액의 양(mL)

V_2 = 여과한 시료의 양(L)

2.2.3 실시간 피코시아닌 모니터링

일반적으로 식물 플랑크톤의 현존량을 평가하는 기법에는 모든 식물 플랑크톤이 클로로필 *a*를 갖고 있으므로 이를 정량화하여 현존량을 추정하는 기법을 가장 보편적으로 사용하고 있다(Lorenzen, 1967; Richards and Thompson, 1952). 엽록소는 엽록체 내의 틸라코이드막에서 단백질과 비공유결합 상태로 존재하며, 이를 엽록소-단백질 복합체(chlorophyll-protein complex, CP복합체)라고 한다. 광의 흡수에 의해 여기상태에 있는 CP 복합체의 엽록소 분자의 에너지는 일부가 광합성에 이용되고 나머지는 형광, 인광 또는 열로 방출되고 기저상태로 된다. 이 때 형광의 주요원은 pigment-protein complex로서 주로 제2광계에서 방출되며, 이러한 원리를 이용하여 형광스펙트럼을 분석함으로써 식물 플랑크톤의 광합성활성에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다(Eullaffroy and Vernet, 2003; Lichtenthaler, 1988).

남조류의 경우 엽록소 *a* 이외에 보조 색소인 Phycocyanin과 Phycoerythrocyanin이 특이적으로 존재하여 이들 색소를 분석함으로써 남조류의 정량 및 정성 분석에 활용되어 왔다 (ME, 2010).

피코시아닌은 남조류 고유의 보조 광합성 색소로 피코시아닌 형광은 고유의 여기 및 방출 파장을 가지고 있다(Roussou et al., 2022). 현장에서 형광측정센서를 이용하여 남조류에 청색 파장의 빛을 조사하면 일부를 흡수하고 적색 파장의 빛을 방출하게 되는데 남조류가 많을수록 더 많은 적색 파장의 빛이 생성되므로 이를 이용하여 남조류의 양을 측정할 수 있는 기법으로, excitation (590 nm), emission (≥ 645 nm) 파장의 형광측정장치(Cyclops-7, Turner Designs, USA)를 이용



Fig. 2. Location of in-situ cyanobacterial fluorescence sensor.

하여 측정하고 있으며, 표층에서 수심 10 m 지점까지 센서가 이동하며 측정된 자료를 사용하였다. 측정 센서는 낙동강 하굿둑 상류 12 km 구포대교(P19)에 설치되어 있으며, 피코시아닌 이외에 염분, 전도도, DO, pH, 수온도 함께 실시간 모니터링 데이터를 수집하고 있다(Fig. 2).

수집된 데이터 중 남조류 세포수가 조류경보제 친수활동 구간 관심 단계(2회 연속 채취 시 남조류 세포수 20,000 cells/mL 이상, 100,000 cells/mL 미만)를 초과하는 7월에서 8월 중 수심별 평균자료를 이용하였으며, 결측일이 포함된 기간은 제외하였다.

2.3 자료수집 및 분석자료 통계 처리

평균기온, 강수량, 일사량 등 기상관측자료는 기상청 기상자료개방포털 부산관측소 자료를 활용하였으며, 낙동강 하류 유량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템 (WAMIS) 낙동강 구포대교 자료를 사용하였다. 남조류 세포수와 수질인자를 이용하여 회귀분석을 실시하여 회귀식을 도출하였으며, 항목별 상관분석은 'R 4.1.3 for Windows'를 사용하였다.

3. Results and Discussion

3.1 낙동강 하류 수질 평가

2022년 여름은 예년에 비해 기온이 높고 일사량이 많아 수온이 높은 상태로 유지되고 강우량이 감소하여, 조류번성에 적합한 환경이 지속되었다(Fig. 3).

낙동강 하류 (물금취수장 인근~하굿둑 상류 2 km 구간) 5 지점의 수질을 월 1회 모니터링한 결과, 환경정책기본법 시행령 하천의 생활환경 기준 BOD 등급은 6월까지 I b (좋음) 등급을 유지하다가 7월 III(보통) 등급, 8월 II(약간 좋음) 등급, 9월 이후 감소추세를 보이는 것으로 나타났으며, 총 인의 농도 역시 상승추세를 보이다가 8월, 9월 III(보통) 등급을 나타낸 후 이후 감소하는 경향을 보였다. 전체 조류 현존량인 클로로필 *a* 농도는 하절기 증가추세를 보였으며, 한국형 부영양화 지수(TSI_{KO}) 산출 결과, 연중 부영양 상태로 나타난다 7월~8월 과영양 상태로 나타났다(Table 1, Fig. 4).

3.2 낙동강 하류 식물 플랑크톤 군집 특성

낙동강 하류의 연중 식물 플랑크톤의 발생 및 종 천이 패턴은 1분기 *Stephanodiscus* 속, *Synedra* 속 등 규조류 출현이 증가하다가 6월 수온 상승 및 일조량 증가로 *Microcystis* 속 등 남조류 증가하기 시작하였고, 7월 평균(299,830 cells/mL), 8월 평균 (111,404 cells/mL) 등 하절기 남조류 대량 발생으로 녹조현상이 나타났다(Fig. 5).

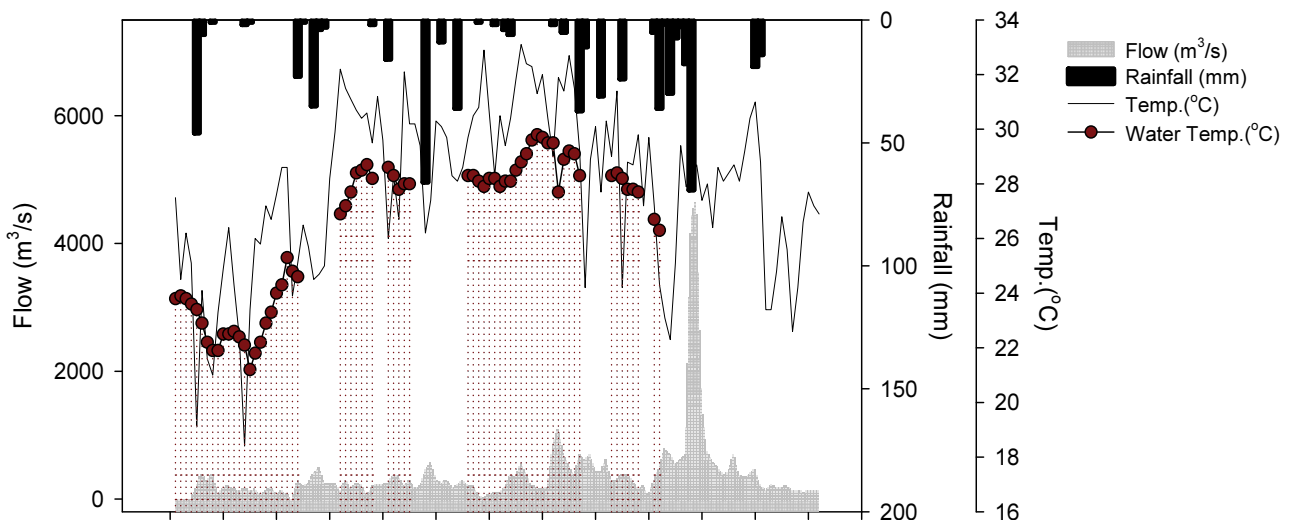


Fig. 3. Seasonal variations of flow, rainfall, temperature.

Table 1. Concentration of water quality parameters

	Organic matter (mg/L)		T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	Chlorophyll <i>a</i> (mg/m ³)	TSI _{KO} *
	BOD	TOC				
Mean±SD	1.8 ± 0.9	3.7 ± 0.5	2.487 ± 0.700	0.052 ± 0.035	23.5 ± 21.3	58 ± 9
Min.	0.8	3.1	1.336	0.027	6.3	50
Max.	3.8	4.7	3.517	0.117	77.8	75

*TSI_{KO} (The Korean Trophic State Index) : mesotrophic(30 < TSI_{KO} ≤ 50), eutrophic(50 < TSI_{KO} ≤ 70), hyper eutrophic(> 70)

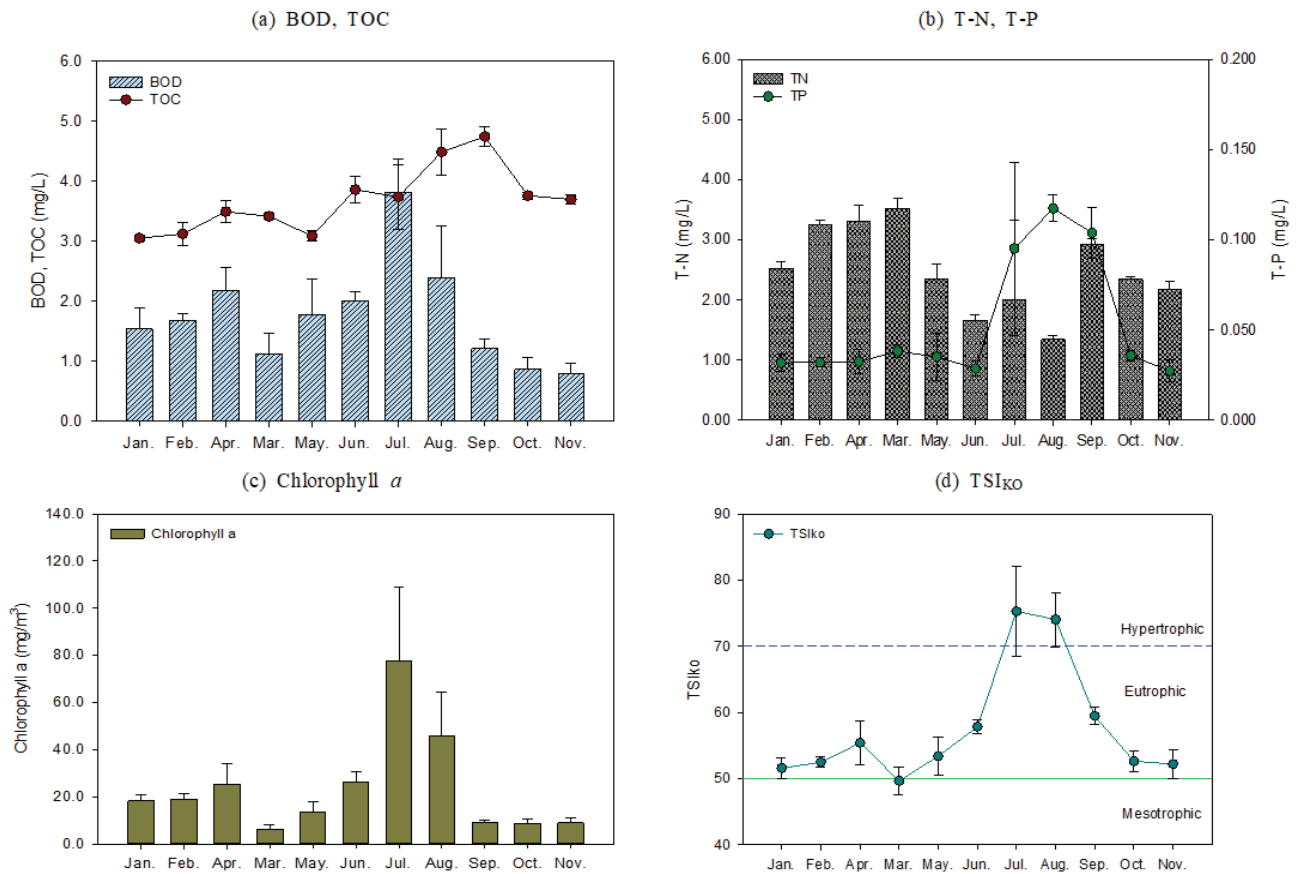


Fig. 4. The Seasonal variations of (a) organic matter, (b) T-N, T-P, (c) Chlorophyll *a*, (d) TSI_{KO} in the Nakdong River downstream.

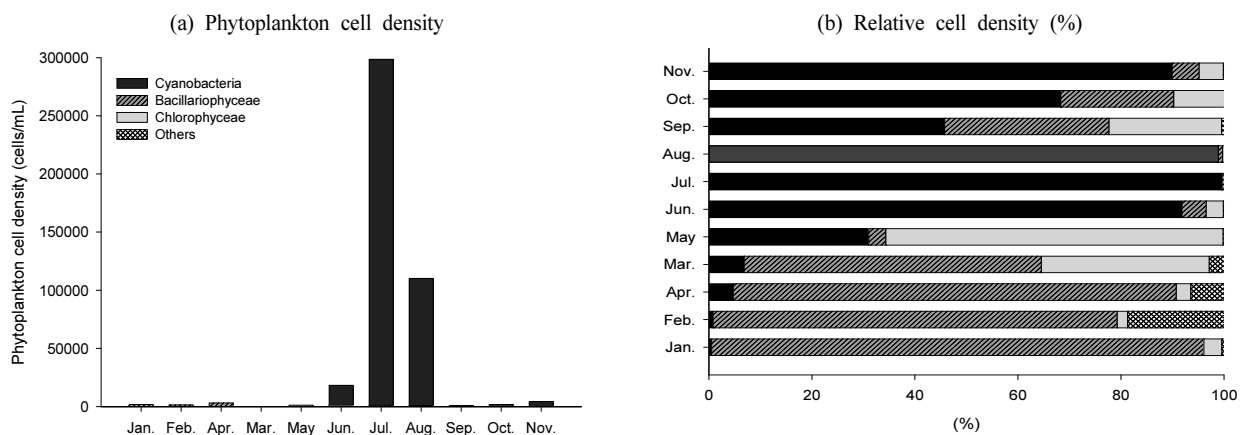


Fig. 5. The Seasonal variations of phytoplankton (a) Phytoplankton cell density, (b) Relative cell density (%) in the Nakdong River downstream.

3.3 하절기 친수활동구간 유해 남조류 분포

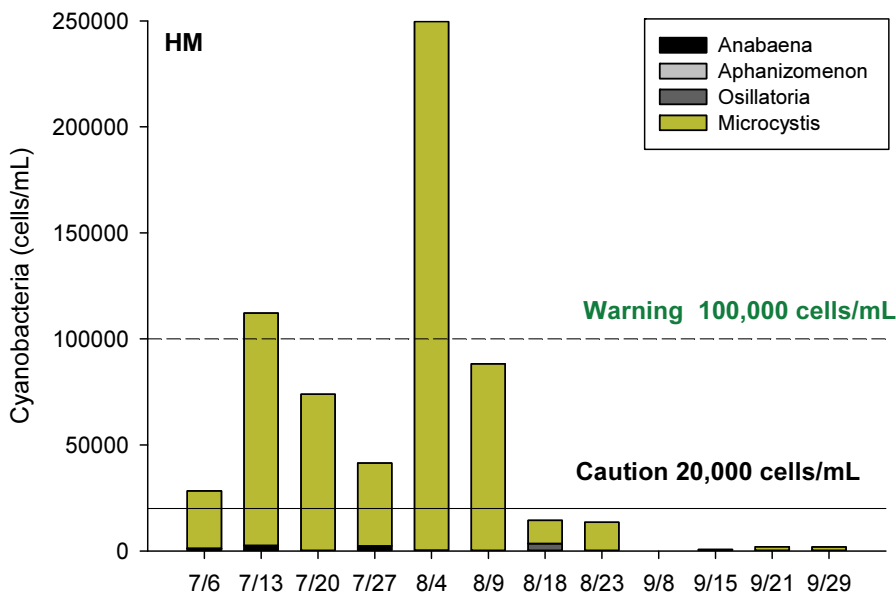
3.3.1 유해 남조류 발생 및 수질 인자

낙동강 하류 친수활동 구간 화명생태공원과 삼락생태공원 및 실시간 피코시아닌 모니터링 시스템이 설치된 구포대교 지점에 대해 하절기(7월~9월) 주 1회 유해 남조류 4속 (*Anabaena* 속, *Aphanizomenon* 속, *Microcystis* 속, *Oscillatoria* 속) 세포수 및 수질 모니터링을 실시하였다. 유해 남조류 세포수 분포는 화명생태공원(276~662,103) cells/mL, 삼락생태공원(241~155,812) cells/mL, 구포대교(99~239,072) cells/mL로 나타났으며, 세 지점 모두 *Microcystis* 속이 전체 유해 남조류 중 99%를 차지하는 것으로 나타났다. 친수활동

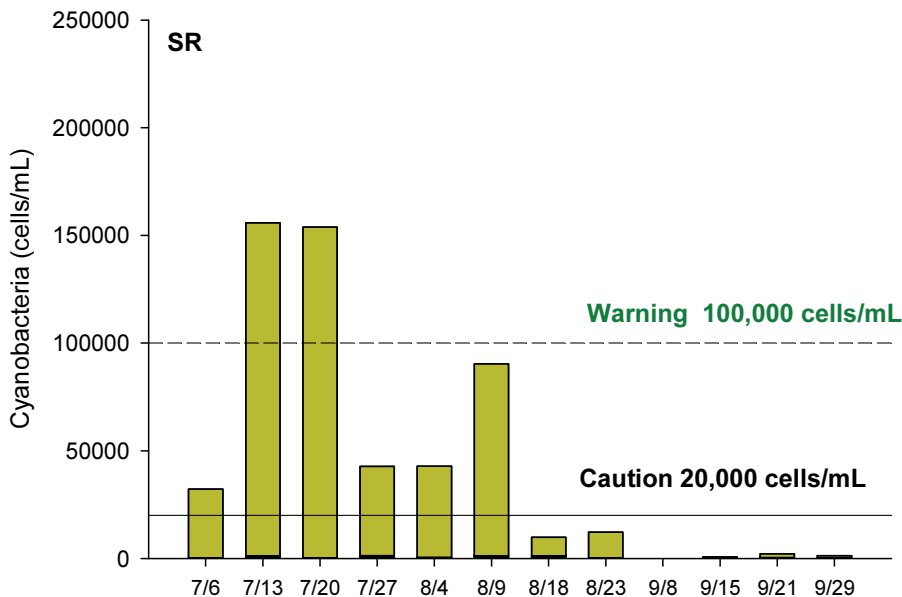
구간의 조류경보제 발령단계 관심 수준에 해당하는 20,000 cells/mL 이상의 세포수는 세 지점 모두 7월 6일에서 8월 9일까지 지속된 것으로 나타났으며, 8월 10일 이후 중부지방 집중 호우에 따른 보와 하굿둑 개방으로 본류 내 세포수가 감소한 것으로 나타났다(Fig. 6).

전체 조류 현존량을 나타내는 클로로필 *a*의 농도 분포는 화명생태공원 (6.3~144.3) mg/m³, 삼락생태공원 (5.8~70.2) mg/m³, 구포대교 (7.9~100.6) mg/m³의 분포를 보였고, 남조류의 보조 색소로서 남조류 고유의 남색을 띄게 하는 피코시아닌의 농도는 화명생태공원(0.01~2.94) mg/m³, 삼락생태공원(0.01~0.85) mg/m³, 구포대교(0.02~0.96) mg/m³의 분포

(a) Hwamyung Ecological Park



(b) Samrak Ecological Park



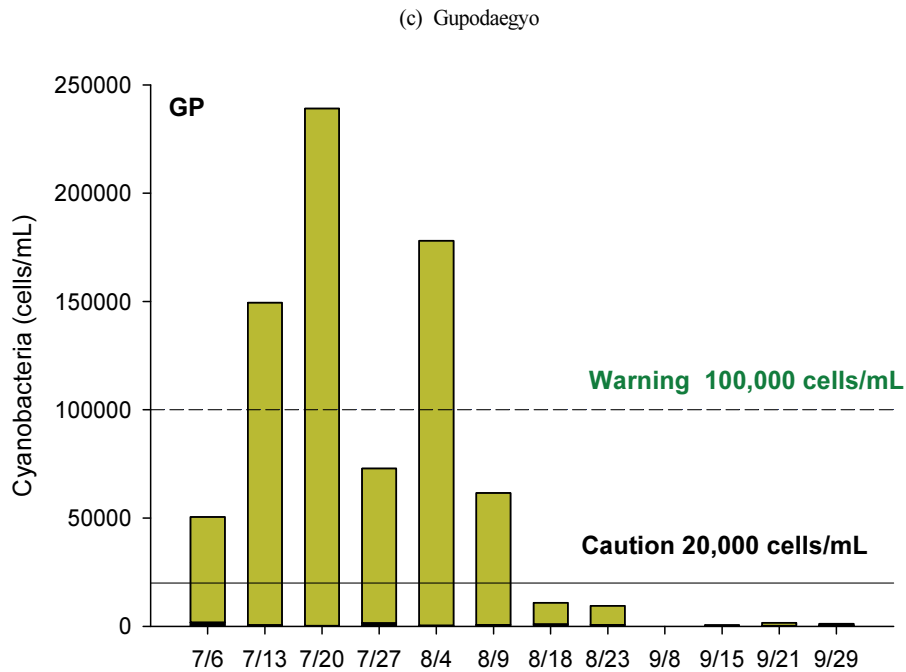


Fig. 6. Temporal variations of four-genera of harmful cyanobacteria (cells/mL). (a) Hwamyung Ecological Park, (b) Samrak Ecological Park, (c) Gupodaegyo.

를 보였다.

지점별 유해 남조류 세포수와 조류 현존량 지표인 클로로필 *a*과 피코시아닌 농도 분포는 화명생태공원이 가장 높은 것으로 나타났으며, 하류 방향인 삼락생태공원이 낮은 것으로 나타났다. 가장 많은 세포수가 조사된 날은 화명(8.4, 662,103 cells/mL), 삼락(7.13, 155,812 cells/mL), 구포(7.20, 239,072 cells/mL)로 지점별로 일치하지 않는 것으로 나타났다(Table 2, Fig. 7).

3.3.2 유해 남조류 발생량과 피코시아닌 및 수질 인자의 상관분석

유해 남조류 4속의 세포수와 남조류 보조색소인 피코시아닌 및 주요 수질 인자와의 상관관계 분석을 실시하였다. 분석은 수질 자료가 정규분포를 나타내지 않아 비모수 상관분석에 의한 Spearman correlation coefficient를 산출하였다. 분석 결과, 유의수준 $p\text{-value} < 0.001$ 에서 유해 남조류 세포수는 우점종인 *Microcystis* 속, 피코시아닌 농도, 수온 및 pH

Table 2. Summary statistics of the harmful cyanobacteria, water quality in the study area

	Mean ± SD	Min.	Max.
Temp (°C)	28.0 ± 2.7	23.6	32.7
pH	8.5 ± 0.9	6.4	10.2
DO (mg/L)	8.1 ± 1.7	6.0	14.0
Conductivity (µS/cm)	274 ± 70	165	387
Salinity	0.13 ± 0.03	0.08	0.18
Turbidity (NTU)	14.06 ± 14.81	3.60	83.30
Transparency (m)	0.9 ± 0.3	0.4	1.5
Chlorophyll <i>a</i> (mg/m ³)	49.5 ± 32.0	5.8	144.3
Phycocyanin (mg/m ³)	0.31 ± 0.51	0.01	2.94
4-genera of harmful cyanobacteria (cells/mL)	62,128 ± 114,956	99	662,103
<i>Anabaena</i> spp.	502 ± 785	0	2,694
<i>Aphanizomenon</i> spp.	199 ± 402	0	2,159
<i>Microcystis</i> spp.	61,236 ± 115,053	28	661,818
<i>Oscillatoria</i> spp.	192 ± 560	0	3,230

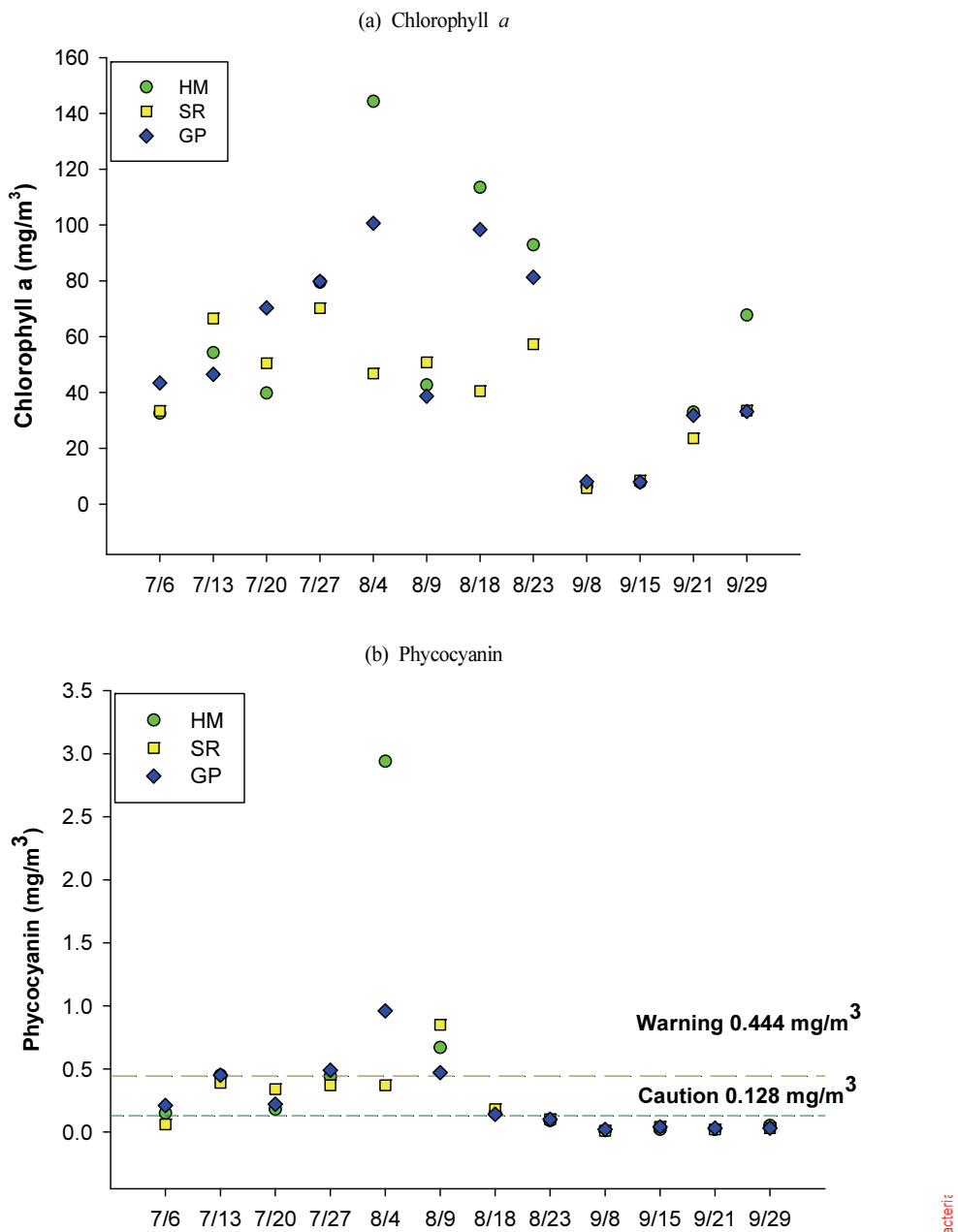


Fig. 7. Temporal variations of (a) Chlorophyll *a*, (b) Phycocyanin.

와 상관성이 높은 것으로 나타났고, 클로로필 *a* 농도는 피코시아닌에 비해 상관성이 낮은 것으로 나타났다(Fig. 8, Table 3, Table 4).

클로로필 *a*, 피코시아닌 농도와 유해 남조류 세포수의 단순회귀 분석 결과, 결정계수(r^2)는 클로로필 *a*가 0.3683 피코시아닌이 0.8455로 나타났고 세포수가 증가함에 따라 클로로필 *a*의 오차 범위가 피코시아닌보다 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 9). 또한 계절적으로 규조류가 우점을 보였던 1월~3월의 클로로필 *a* 농도가 전체 식물 플랑크톤 세포수가 증가하는 4월~6월 보다 높게 나타난 것으로 볼 때 남조류를 모니터링하기 위해서는 전체 조류 현존량 지표인 클로로필 *a* 보다는 피코시아닌이 더 유용한 지표라 사료된다(Fig. 4, Fig. 5).

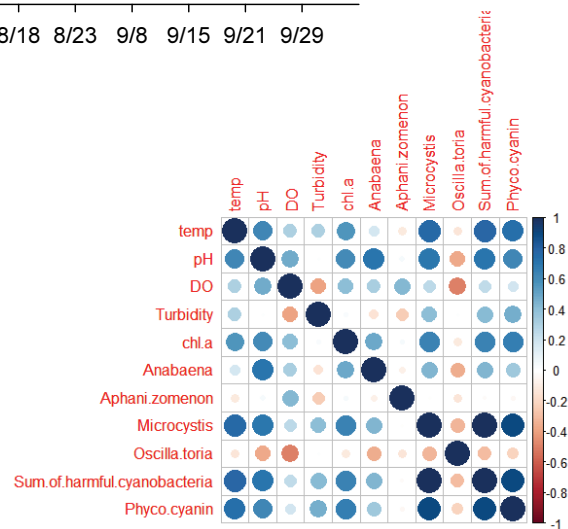


Fig. 8. Correlation coefficient between water quality factors and cyanobacterial cell density in the study area.

Table 3. The correlation coefficient between Harmful cyanobacteria (4-genera) and water quality in the study area

	Temp.	pH	Turbidity	Chlorophyll <i>a</i>	<i>Microcystis</i> spp.	phycocyanin
<i>r</i>	0.7720	0.7047	0.4150	0.6458	0.9987	0.8999
p-value	0.0000	0.0000	0.0118	0.0000	0.0000	0.0000

Table 4. Correlation coefficient between phycocyanin and water quality in the study area

	Temp.	pH	Turbidity	Chlorophyll <i>a</i>	<i>Microcystis</i> spp.	Harmful cyanobacteria (4-genera)
<i>r</i>	0.7302	0.6229	0.4670	0.6685	0.8967	0.8999
p-value	0.0000	0.0000	0.0041	0.0000	0.0000	0.0000

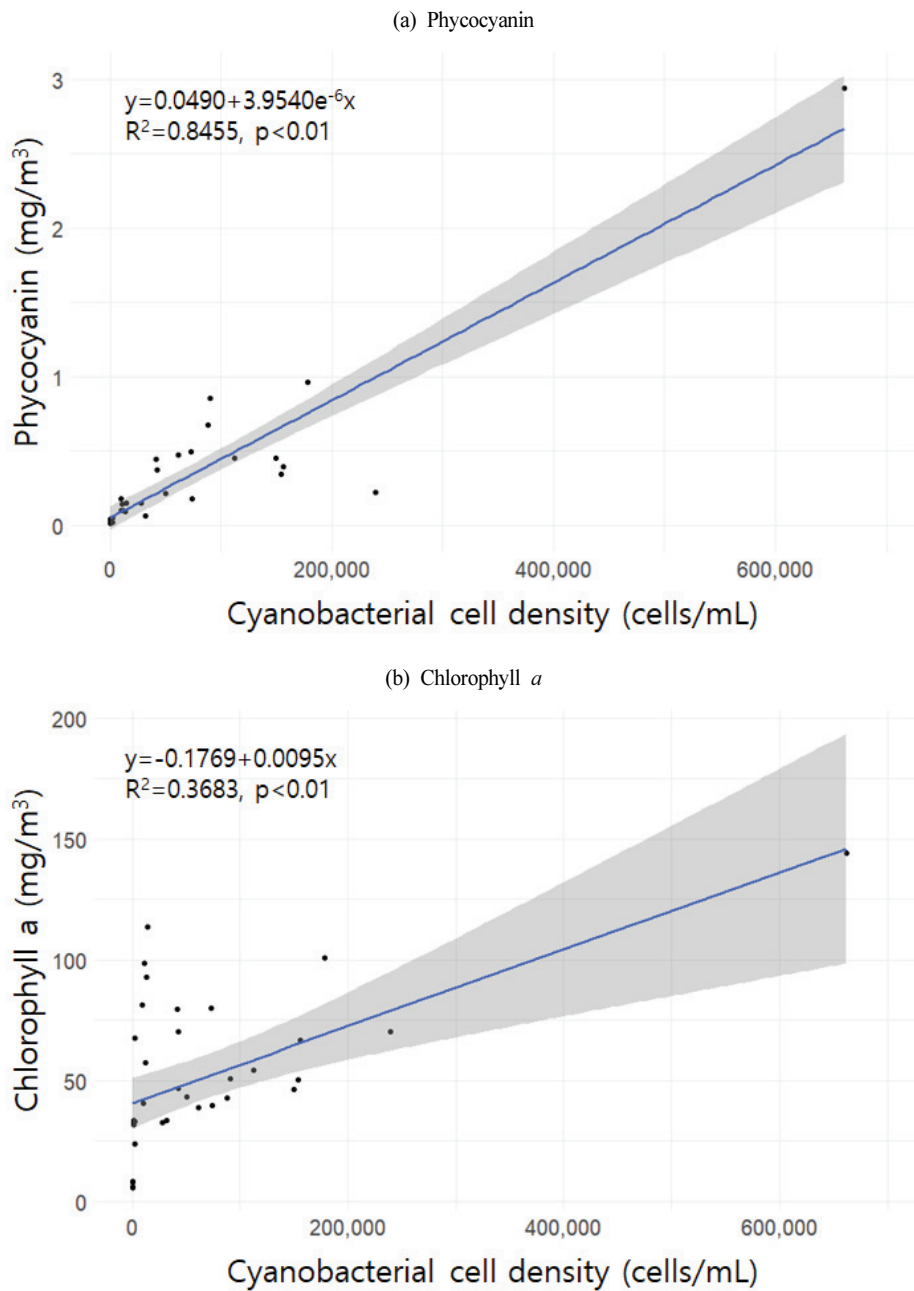


Fig. 9. Relationship between cyanobacterial cell density and (a) Phycocyanin, (b) Chlorophyll *a*.

피코시아닌 추출법 결과와 세포수를 바탕으로 산출한 상관식에 친수활동구간 관심, 경계 경보기준인 20,000 cells/mL, 100,000 cells/mL의 피코시아닌 농도 값을 산출한 결과 각각 0.128 mg/m³, 0.444 mg/m³으로 나타났다. 조사기간 중 세포수 20,000 cells/mL 이상을 보인 지점 중 피코시아닌 농도 값이 0.128 mg/m³ 이상으로 나타난 경우가 94.4%, 세포수 100,000 cells/mL 이상을 나타내면서 피코시아닌 농도 값이 0.444 mg/m³ 이상으로 나타난 경우가 57.1%로 관심 단계 수준에서 세포수와 피코시아닌 농도 간에 좀 더 유의미한 결과를 도출할 수 있었으며, 이는 집락을 형성하는 *Microcystis* 속 등 남조류의 발생 정도가 심할 때 세포의 다양한 크기와 형태에 따라 피코시아닌 함량이 달라질 수 있기 때문이라 판단된다.

3.4 실시간 모니터링 결과를 활용한 녹조 발생 시기 남조류 변동

조사대상 구간인 낙동강 하류에서 실험실 분석 결과인 피코시아닌 농도와 남조류 세포수가 유의미한 상관성을 나타내고 있으나, 실시간으로 측정되는 피코시아닌 농도와 남조류 세포수 분포 간의 조사 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이에 실시간 수집되는 결과가 남조류 세포수와 어느 정도 상관성이 있는지 알아보고자 구포대교에서 실시간으로 측정된 피코시아닌 농도와 세포수간의 비교 분석을 실시하였으며, 조사 대상 기간은 기기 점검 및 기상 상황 등으로 결측치가 발생하지 않았으며 남조류 세포수가 높았던 7월 말에서 8월 중순(7.26~8.16)을 대상으로 하였다. 조사 시간 중 표층부터 수심 10 m의 깊이별 일 평균 수질은 다음과 같았다(Table 5).

실시간 피코시아닌 측정값과 실험실에서 현미경으로 검정한 유해 남조류 세포수와 회귀직선식을 산출하기 위해 시료를 채수한 시점의 표층(0 m)의 시간 평균 자료를 활용하였으며 세포수와 농도의 분석 결과를 나타내었다(Fig. 10). 도출한 회귀식($r^2=0.8794$, $p < 0.01$)을 가지고 친수활동구간 조

Table 5. Water quality of real-time monitoring system

	Mean ± SD	Min.	Max.
Temp (°C)	28.4 ± 0.7	22.8	30.2
pH	8.5 ± 0.3	7.6	9.1
DO (mg/L)	7.3 ± 0.8	4.9	9.8
Conductivity (µS/cm)	313 ± 38	189	374
Salinity	0.14 ± 0.02	0.09	0.17
Phycocyanin (µg/L, RFU*)	0.19 ± 0.21	0.00	1.44

* RFU(Relative Fluorescence Units)

류경보제 발령기준인 20,000 cells/mL, 100,000 cells/mL의 피코시아닌 농도값을 산출한 결과 0.106 µg/L, 1.141 µg/L로 나타났다. 실험실에서 흡광광도법으로 측정된 값과 비교 시 20,000 cells/mL에서는 유사한 농도를 나타내었으나, 100,000 cells/mL 2배 이상 높은 값을 나타내었다. 특히 세포수가 증가할수록 색소를 추출해서 흡광광도법으로 측정된 값보다 표준오차 범위가 늘어나는 것으로 나타났는데, 이는 *Microcystis* 속의 우점 시 수백~천여 개의 단위 세포가 군체를 형성함에 따라 탁도가 증가하게 되어 형광과장 간섭으로 측정에 방해를 준 것으로 판단되며, 선행연구에서도 50 NTU 이상에서 남조류 형광 측정값의 위양성 반응 증가가 보고되기도 하였다(Bowling et al., 2013). 따라서 상대적으로 저농도인 조류경보 관심 단계 수준에서 남조류 세포수 예측에 활용하는 것이 더 나을 것으로 판단된다.

다만 조사 기간인 하절기 낙동강 하류는 남조류가 전체 식물 플랑크톤의 대부분을 차지하였으며, 남조류 중에서도 *Microcystis* 속이 99% 정도 우점을 나타내고 있어 피코시아닌 농도를 활용한 유해 남조류 세포수 예측에 앞서 *Aphanizomenon* 속 등 다른 속(屬)들과 피코시아닌 농도 간의 연구가 선행되어야 할 것으로 보인다.

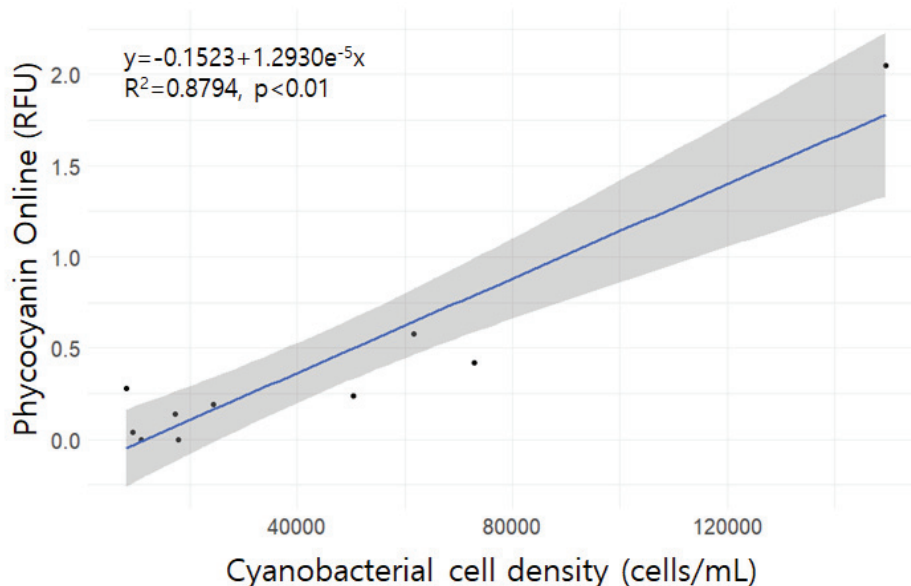


Fig. 10. Relationship between cyanobacterial cell density and phycocyanin_online (fluorescence).

3.4.1 시계열 변동 특성

7월 26일에서 8월 16일까지의 실시간 피코시아닌의 시계열 변동 특성을 일평균자료를 이용하여 수심별로 나타내었다. 조류경보 관심단계 20,000 cells/mL에 해당하는 피코시아닌 측정값(0.106 RFU)은 유량 변동이 크지 않은 기간 동안 수심 6 m까지 관찰되었으며, 7월 28일 유량이 전일과 비교해 65% 감소하면서 최저층에서도 비교적 높은 농도를 보였다(Fig. 11). 8월 10일 이후 중부지방 집중호우로 본류 유량이 증가한 것을 전후해 상류에서 내려온 녹조로 최고 농도를 보였으며 (8월10일 표층 0.74 RFU, 저층 0.19 RFU) 이후 감소하여 전 수심에 걸쳐 감소한 것으로 나타났다(Fig. 12). 대청호에서 수행한 식물 플랑크톤 수직 분포에 대한 선행 연

구에서 하절기 표층에서 수심 6 m까지 누적 현존량이 전체의 94.9%였으며, *Microcystis* 속이 수심별 93.4~99.3%를 차지하는 것으로 볼 때(Park et al., 2006), 낙동강 하류도 유량 안정기 비교적 저층까지 *Microcystis* 속이 분포 가능성을 나타내었다.

3.4.2 일주기 변동 특성

일주기 변동 특성을 파악하기 위해 중부지방 집중호우로 유량이 증가한 시점을 전후(7.26~8.9, 8.10~8.16)로 각각 모니터링된 전체 데이터를 수심에 따라 시간대 별로 정리한 다음, 해당 시간대의 평균을 산출하여 24시간 변동 특성을 나타내었다. 일 유량변화는 유량증가 시점을 전후해 시간별

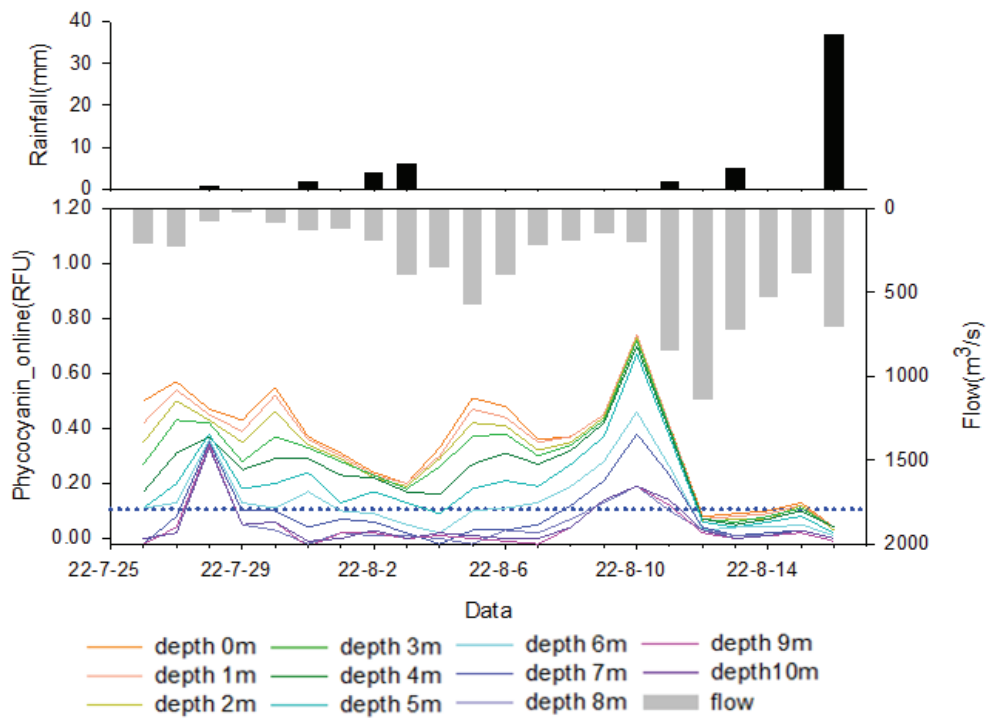


Fig. 11. Time-series variation of rainfall, flow and phycocyanin_online(RFU) (Gupodaegyo, 7.26~8.16).

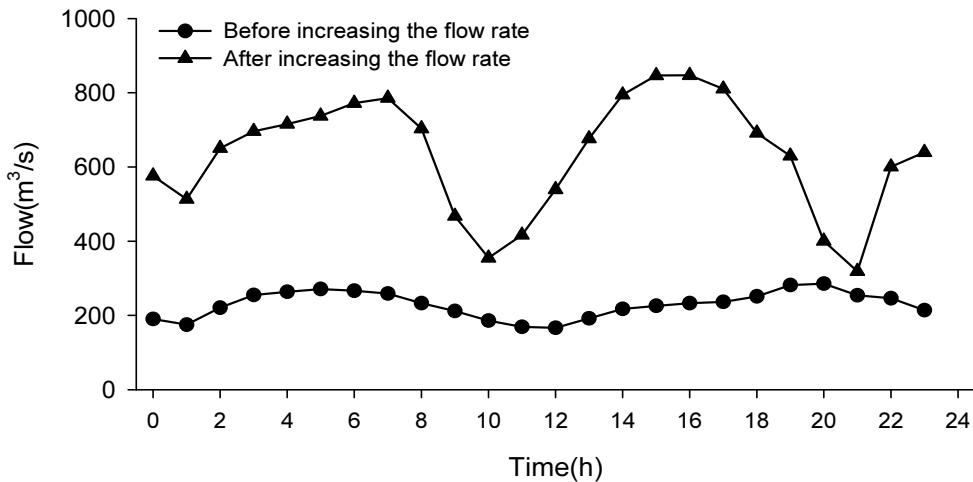


Fig. 12. Diurnal variations in flow.

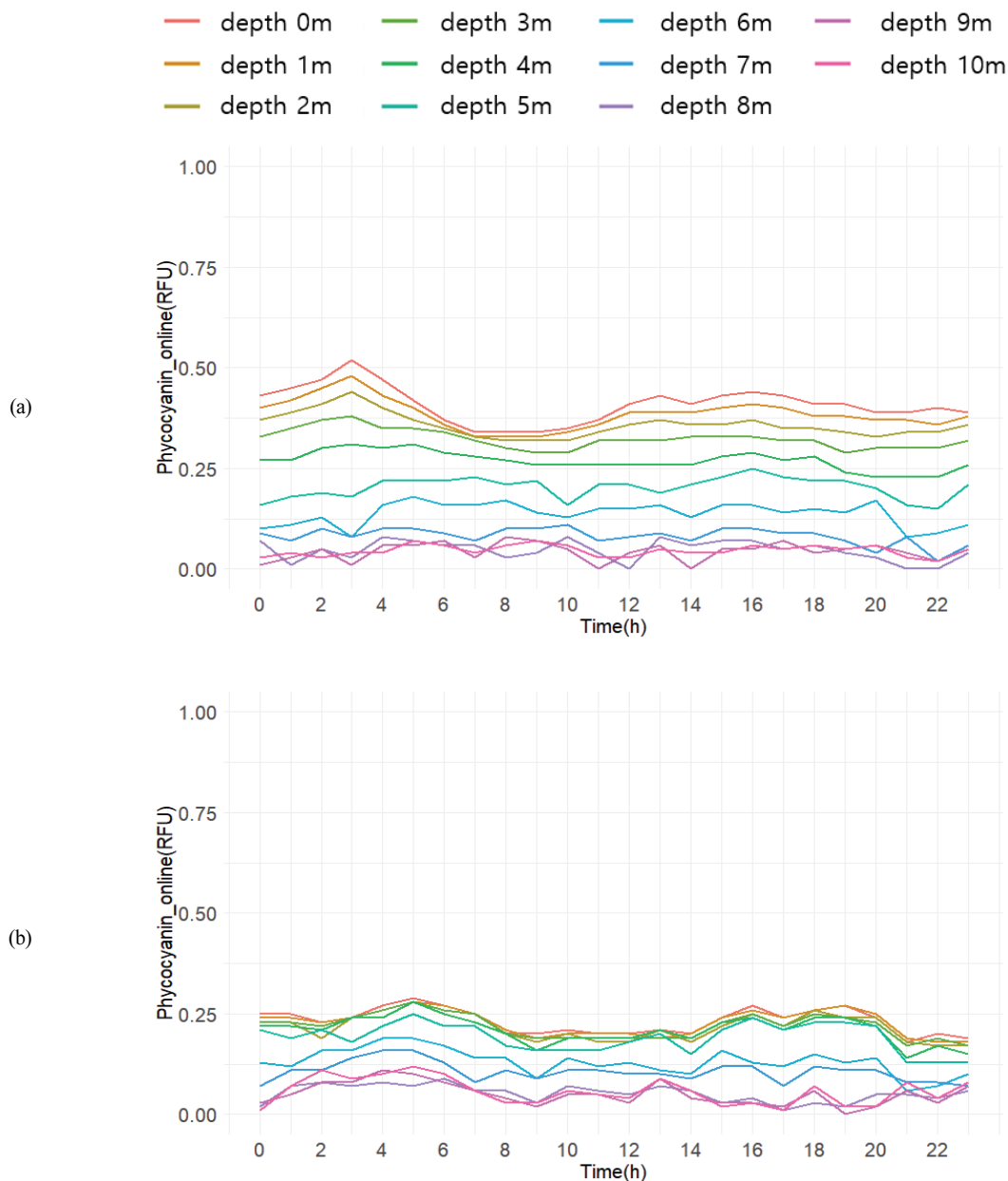


Fig. 13. Diurnal variations in phycocyanin concentration. (a) Before increasing the flow rate, (b) After increasing the flow rate.

편차가 심한 것으로 나타났고(Fig. 12), 피코시아닌 농도 분포는 유량 안정기에는 수심별로 교란이 일어나지 않았으며 개방 후에는 수심 4 m~5 m 정도까지 교란이 일어나는 것으로 나타났다(Fig. 13).

수문 개방 전 피코시아닌의 시간대별 표층의 평균 농도 분포가 개방 후에 비해 시간대에 따라 변동하는 것으로 나타났는데, 가장 높은 농도 분포는 새벽 3시경으로 증가했다가 급감하는 패턴 보였고, 이후 일사량이 증가함에 따라 10시 경부터 증가하여 일정 수준으로 유지되다가 오후 5시 이후 감소하는 것으로 나타났다. 이는 자연수에서 *Microcystis* 속의 최대성장률(Maximum growth rate, μ_{max})이 2.1~4.4로 변이 폭이 매우 크게 나타나(Hammer, 1964; Reynolds, 1973; Reynolds and Walsby, 1975), 일반적으로 광합성에 의해 영

양분이 세포 내에 축적되면 팽압(Turgor pressure)으로 기낭이 파괴되어 침강하고, 영양분이 모두 소모되면 팽압이 사라져 다시 기낭을 형성하여 수표면으로 다시 상승하게 되는데(Horne and Goldman, 1994), 이러한 영향으로 새벽 표층에 농도가 높아진 것으로 사료된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 낙동강 하류 화명·삼락 생태공원 2지점 및 구포대교 1지점에 대해 하절기 녹조발생 시기에 유해 남조류 [마이크로시스티스(*Microcystis*), 아나베나(*Anabaena*), 아파니조메논(*Aphanizomenon*), 오실라토리아(*Oscillatoria*) 속(屬)] 군집구조와 출현 시기를 조사하고 조류 지표인 클로

로필 a 및 남조류 피코시아닌 함량을 비교 분석하여 남조류 모니터링에 피코시아닌이 적합한 지표인지 평가하였다. 또한 실시간으로 수집되는 현장 데이터와 비교 평가를 실시하여 향후 녹조 발생 시 실시간 피코시아닌 모니터링 결과를 활용할 방안과 개선점에 대하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

1) 낙동강 하류 구간의 식물 플랑크톤 발생은 5월 수온 상승과 일조량 증가로 규조류 발생이 감소하고 남조류, 녹조류가 공존하다 6월부터 *Microcystis* 속 등 남조류가 우점하기 시작하였으며, 7월~8월 남조류 대량 발생에 따른 녹조현상이 지속되었다. 조류경보제에서 지정하는 유해 남조류 4속 모니터링 결과, *Microcystis* 속이 전체 99%를 차지하는 것으로 나타났다. 조류경보제 친수활동구간 관심 단계에 해당하는 세포수 분포는 세 지점 모두 7월 6일에서 8월 9일까지 지속된 것으로 나타났으며, 8월 10일 이후 중부지방 집중 호우에 따른 보와 하굿둑 개방으로 감소한 것으로 나타났다.

2) 남조류 세포수와 조류 현존량 지표인 클로로필 a 와 피코시아닌 농도를 비교한 결과, 상관성은 피코시아닌 ($r=0.8999$, $p < 0.001$), 클로로필 a ($r=0.6458$, $p < 0.001$)으로 피코시아닌의 상관성이 더 높은 것으로 나타났다. 단순회귀 분석 결과, 결정계수(r^2)가 피코시아닌(0.8455)이 클로로필 a (0.3683) 보다 높은 것으로 나타나 유해 남조류 세포수와 피코시아닌 농도 간의 회귀모형이 더 적합한 것으로 나타났으며, 따라서 남조류를 모니터링하기 위해서는 전체 조류 현존량 지표인 클로로필 a 보다는 피코시아닌이 더 유용한 지표라고 사료된다.

3) 조류경보 관심 및 경계단계에 해당하는 피코시아닌 농도는 각각 0.128 mg/m^3 , 0.444 mg/m^3 으로 나타났으며, 관심 단계의 세포수 20,000 cells/mL 이상을 보인 지점에서 94.4%, 경계단계 세포수 100,000 cells/mL 이상에서 57.1%가 산출된 피코시아닌 농도를 만족하는 것으로 나타나 관심 단계 수준에서 세포수와 피코시아닌 농도 간에 더 유의미한 결과를 도출할 수 있었다.

4) 실시간 피코시아닌 모니터링 자료와 유해 남조류 세포수의 단순회귀식($r^2=0.8794$, $p < 0.01$)을 산출한 후, 조류경보 관심 단계(친수활동구간 20,000 cells/mL)에 해당하는 농도를 구한 후 수심별 피코시아닌 분포와 비교한 결과, 유량 변동이 심하지 않았던 기간 동안 수심 6 m 까지 20,000 cells의 농도 값을 보였으며, 중부지방 집중호우로 보와 하굿둑 수문 개방을 전후해 저층 10 m 까지도 높은 농도를 나타내다 이후 전 수심에서 감소하였다. 수문 개방 전후 기간별 피코시아닌 농도와 기타 수질 항목의 수심별 일주기 변동 특성을 분석한 결과 수문 개방 전 피코시아닌 농도 분포는 층별 교란이 일어나지 않았으며 표층의 경우 시간대별 증감 패턴을 나타내었고, 개방 후에는 층별 혼합이 일어나는 것으로 나타났다.

5) 본 연구는 하절기 녹조가 대량 발생하여 *Microcystis* 속이 우점을 나타내었을 때 분석 결과이며, 향후 남조류 세포수와 피코시아닌 농도의 상관관계는 유해 남조류 발생 시기 및 우점종의 변화에 따라 시공간적 확장을 통하여 보다 일반화된다면 녹조관리에 유용한 자료가 될 수 있을 것으로

사료된다.

Acknowledgement

The authors are grateful to the Republic of Korea National Institute of Environmental Research (NIER) who funded the research reported in this paper.

References

- Ahn, C. Y., Joung, S. H., Yoon, S. K., and Oh, H. M. (2007). Alternative alert system for cyanobacterial bloom, using phycocyanin as a level determinant, *The Journal of Microbiology*, 45(2), 98-104.
- Bennett, A. and Bogorad, L. (1973). Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga, *The Journal of Cell Biology*, 58(2), 419-435.
- Bowling, L., Ryan, D., Holliday, J., and Honeyman, G. (2013). Evaluation of *in situ* fluorometry to determine cyanobacterial abundance in the Murray and Lower Darling rivers, Australia, *River Research and Applications*, 29(8), 1059-1071.
- Eullaffroy, P. and Vernet, G. (2003). The F684/F735 chlorophyll fluorescence ratio; A potential tool for rapid detection and determination of herbicide phytotoxicity in algae, *Water Research*, 37, 1983-1990.
- Gallon, J. R. (1992). Tansley review No. 44. Reconciling the incompatible: N_2 fixation and O_2 , *New Phytology*, 122(4), 571-609.
- Ha, R., Shin, H. J., Nam, G. B., Park, S. H., Kang, T. G., Song, H. O., and Lee, H. (2016). A study on comparison of phycocyanin extraction methods for hyperspectral remote sensing of cyanobacteria in turbid inland waters, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 32(6), 520-527. [Korean Literature]
- Hammer, U. T. (1964). The succession of bloom species of blue-green algae and some causal factors, *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 15, 829-836.
- Horne, A. J. and Goldman, C. R. (1994). *Limnology*, 2nd Ed., McGraw-Hill, Inc., New York..
- Lee, S. J. (2022). Cyanobacterial blooming toxin pollution that threatens public health, What are the measures?, *Urgent discussion on detection of cyanotoxins from crops to tap water*, 96. https://ampos.nanet.go.kr:7443/materialSeminarDetail.do?control_no=PAMP10000000070229 [Korean Literature]
- Lichtenthaler, H. K. (1988). *Application of chlorophyll fluorescence*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 384.
- Lorenzen, C. J. (1967). Determination of chlorophyll and phaeopigments; spectrophotometric equations, *Limnology and Oceanography*, 12, 343-346.
- Ministry of Environment (ME). (2010). *Development of pre-treatment built-in type fluorometer for distinguishing different types of taxonomic algae and determining*

- chlorophyll concentration*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2014). *Resource book for the cyanobacteria information in Nakdong river*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (ME). (2022). *Standard method for the examination of water pollution*, Ministry of Environment. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research (NIER). (2020). *Operating manual of harmful algae alert system*, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea. [Korean Literature]
- Park, H. K., Shin, R. Y., Lee, H., Lee, K. L., and Cheon, S. U. (2015). Spatio-temporal characteristics of cyanobacterial communities in the middle-downstream of Nakdong river and lake Dukdong, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 31(3), 286-294. [Korean Literature]
- Park, J. G., Kim, Y. S., Lee, J. J., Jang, S. H., and Lee, J. H. (2006). Diel vertical distribution of cyanobacteria in lake Daecheong, *ALGAE*, 21(1), 75-82. [Korean Literature]
- Reynolds, C. S. (1973). Growth and buoyancy of *microcystis aeruginosa* Kotz. emend. Elenkin in a shallow eutrophic lake, *Proceedings of the Royal Society of London B.*, 184, 29-50.
- Reynolds, C. S. and Walsby, A. E. (1975). Water-blooms, *Biological Reviews*, 50, 437-481.
- Richards F. A. and Thompson T. G. (1952). The estimation and characterization of planktonic population by pigment analysis. A spectrophotometric method for the estimation of plankton pigments, *Journal of Marine Research*, 11, 156-172.
- Rouso, B. Z., Bertone, E., Stewart, R., Aguiar, A., Chuang, A., Hamilton, D. P., and Burford, M. A. (2022). Chlorophyll and phycocyanin in-situ fluorescence in mixed cyanobacterial species assemblages: Effects of morphology, cell size and growth phase, *Water Research*, 212, 118-127.
- Sarada R., Pillai M. G., and Ravishankar G. A. (1999). Phycocyanin from *Spirulina* sp: Influence of processing of biomass on phycocyanin yield, analysis of efficacy of extraction methods and stability studies on phycocyanin, *Process Biochemistry*, 34, 795-801.
- Whitton, B. A. (2012). *The ecology of Cyanobacteria II: Their diversity in time and space*, Springer, Dordrecht, the Netherlands.