

유해남조류 발생도표 제안 연구 - 팔당댐과 칠서지점을 대상으로

곽재원* · 김길호** · 홍승진*** · 김덕환** · 박석근**** · 김수전*****†

*환경부 한강홍수통제소

**한국건설기술연구원 수자원하천연구본부

***한국건설기술연구원 건설산업진흥본부

****인하대학교 토목공학과

Development of a Harmful Cyanobacteria Occurrence Diagram - A Case Study for the Paldang Dam and Chilseo Site

Jaewon Kwak* · Gilho Kim** · Seoungjin Hong*** · Deokhwan Kim** · Seokgeun Park**** · Soojun Kim*****†

*Han Flood Control Office, Ministry of Environment

**Construction Industry Promotion Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

***Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

****Department of Civil Engineering, INHA University

(Received : 19 March 2025, Revised : 11 August 2025, Accepted : 11 August 2025)

요약

하천과 호수에서의 녹조의 발생은 자연재난의 하나로서 다루어지고 있으며, 더 이상 자연현상이 아닌 사회·생태학적 문제로서 부각되고 있다. 본 연구의 목적은 하천이나 호수의 유해남조류 발생에 대응하는 실무자가 관심지점의 유량과 수온을 이용하여 현재 발생하고 있는 녹조의 현황과 향후 증·감 추이를 간편하게 전망할 수 있는 방법을 제안하는 데 있다. 이를 위하여 동일한 수온과 유량 조건 하에서도 변동성이 큰 유해남조류 발생을 window filter를 통하여 정량화하여 도시하는 ‘유해남조류 발생도표’ 방법을 제안하였다. 대표적인 조류경보 지점인 한강수계의 팔당댐과 낙동강수계의 일 단위의 수온, 유량, Chl-a 자료, 주 단위의 유해남조류 세포수 자료를 수집하였다. 수집된 자료에 대해서 녹조 발생과 가장 연관성이 높은 주기를 결정하기 위하여 cross wavelet을 적용하였으며, 각 지점별로 가장 시간적인 상관성이 높은 수온과 유량을 결정하고 이를 유해남조류 발생자료와 결합하여 유해남조류 발생도표를 유도하고 적용성을 고찰하였다.

핵심용어 : 녹조 발생, 유해남조류, 팔당댐, 칠서 관측소

Abstract

The proliferation of algae blooms in rivers and lakes is increasingly recognized as a natural disaster, evolving beyond a mere natural phenomenon into a pressing socio-ecological challenge. This study aims to develop a practical method that enables practitioners to assess the current status of harmful cyanobacterial blooms and predict their future trends using runoff and water temperature data. To this end, we propose the “Harmful Cyanobacteria Occurrence Diagram” method that quantitatively visualizes the variability of harmful cyanobacteria occurrence under identical hydrological and water temperature conditions using a window filter. To validate this approach, we collected historical

*To whom correspondence should be addressed

Department of Civil Engineering, INHA University

E-mail : sk325@inha.ac.kr

• Jaewon, Kwak Han Flood Control Office, Ministry of Environment, Korea / Research Officer(firstsword@korea.kr)

• Gilho Kim Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology/Senior Researcher(kgh0518@kict.re.kr)

• Seoungjin Hong Construction Industry Promotion Department, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology/Director (seungjinhong@kict.re.kr)

• Deokhwan Kim Department of Hydro Science and Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology/Senior Researcher(kimdeokhwan@kict.re.kr)

• Seokgeun Park Department of Civil Engineering, INHA University/Ph.D. Candidate(dicast97@gmail.com)

• Soojun Kim Department of Civil Engineering, INHA University/Professor(sk325@inha.ac.kr)

 This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

records of daily water temperature, streamflow, and chlorophyll-a (Chl-a), along with weekly harmful cyanobacterial cell count in the Paldang Dam in the Han River basin and the Chilseo site in the Nakdong River basin. Cross wavelet analysis was applied to determine the temporal scales most strongly correlated with cyanobacterial occurrence. The optimal water temperature and runoff conditions exhibiting the highest temporal correlation with the occurrence at each site were identified. These findings were then integrated into the proposed Harmful cyanobacterial occurrence diagram, and its applicability was evaluated.

Key words : Algae blooms, Harmful cyanobacterial, Paldang dam, Chilseo site

1. 서 론

하천과 호소에서 유해남조류를 비롯한 녹조의 발생은 더 이상 자연현상이 아닌 사회·생태학적 문제로서 다루어지고 있으며 (Jeong et al., 2011), 영산강과 같은 4대강 본류에서 녹조로 인한 수생태계 및 수질관리 악영향이 나타나고 있다 (Oh et al., 2023). 이에 대하여 행정안전부는 2014년 2월에 「재난 및 안전관리 기본법」에서 하천·호소 등에서 조류가 대발생하는 상황을 자연재난의 하나로서 규정한 바 있으므로 (행정안전부, 2014), 합리적인 물관리를 위한 녹조 대응 요구가 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. Francis, G. (1878)이 남조류(Cyanobacteria)가 수질에 유해함을 최초로 보고한 이래 수많은 연구에서 녹조로 인한 수질 악화와 독성피해를 논하여 왔다. 한국에서도 낙동강과 한강에서 남조류 빈도가 증가함에 따라 수질에 대한 우려가 제기되고 있으며 (Srivastava et al., 2015), 하천의 유해남조류와 간질환 발생률에 유의미한 상관성이 있다는 내용도 제기되면서 사회문제로 비화되었다 (Lee et al., 2019a). 특히, 낙동강은 여름철 평균 기온이 0.9°C 에서 1.4°C 까지 상승하고 강우량과 유속의 감소로 조류 변성에 유리한 조건으로 변화하고 있는 것으로 나타났으며 (Son et al., 2024a), 한강에서도 녹조 발생에 따른 경제적 비용을 연간 256억원으로 제시되기도 하였다 (Lee et al., 2019b). 이에 따라서, 녹조의 주요한 원인을 고찰하여 향후 추이를 전망하기 위한 연구도 다양하게 이루어져 왔다. 녹조의 발생에는 주로 영양염류, 수온, 일조량, 유량에 따른 흐름조건 등이 주요한 원인으로 제시되어 왔으며 (Ferreira & Sant'Anna, 2017; Glibert & Burkholder, 2018; Oh et al., 2023), 그 중에서도 유량과 수온이 주요한 요인으로 지목되었다 (Kim et al., 2024). 또한, 한국의 2020년 집중호우 시기의 녹조 변화량을 고찰하여 강우량이 수온과 유량을 변동시켜 녹조에 가장 큰 영향을 주는 것으로 도출된 바 있다 (Kang et al., 2024). 수온, 광수용성, pH와 같은 비생물적 요인도 광합성에 영향을 주어 녹조 성장을 촉진하고 조류 변성에 영향을 주며 (Lap and Ta, 2020; Ikramov, 2022), 농지에서 유출된 수량이나 하수처리장에서 유입되는 높은 농도의 질소와 인도 조류 증식에 기여하는 것으로 제시 되었다 (Harada, 2022). 이러한 원인 인자를 이용하여 녹조 현황을 파악하고 전망하기 위한 연구도 이루어져 왔으며, 전통적으로는 녹조의 개화와 성장, 사멸, 이동 등에 초점을 맞춘 모형이 주로 사용되었다 (Frank, 2018). 유해조류 발생에 대한 모델은 크게 생태학적

과정을 기반으로 하는 기작 모델(mechanism model)과 인공신경망 등의 경험적·통계적 과정을 이용하는 비기작 모델(non-mechanism model)로 구분된다 (Zahir et al., 2024). 기작 모델의 경우에는 영양 균형, 개체군의 분포, 생장과 생존율 변화 등을 환경 조건과 연관지어 수치적으로 예측하게 되며 (McGillicuddy Jr et al., 2014; Cao et al., 2020; Zheng et al., 2021), 비기작 모델의 경우에는 인공신경망과 같이 경험적·통계적인 분석을 통하여 이루어진다 (Anderson et al., 2016; Qin et al., 2017). 최근에는 머신 러닝과 같은 기법을 통한 예측도 이루어지고 있다. 대표적으로 Support Vector Machine(SVM), Random Forest(RF), Long Short-Term Memory(LSTM), Gradient Boosting Tree(GBT) 등이 있으며 (Koc et al., 2023; Sheik et al., 2024), 과거수질자료, 댐 제원 정보와 풍속, 기상관측 데이터, 폐수처리장, 공장 현황 자료와 머신 러닝을 결합하여 낙동강의 유해남조류 예측 모델을 구축한 연구나 (Song et al., 2024), Extreme Learning Machine과 과거 수질 데이터, 기상 조건으로 조류 변성을 예측한 연구 등이 있다 (Yi et al., 2018; Lee et al. 2024). 그러나, 기존의 기작 또는 비기작 모델에 따라 불확실성이 25%에서 50%에 달하는 등 (Saranathan et al., 2024), 유해조류 예측 방법론의 대부분이 높은 불확실성을 지니고 있는 것으로 알려져 있다 (Hamilton et al., 2009; Wang et al., 2012; Huang, 2015; Obenour, 2024). 이러한 모델의 복잡성과 예측의 불확실성 때문에 녹조대응 실무를 담당하는 현장 실무자가 현재의 녹조 상황과 향후 추이를 간편하고 명료하게 이해하고 전망하기 위한 방법론은 다소 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 하천이나 호소의 유해남조류 발생에 대응하는 대응 실무자가 관심지점의 유량과 수온을 이용하여 유해남조류 현황과 향후 증·감 추이를 간편하게 전망할 수 있는 방법론을 제안하는 데 있다. 이를 위하여 동일한 수온과 유량 조건에서도 변동성이 큰 녹조 발생을 window filter를 통하여 정량화하여 도시하는 ‘유해남조류 발생도표’ 방법을 제안하였다. 대표적인 조류경보 지점인 한강수계의 팔당댐과 낙동강수계의 칠서지점에 대하여 일 단위의 수온, 유량, Chl-a 자료, 주 단위의 유해남조류 자료를 수집하였다. 수집된 자료에 대해서 유해남조류 발생과 가장 연관성이 높은 주기를 결정하기 위하여 cross wavelet을 적용하였으며, 각 지점별로 가장 시간적인 상관성이 높은 수온과 유량을 결정하고 이를 유해남조류 자료와 결합하여 유해남조류 발생도표를 유도하고 적용성을 고찰하였다.

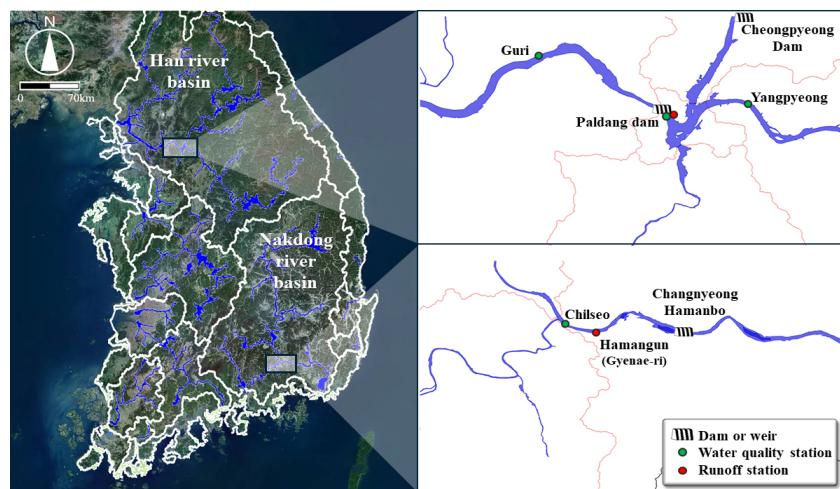


Fig. 1. Study area and observation sites

2. 이론적 배경

2.1 연구대상 : 팔당댐 및 칠서지점

본 연구의 대상은 한강의 하류에 위치한 팔당댐과 낙동강의 하류에 위치한 칠서지점 인근의 유량 및 수질관측 지점이다. 한강은 대한민국 최대 유역면적을 가진 하천으로 유역면적 26,018km², 하천연장 497.5km에 달하며, 강원도 태백시 금대봉에서 발원하여 한강 서해까지 북쪽으로 유하하는 하천이다. 팔당댐은 한강의 주요 지류인 북한강과 남한강이 합류하는 경기도 남양주시와 하남시에 위치한 높이 29m, 길이 575m의 중력식 콘크리트댐으로 주요 제원은 댐마루 EL. 31.5m, 상시 만수위 EL.26.5m, 만수면적 36.5km², 총저수용량 244백만m³, 유역면적 23,800km²이다 (KHNP, 2024). 팔당댐은 대한민국 수도권에 필요한 용수를 취수하는 주요한 구조물이기 때문에 댐 및 주변 지역이 상수원 보호구역으로 지정되어 개발이 제한되고 있으나, 기온 상승으로 인하여 수질관리에 어려움이 증가하고 있으며 (Park et al., 2013), 최근 여름철 유해남조류 증가에 따라 2020년부터 조류경보지점으로 지정되어 관리되고 있다 (Cho et al., 2023; Son et al., 2024a). 낙동강의 경우에는 유역면적 23,384km², 하천연장 510.0km으로 대한민국에서 두 번째로 큰 유역면적을 가진 하천이며, 강원도 태백시 황지에서 발원하여 남해까지 남쪽으로 유하하고 있다. 낙동강의 경우에는 전체적으로 여름 평균 기온의 상승과 유량의 감소로 인하여 시아노박테리아, 특히 마이크로시스티스 (Microcystis)의 성장이 증가하고 있으며 (Son et al., 2024b), 영양분이 풍부한 지역에서 체류하는 시간이 길어지면서 지속적인 조류 문제가 대두되고 있다 (Bae & Seo, 2021). 그에 따라서 여러 지점이 조류경보지점으로 지정되어 있으며 특히 낙동강 하류에 위치한 칠서 지점이 가장 대표적인 지점으로 간주되고 있다 (Jang et al., 2024). 2018년 8월에는 낙동강 최하류에서 기존에 나타나지 않았던 백만cell/ml 이상의 유해남조류가 검출되어 사회적으로 큰 이슈가 되었다. 따라서, 팔당댐과 칠서지점은 유량과 수온을 이용하여 유해남조류 추이를 고찰하려는 대상지점으로 적합한 것으로 판단되어 선정하였다.

연구를 위하여 대상 지점의 수문 및 수질 자료가 필요하므로, 환경부 한강홍수통제소(Han River Flood Office, 2024) 및 물환경정보시스템 (National Institute of Environmental Research, 2024)을 통하여 유량과 수질자료를 수집하였다. 세부적으로 Fig. 1과 같이 칠서지점에서 일 단위로 측정하는 수온(°C)과 Chl-a(mg/m³) 자료를 수집하였으며, 주 1~2회 부정기적으로 측정되는 유해남조류 세포수 (cell/ml) 자료를 수집하였다. 유량자료의 경우에는 칠서 지점에서 하류로 약 3.5km 하류에 위치하고 있는 함안군(계내리) 지점에서의 일 단위 유량(m³/s) 자료를 수집하였다. 수질과 유량자료가 동일한 지점에서 측정되지는 않았으나, 두 지점 사이의 거리가 약 3.5km로 상대적으로 가깝고, 그 사이에서 지류 유입 등의 교란 요인이 없다. 팔당댐 지점의 경우에는 팔당댐의 일 단위 유입량자료와 댐 구조물 직상류에서 측정된 주 1~2회의 유해남조류 세포수를 수집하였다. 그러나, 팔당댐 직상류 지점은 조류 모니터링 지점으로서 수온과 Chl-a 자료도 주 1~2회 측정하는 자료만이 존재한다. 이를 보완하기 위하여 팔당댐에서 하류로 약 15km에 위치한 구리 지점에서 일 단위 수온(°C) 자료와 팔당댐에서 상류로 약 9km에 위치한 양평 지점의 Chl-a(mg/m³) 자료를 추가로 수집하였다. 자료의 기간은 물환경정보시스템에서 팔당댐 지점은 2012년 4월, 칠서 지점은 2016년 1월부터의 자료를 제공하고 있으므로 해당 기간을 대상으로 수집하였다. 수집된 모든 자료는 자료에 대한 검증을 수행하였으며, 과다하게 높거나 낮은 수치와 같은 이상치를 제거하였고 사용하였다.

2.2 검정통계 : Cross-wavelet 분석

본 연구의 목적은 수질·수문자료를 이용하여 유해남조류 발생을 이해하고 간편하게 전망하는 방법을 제안하는 것이다. 이를 위하여 유해남조류와의 상관성이 높은 자료의 선정이 주요한 과제가 된다. 기존의 연구를 고찰하면 주로 영양염류, 수온, 일조량, 유량에 따른 흐름조건 등이 주요한 원인으로 제시되고 있으며 (Ferreira & Sant'Anna, 2017; Glibert & Burkholder, 2018; Oh et al., 2023), 특히 이러한 인자들과

녹조의 발생 사이에는 시간적 지연도 존재하고 있는 것으로 제시되고 있으므로 (Aghashariatmadary et al., 2017; Reboah et al., 2023), 시간적 상관성도 동시에 고려할 수 있는 기법이 필요하다. 본 연구에서는 수질·수문자료와 유해남조류 세포수의 시계열적 상관을 고려하기 위하여 cross-wavelet 분석을 이용하였다. 웨이블릿 분석은 특정한 시계열을 시간-주파수 공간으로 분해하고 확장하는 것으로 정의되며 (Jevrejeva, 2003), 시간별로 상관성에 따른 주기가 분리되므로, 국부적이거나 간헐적 주기성을 찾는 데 유용하게 사용될 수 있다 (Grinsted, 2004). 연속 웨이블릿 변환(CWT)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_X(s, t) = X(t) \times \rho_s(t) \quad (1)$$

$$\rho_s(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \times e^{iwt} \times e^{\frac{t^2}{2}}$$

여기서 $\rho_s(t)$ 는 스케일(s)를 가지는 Morlet 웨이블릿 (Lin, 2000)이며, 웨이블릿의 파워는 $|W_n^X(s)|^2$ 로 정의할 수 있다. 따라서 시계열 $X(t)$ 와 $Y(t)$ 사이의 교차웨이블릿(cross-wavelet)은 $W_{XY}(s, t) = W_X(s, t) \cdot W_Y^*(s, t)$ 과 같이 나타낼 수 있으며, *는 공액복소수를 가리킨다. 이때 W_{XY} 의 복소편각은 시계열 $X(t)$ 와 $Y(t)$ 의 동일한 시간-빈도에서의 위상차로 해석된다. 이러한 Cross-wavelet 분석은 시간 스케일 사이의 관계를 쉽게 해석할 수 있으므로 수문학적 과정을 포괄적으로 이해할 수 있으며 (Sang et al., 2010), 용존 산소 및 수온 변동에 대한 연구에서도 자료의 주기성과 시간적 패턴을 해석하는데 적합한 것으로 제시되었다 (Rajwa-Kuligiewicz et al., 2016).

2.3 유해남조류 발생도표의 제안

일반적으로 유해남조류는 생태계에 속한 생물로서 고유한 생육·성장활동에 따른 심한 변동성을 가지고 있다 (Gulland, J. A, 1986). 영양염류, 수온, 일조량, 유량 등 다양한 요인의 영향을 받으며, 이러한 환경 변화에 빠르게 변화하는 특성이 있어 정량적인 예측이 어렵고 (Nacarro, P.C., 2022), 환경 요인 사이의 생태학적 상호작용에 따라서도 변화하기 때문에

동일한 조건에서도 서로 다른 결과가 도출되기도 한다 (Alexandrou et al., 2015). 이를 보완하기 위하여 확률적인 요소를 도입하기도 하였으나, 실제 적용에서 확률 개념을 적용하기 어렵다는 단점이 있다 (Wang et al., 2012). 이에 대하여 본 연구에서는 수온과 유량이라는 조건에 따른 유해남조류의 발생을 최대한 간편하게 정량화하여 현황파악이나 의사 결정을 위한 기초자료로서 활용하고자 하며, 정량화를 위한 방안으로 Window filter 개념을 도입하여 통계적인 값으로 변환하고 도시하였다. Window Filter는 데이터 처리를 위해 특정 크기의 이동 가능한 창(window)을 정의하여 그 내부의 데이터를 처리하는 기법으로 시간적, 공간적, 혹은 주파수 영역의 데이터를 분석하거나 변환하는데 자주 사용되며, 데이터에서 관심 있는 부분을 국지적으로 다룰 수 있다는 장점이 있다 (Lesti and Spiegel, 2017). 기존의 수질 관련 연구에서의 Window filter는 주로 시계열 데이터에서 이상값을 식별하는 연구에 주로 적용되었다 (Yue & Ren, 2018; Fan et al., 2020). 본 연구에서는 특정한 크기를 가지는 Window 내에 위치한 값들의 특정 분위(Percentile)를 산정하는 window filter를 적용하였다. 세부적으로 Fig. 2와 같이 유량(Δx)과 수온(Δy) 범위 내에 속하는 유해남조류 세포수의 특정 분위를 산정하였다. 이러한 Window filter는 “유사한 수온과 유량 조건($\Delta x, \Delta y$)에서 유해남조류 세포수의 발생 정도의 분위”로 이해할 수 있을 것이다. 이러한 Window filter를 이용하여 분위값을 산정한 후 특정한 유량(∇x)과 수온(∇y) 간격 만큼 연속적으로 이동시키면서 값을 산정하면 연속적인 분위값의 분포를 구할 수 있을 것이다. 연속적인 분위값을 이용하여 Fig. 2와 같이 Heat map 개념의 그림을 그린다면 “유사한 수온과 유량 조건의 유해남조류 발생 사례에서 상위 5%에 해당하는 수치(cell/ml)”로 같이 직관적으로 이해할 수 있게 될 것이다. 본 연구에서는 이를 현장 관리자가 간편하게 녹조의 발생 현황을 정량화하고 의사결정에 활용할 수 있는 유해남조류 발생도표(Harmful Cyanobacterial Occurrence Diagram)로 제안하고자 한다. 예를 들어서 수온 29°C, 유량 500m³/s의 환경에서 유해남조류 세포수는 약 9,000 cell/ml로 관측되었고 이는 녹조 발생맵에서 상위 10%에 해당한다고 가정한다. 이 때 다음 주에 수온이 지금보다 높은

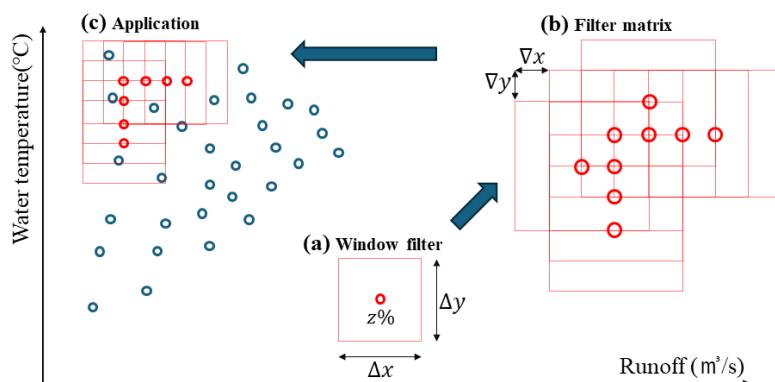


Fig. 2. Concept of Harmful Cyanobacterial Occurrence Diagram

32°C, 유량은 현재와 비슷한 500m³/s으로 예상될 경우 해당 조건에서 상위 10%의 녹조인 약 18,000 cell/ml를 예상 유해남조류 세포수로 예측할 수 있으며 이를 기준으로 녹조 대응을 수행할 수 있을 것이다. 결과적으로 본 연구에서 제안한 유해남조류 발생도표는 “유사한 수온과 유량 조건에서 발생했던 기준 녹조 사례에 대한 평균 또는 특정 분위 값을 연속적으로 나타낸 도표”라고 정의할 수 있으며, 염밀한 의미에서의 녹조 예측이 아닌 기존 발생자료를 이용한 패턴분석에 가깝기 때문에 100% 신뢰하기는 어렵다. 그러나, 현황을 간편하고 직관적으로 이해하기 위한 기초자료로서 활용할 수 있을 것으로 보인다.

3. 적용 및 결과

3.1 유해남조류, 수온, 유량간 상관분석

이전 절에서 제안한 유해남조류 발생도표가 설득력을 가지기 위해서는 해당 도표의 인자가 유해남조류 발생과 밀접하게 연관되어 있어야 한다. 기존 연구에서 유해남조류와 기온(수온), 강우량, 일사량, 유량, DO, BOD, TN, TP 등과 유의미한 관계가 있음이 제시된 바 있으나 (Song et al., 2017), 영양염류, 일조량은 예측이 어렵고 실제 예측자료가 제공되고 있지 않으며, 강우량은 강우-유출과정을 통하여 유량으로 유출되므로 강수량의 불확실성을 고려하면 유량을 고려하는 게 바람직할 것이다. 따라서, 기상·수문 예측이 이루어지고 있고 현장관리자가 자료 습득이 용이한 수온(°C), 유량(m³/s)을 인자로서 수집 하였으며, 이를 유해남조류 세포수 및 Chl-a(mg/m³)와 동시에 도시하였다 (Fig. 3 참조). 자료는 일 단위로 수집하였으나, 자료 확인의 용이성을 위하여 주 단위로

평균하여 도시하였다. Fig. 3에서 일반적으로 여름철에 유량이 낮을 때 녹색으로 표시된 유해남조류가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 3(a)에 나타낸 한강 필당댐의 경우에는 2014, 2015, 2024년에 10,000 cell/ml에 근접하거나 초과하는 유해남조류가 나타난 바 있으며, 2015년 여름철의 약 27,000 cell/ml가 최대이다. Fig. 3(b)의 낙동강의 칠서지점은 2016, 2018, 2022, 2024년에 100,000 cell/ml에 근접하거나 초과하는 수치가 나타났으며, 2016년 여름철의 약 135,000 cell/ml가 최대이다. 다만, Fig. 3의 시계열 자료를 통하여 명확한 상관관계는 확인하기 어렵다. 특히, 기존 연구에서 제시된 바와 같이 유해남조류 발생은 여러 수질, 기상, 수문 인자와의 시간 지연을 포함한 상관성이 존재하고 시간적인 상관성 자체도 상황에 따라서 변화하는 것으로 제시되고 있으므로 (Zúñiga et al., 2020; Misra et al., 2021), Pearson 상관계수과 같은 분석은 이러한 상관성을 고려하지 못한다 (García-López et al., 2018). 이에 기존의 연구에서 수질 자료에 대한 주기성과 시간적 패턴 해석에 적합한 것으로 제시된 Cross wavelet 분석을 적용하였다 (Rajwa-Kuligiewicz et al., 2016).

유해남조류와 수온, 유량에 대한 직접적인 cross wavelet 분석은 자료의 시간적인 스케일 문제로 인하여 설득력 있는 분석이 어렵다. 수온과 유량의 경우에는 일 단위(daily)로 측정되고 있으나, 유해남조류의 경우에는 주 1회 또는 2회에 걸쳐 측정되고 있어서 시간적인 스케일이 부합하지 않는다. 기존의 연구에서도 주 단위의 모델은 조류 성장에 필수적인 온도 및 영양염류 같이 매일 변동하는 중요한 요인을 간과할 수 있는 것으로 제시되었으므로 (Jung et al., 2023), 주 단위의 분석은 설득력 있는 결과를 도출하기 어려울 것으로 판단된다. 이에 대한 대안으로서 주 단위로 측정되는 유해남조류 세포수가

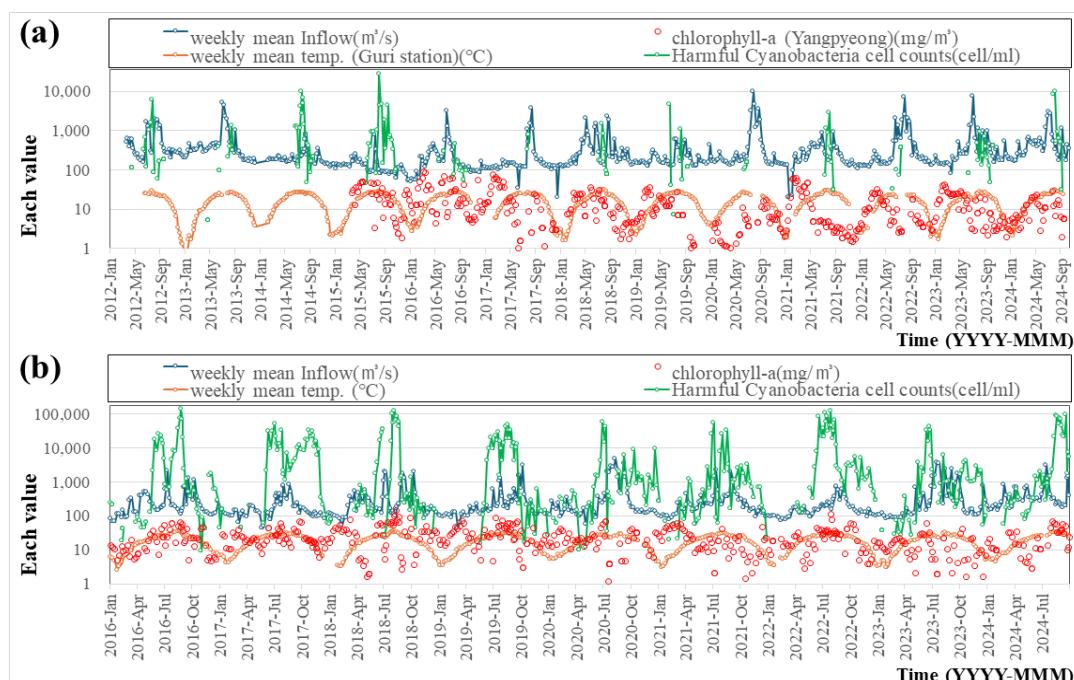


Fig. 3. Obtained historical data for water temperature, inflow, chlorophyll-a, and harmful cyanobacteria cell count: (a) Paldang dam, (b) Chilseo sites

아닌 일 단위로 관측되는 Chl-a를 대상으로 분석을 수행하였다. 일반적으로 Chl-a 농도와 유해남조류 발생 사이에는 유의미한 상관관계가 있는 것으로 알려져 있고 (Yu et al., 2009), 영산강을 대상으로 한 연구에서도 Chl-a 농도와 Cynobacteria류와 현저한 상관관계 있는 것으로 제시되었으므로 (Chung et al., 2024) 유해남조류에 대한 대안 지표로서 분석하였다.

Fig. 4는 팔당댐 및 칠서지점의 Chl-a와 수온, 유량에 대한 cross wavelet 결과이다. 다만, Fig. 4(e~h)의 낙동강 칠서지점의 경우에는 Chl-a와 수온이 칠서지점에서 관측되었고 유량의 경우에는 칠서지점에서 하류로 3.5km 위치한 함안군(계내리) 지점의 유량이 존재하고 있으므로 해당 지점의 자료를 이용하였다. 그러나, Fig. 4(a~d)의 팔당댐 지점의 경우에는 수온과 Chl-a가 관측되고 있으나 주 단위로만 측정되고 있어 적용이 어렵다. 팔당댐이 수도권의 주요한 취수원으로서 중요하게 다루어지고 있는 만큼 향후 팔당댐 지점에도 자동측정시설 등의 확충을 통하여 연속적인 자료가 측정되어야 할 것으로 보인다.

Fig. 4(a,b,e,f)의 cross wavelet 결과를 보면 Chl-a와 수온, 유량 사이에는 전 기간에 걸쳐서 존재하는 공통적인 주기성과

상관성은 없으나, 특정 시점에서의 시간 지연을 포함하는 상관성이 존재하는 것으로 보인다. 세부적으로 팔당댐 지점에서 Fig. 4(a)의 Chl-a과 수온과의 관계를 보면 Chl-a와 수온은 1일에서 최대 8일까지 지속적으로 상관성이 있는 것으로 보이며 4일 이하의 주기에서 강한 상관성이 관찰되고 평균적으로는 약 6일 가량의 수온이 Chl-a 농도와 상관성이 있는 것으로 나타났다. 또한, 2015, 2018, 2023년 여름철에 강한 상관성을 보였다. Fig. 4(b)의 Chl-a와 유량도 유사한 경향성이 나타나고 있으나 유량의 경우에는 시간적인 상관성이 최근 4일 가량 유지되어 수온보다는 상관기간이 짧은 것으로 나타났으며 2016년, 2018, 2023년에 강한 상관성의 영역이 상대적으로 좁고 집중되어 있어 짧은 시간에 영향을 미치는 것으로 판단된다. Fig. 4(c~d)의 wavelet coherence는 두 변수의 상관성을 주파수 및 시간 축에서 나타내며 값이 1에 가까울수록 높은 상관성을 보이는 도표로서, cross wavelet 결과와 마찬가지로 온도와 유량이 Chl-a 농도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 팔당댐에서의 유해남조류 발생은 최근 6일 동안의 수온과 최근 4일간의 유량과 상관성이 높다고 판단된다. 낙동강의 칠서지점에 대해서는 Fig. 4(e)의 Chl-a와

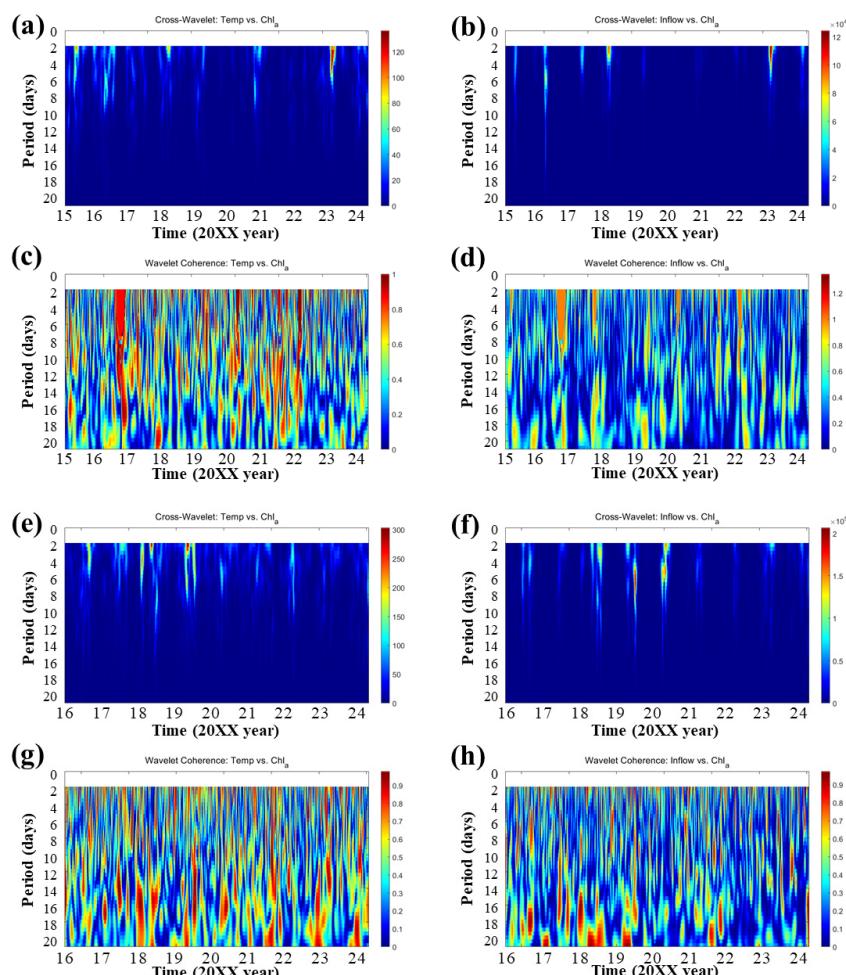


Fig. 4. Cross wavelet(C.W.) and wavelet coherence(W.C.) between Chl-a and runoff(R.) or water temperature(W.T.) at the Paldang dam(a-d) and Chilseo site(e-h): (a) C.W. for W.T. and Chl-a, (b) C.W. for R. and Chl-a; (c) W.C. for W.T. and Chl-a; (d) W.C. for R. and Chl-a; (e-h) were same as (a-d) with Chilseo site.

수온은 1일부터 최대 11일 정도까지 상관성을 나타내고 평균적으로 8일 정도의 수온이 상관관계에 있는 것으로 보인다. 또한, 2016년, 2017년, 2018년, 2019년, 2022년에 나타난 상관성의 정도가 팔당댐보다 높고 강하게 나타나고 있어 칠서지점이 수온에 따른 영향을 더 크게 받는 것으로 보인다. Fig. 4(f)의 Chl-a와 유량은 1일부터 최대 8일 정도까지 상관성을 나타내고 평균적으로 7일 정도의 유량이 상관관계를 나타내고 있으며, 2018년, 2019년, 2020년에 높은 상관성을 보이고 있으며, 역시 팔당댐보다 높고 강한 상관성을 보인다. Fig. 4(g~h)의 wavelet coherence도 팔당댐과 동일하게 높은 상관성을 보이고 있다. 결론적으로 Chl-a 농도와 수온, 유량의 cross wavelet 분석을 기준으로 팔당댐의 유해남조류는 최근 6일 동안의 수온과 최근 4일 동안의 유량과 상관성이 높으며, 칠서지점의 유해남조류는 최근 8일 동안의 수온과 최근 7일 동안의 유량과 상관성이 높은 것으로 판단하였다. 팔당댐과 칠서지점의 시간적 상관성의 기간과 강도가 다른 것은 두 지점의 특성과 유해남조류 발생여건이 다른 것이 원인으로 판단된다. 팔당댐은 수공구조물에 의한 호소성 지형이므로 유량에 의한 영향 외에도 호소에 따른 영향을 추가적으로 받으며 한반도의 중부에 위치하고 있어 수온 역시 남부에 비해서 낮다. 이에 반하여 칠서지점은 낙동강의 하류로서 상대적으로 유속 변동이 크고 한반도의 최남부에 가까워서 수온도 상대적으로 높아 유량과 수온으로 인한 영향이 더 크게 나타나는 것으로 보인다.

3.2 유해남조류 발생도표 적용 및 유도

이전 절에서 팔당댐의 유해남조류가 최근 6일 수온과 최근 4일의 유량과 상관성이 있으며, 칠서지점은 최근 8일의 수온과 최근 7일의 유량과 상관관계 있는 것으로 분석하였다. 이러한 수온·유량 조건과 유해남조류를 본 연구에서 제시한 유해남조류 발생도표로 도시한다면, “최근 6일 수온 28°C와 최근 4일 유량 120m³/s 조건에서 발생하였던 유해남조류 세포수 상위 10% 값은 약 9,000 cell/ml”과 같이 직관적으로 이해할 수 있을 것이다. 이를 위하여 팔당댐 하류의 구리 지점에서의 최근 6일 평균 수온과 팔당댐의 최근 4일 평균 유량, 팔당댐의

유해남조류 세포수, 칠서지점의 최근 8일 평균 수온과 함안군(계내리) 지점의 최근 7일 평균 유량과 칠서지점의 유해남조류 세포수를 하나의 자료쌍으로 구성한 후에 산포도로 도시하였다. 산포도를 도시할 때는 유해남조류 세포수가 나타나지 않거나(0 cell/ml), 결빙 등으로 인하여 수온과 유량이 관측되지 않은 자료쌍은 제외하였으며, 최종적으로 팔당댐 지점은 114주, 칠서지점은 384주의 자료를 Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 5의 각 x축은 최근 n일의 평균 유량이며, y축은 최근 n일의 평균 수온, z축은 유해남조류 세포수이다. Fig. 5(a, b)에 따라 팔당댐과 칠서지점의 발생 경향이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 팔당댐의 경우에는 6일 평균 수온이 15~30°C, 4일 평균 유량이 0~2,000m³/s 구간에서 유해남조류가 나타나고 있으나, 칠서지점의 경우에는 이보다 더 큰 범위인 8일 평균 수온이 5~35°C, 7일 평균 유량이 0~3,500m³/s 구간에서 나타나고 있고 같은 조건에서 유해남조류 세포수의 규모도 팔당댐의 약 5배에 달하고 있다. Fig. 5(a)의 팔당댐 지점을 보면 대부분의 유해남조류 세포수는 조류경보「경계」단계의 기준인 10,000 cell/ml 이하로 나타나고 있으며, 수온이 25°C 이상, 유량이 300m³/s 이하인 구간에서 10,000 cell/ml를 넘는 조류가 나타나고 있다. 유해남조류가 최대로 나타난 시점은 2015년 8월 17일의 27,860 cell/ml이며 이때의 6일 평균수온은 28.1°C, 4일 평균유량은 90.1m³/s이다. Fig. 5(b)의 칠서지점에서는 팔당댐과는 다르게 수온이 5°C부터 나타나고 있으며 15°C 수준에서도 「경계」 단계인 10,000 cell/ml 이상의 유해남조류가 나타나고 있다. 특히, 25°C 이상의 수온과 300m³/s 이하의 유량에서는 100,000 cell/ml 이상의 높은 수치가 나타나고 있으며, 2016년 8월 25일에 8일 평균수온 32.9°C, 7일 평균유량 109.3m³/s 일 때 134,670 cell/ml이 최대값이다.

Fig. 5의 자료를 이용하여 본 연구에서 제안한 유해남조류 발생도표를 도시하였으며, 그 결과는 Fig. 6과 같다. 유해남조류 발생도표를 그릴 때의 window filter의 유량(Δx)과 수온(Δy) 범위는 각각 $\Delta x=100m^3/s$, $\Delta y=1.0^\circ C$ 를 사용하였으며, window의 이동 간격(∇x , ∇y)은 각각 $\nabla x=50m^3/s$, $\nabla y=0.2^\circ C$ 를 적용하였으며, 각각 시행착오법을 통하여 발생경향이 인식하기

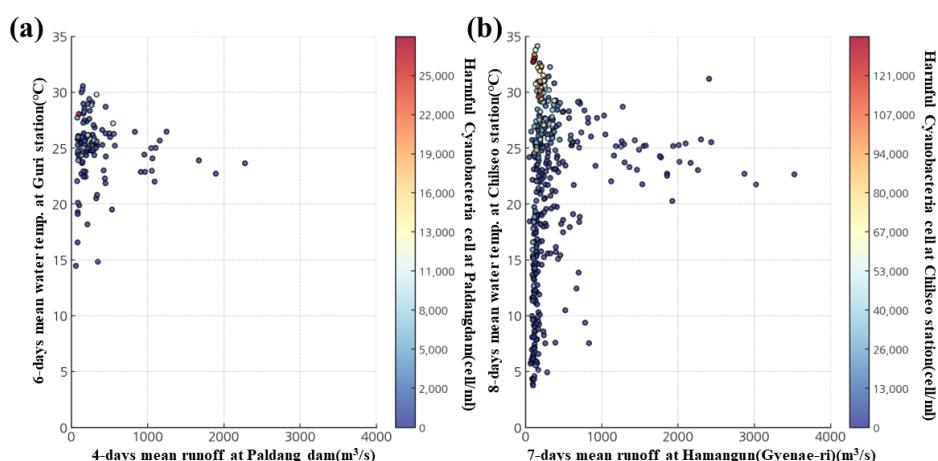


Fig. 5. Scatter plot for mean water temperature vs. mean runoff vs. cyanobacteria cell count: (a) Paldang dam, (b) Chilseo site

편한 수치를 찾아서 적용 하였다. 또한, 유량이 너무 높은 경우에는 강우에 따른 흥수 유출이 이루어지는 상황이므로 팔당댐의 경우에는 수문이 개방되는 상황인 $1,200\text{m}^3/\text{s}$ 이내, 칠서 지점도 하류에 위치한 창녕함안보의 수문이 개방되고 있는 상태인 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 범위 내에서 window filter를 적용하였다. 산정할 분위값의 경우에는 특정 분위값을 모두 산정할 수 있으나, 일반적으로 유해남조류가 높게 발생하였을 경우를 상정하고 녹조 대응을 수행하는 경우가 대부분이므로 상위 5%의 녹조가 발생하는 것을 가정하여 95% 분위값을 산정하였다. 최종적으로 산정된 분위값을 이용하여 Fig. 6과 같이 열지도 형태로 도시하였으며, 가시성을 위하여 유해남조류 세포수는 log scale에 따른 색으로 표현 하였다.

3.3 결과 및 토의

팔당댐과 칠서지점의 수온, 유량 자료를 이용하여 유도된 유해남조류 발생도표를 보면 팔당댐과 칠서지점의 수온과 유량에 따른 유해남조류 발생 추이를 직관적으로 이해할 수 있다. Fig. 6(a)의 팔당댐 유해남조류 발생을 보면 일반적으로 수온이 15°C 이상, 유량 $1,000\text{m}^3/\text{s}$ 이하에서 주로 나타나는 것으로 판단되며, 동일한 조건에서는 수온이 높을수록, 유량이 적을수록 발생 정도가 줄어들게 된다. 특히, 수온 23°C 이상, 유량 $600\text{m}^3/\text{s}$ 이하에서는 조류경보 ‘관심’단계 기준인 $1,000\text{ cell/ml}$ 이상으로 발생하고 있으므로 해당 조건을 팔당댐 녹조 대응에 있어서 1차적인 기준으로 이해하여도 무방할 것으로 보인다. 물론, 유해남조류가 수온과 비례, 유량과 반비례하는 관계는 기존의 연구에서 여러 번 제시된 바 있으나, Fig. 6(a)과 같이 직관적으로 이해할 수 있도록 도시하여 현장 관리자들이

활용할 수 있도록 하였다는 데 의의가 있다.

Fig. 6(b)의 칠서지점의 유해남조류 발생도 기본적으로 유사한 양상을 띠고 있으나 녹조발생이 수온 5°C 이상, 유량 $2,000\text{m}^3/\text{s}$ 에서 나타나고 있어 팔당댐보다 더 넓은 범위에서도 녹조가 발생하고 있다. 따라서, 유해남조류가 우심하는 수온과 유량 범위 자체가 칠서지점이 팔당댐보다 더 넓다. 또한, 팔당댐과 유사하게 수온 20°C 이상, 유량 $800\text{m}^3/\text{s}$ 이하에서 조류경보 ‘주의’단계 기준인 $10,000\text{ cell/ml}$ 이상으로 발생하고 있으며, 유량이 $180\text{m}^3/\text{s}$ 이하인 상황에서는 수온 10°C 인근에서도 $10,000\text{ cell/ml}$ 이상의 녹조가 발생하고 있어 해당 조건을 주요한 기준으로 가정할 수 있을 것으로 보인다.

또한, Fig. 6(a, b)를 비교하면 팔당댐과 칠서지점의 수온과 유량에 따른 유해남조류 발생 양성이 유사한 형태를 나타내고 있다. 특정 수온과 유량 조건에서부터 연속적으로 높은 수준의 녹조가 발생하고 있으며 Fig. 7과 같이 특정 수온과 유량 조건을 직선 또는 직선에 가까운 곡선으로서 도시하는 것이 가능할 것으로 보인다. 따라서, 녹조발생 정도에 따른 수온과 유량 조건을 일종의 구역으로 구별할 수 있게 된다. 이에 Fig. 7에 팔당댐 지점을 대상으로 하여 조류경보 ‘관심’단계의 기준인 $1,000\text{ cell/ml}$ 를 기준으로 두 개의 구역을 붉은 점선으로 표기하였다. 유해남조류 발생도표의 개념이 “유사한 수온과 유량 조건에서 발생했던 기존 녹조 사례에 대한 특정 분위값을 연속적으로 나타낸 도표”이므로, 도표 상의 각 구역을 현장 관리자나 녹조 대응 실무자가 현재의 수온과 유량 조건과 향후 예상되는 수온과 유량 조건을 고려하여 대응 기조를 결정하는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 예를 들어서, Fig. 7의 “A”와 같이 최근 4일 평균수온이 25.0°C , 유량이 $100\text{m}^3/\text{s}$ 에서

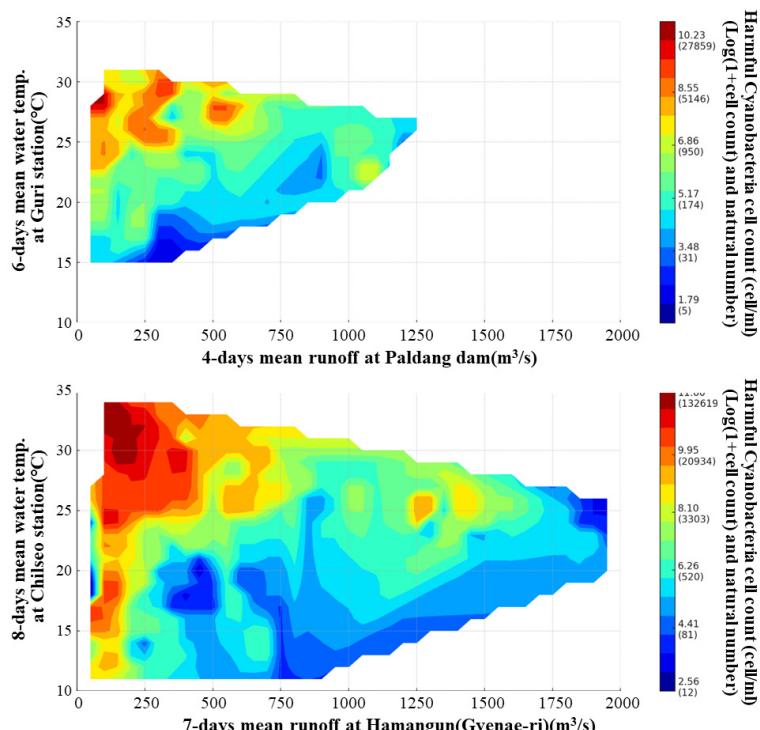


Fig. 6. Algae bloom occurrence map(95% percentile): (a) Paldang dam, (b) Chilseo site

발생도표 분위값의 95%에 근접하는 약 8,000 cell/ml이 관측되었으면 Fig. 7의 95% 분위의 발생도표를 적용할 수 있을 것이다. 이 때, 차주의 유량은 변동이 없이 100m³/s 수준이며, 기상예측을 통해서 수온이 하강하여 21.0°C까지 하강할 것으로 예상될 경우 95% 분위 발생도표에서 “C” 지점과 같이 점차적으로 감소할 것으로 예상할 수 있으며, 예상되는 감소수준은 약 4,000 cell/ml 수준이다. 따라서, 녹조가 자연적으로 감소할 것으로 전망되므로 긴급한 조치를 취할 필요성은 상대적으로 낮을 것으로 판단할 수 있다. 반대로 Fig. 7의 “B”지점과 같이 기상예측에 따라 차주의 수온이 27.5°C까지 상승할 것으로 예상되고 있으며 녹조 대응을 위하여 팔당댐 상류의 댐 방류량을 200% 증가시켜 최종적으로 팔당댐의 유량은 100 → 200m³/s로 증가시키기로 예정된 상황일 경우, 유량 증가에도 불구하고 95% 분위 발생도표 상의 녹조는 8,000 cell/ml 이상으로 유지될 것으로 예상할 수 있다. 이 경우에는 녹조가 현재 수준을 유지하거나 더 높아질 것으로 예상되므로 녹조대응선 (Nguyen et al., 2019), 녹조분리막 운영(Kim et al., 2020) 등의 추가 대책이나 아예 댐 방류량을 더 증가시키는 등의 대책을 고려할 수 있을 것이다. 실제 예로 2024년 8월에 낮은 강수량과 높은 기온으로 인하여 팔당댐의 녹조가 8월 5일 0 cell/ml에서 일주일 후인 8월 12일 8,236 cell/ml로 급격하게 증가된 바 있으며, 이는 유해남조류 발생도표의 95% 분위에 해당하는 값으로 Fig. 7에서의 “D” 지점에 해당한다. 이러한 유해남조류의 급격한 발생에 따른 국가적인 대응으로 8월 15일부터 팔당댐 상류에 위치한 소양강댐을 기존의 44.4 → 200.0m³/s로 급격하게 증가시켜 팔당댐의 유입량이 기존 300m³/s 수준에서 500m³/s까지 증가시켰다 (Song, S. S., 2024). 이 경우 유해남조류 발생도표의 “E” 지점에 해당되며, 예상되는 녹조의 정도는 약 8,000~10,000 cell/ml 이내로서 현재의 수준을 유지할 것으로 간주할 수 있다. 실제로 8월 19일에 측정된 녹조의 수는 9,651 cell/ml 이었으며 유사한 수준을 유지하였다. 결론적으로 본 연구에서 제안한 녹조발생 참조맵이 녹조 대응을 실행하는 현장 관리자들이 간단하게 향후 녹조의 추이를 전망하고 대응에 활용할 수 있는 보조자료로서 활용될

수 있기를 기대한다.

본 연구의 한계는 제안한 유해남조류 발생도표가 모델링의 결과가 아니라 기존 사례의 통계적인 분석에 가깝다는 점이다. 유해남조류 발생도표의 개념은 “유사한 수온과 유량 조건에서 발생했던 기존 녹조 사례에 대한 특정 분위 값을 연속적으로 나타낸 도표”이므로, 수질모델링 절차를 거쳐서 도출된 해석적인 결과와는 염연하게 다르다. 따라서, 본 연구에서 설정한 목표인 간편하게 향후 녹조의 추이를 전망하기 위한 용도로도 불확실성을 내포할 수 밖에 없다. 그러나, 현재 한국에서 수질모델링에 활용되고 있는 EFDC모형은 상세한 3D 지형데이터와 기상 자료가 필요하여 이를 수집하고 처리하는데도 많은 시간과 수고가 필요하며 (Ahn and Park, 2012), 모델 정확도를 보정하고 3차원 유체역학 프로세스 모의 과정에서 많은 처리 시간을 요구한다 (Seo et al., 2010). 예측 결과 자체도 보정과 자료 불확실성에 따라서 예측 결과와 실제 관측값과의 차이를 지적하는 연구가 다수 제시된 것을 고려하면 (Schellart et al., 2008; Kim et al., 2017; Xu et al., 2022; Hong et al., 2023), 유해남조류 발생도표도 불확실성을 감안하고 전체적인 추이를 간편하게 전망하기 위한 보조자료로서는 활용이 가능할 것으로 보인다. 다만, 향후에 EFDC 모형과 같은 수질예측 모형의 지속적인 개선과 발전, 컴퓨팅 리소스의 발전으로 인하여 충분한 예측 정확도와 빠른 계산시간을 확보한다면 본 연구에서 제안한 방법론은 기존 사례 검토 등의 목적으로 활용하여야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 하천이나 호소의 유해남조류 발생에 대응하는 실무자가 관심지점의 유량과 수온을 이용하여 현재 발생하고 있는 유해남조류 현황을 이해하고 향후 증·감 추이를 간편하게 전망할 수 있는 방법론을 제안하는 것이다. 이를 위하여 동일한 수온과 유량 조건 하에서도 변동성이 큰 녹조 발생을 window filter를 통하여 정량화하여 도시하는 ‘유해남조류 발생도표’ 방법을 제안하였다. 제안한 방법을 적용하고 검증하기 위하여 대표적인 조류경보 지점인 한강수계의 팔당댐과 낙동강

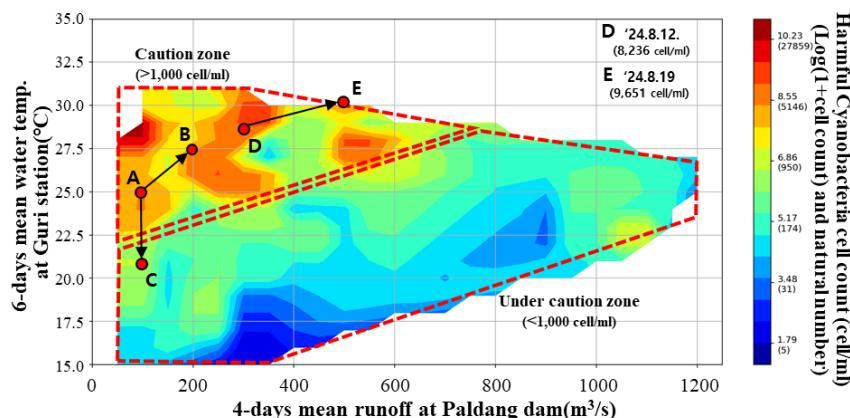


Fig. 6. historical algae bloom reference map(95% percentile) in the Paldang dam; each red-dot line indicate each zone, red point indicate harmful cyanobacteria situation at August 2024

수계의 칠서지점에 대하여 일 단위의 수온, 유량, Chl-a 자료, 주 단위의 유해남조류 세포수 자료를 수집하였다. 유해남조류 발생과 가장 연관성이 높은 주기를 결정하기 위하여 cross wavelet을 적용하였으며, 각 지점별로 가장 시간적인 상관성이 높은 수온과 유량 기간을 결정하고 이를 유해남조류 발생자료와 결합하여 유해남조류 발생도표를 유도하고 적용성을 검토하였다. 본 연구에서 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 수온, 유량이 유해남조류 발생과 가지는 시간적인 상관성을 확인하기 위하여 cross wavelet 분석을 적용하였다. 다만, 주 단위로 관측되는 유해남조류와 시간적인 상관성을 분석하기 어려우므로 유해남조류에 대한 지표로 Chl-a 농도를 이용하여 시간적인 상관성을 분석하였다. cross wavelet 분석 결과, 수온, 유량과 유해남조류의 발생은 특정 시기에 일시적 시간지연을 포함한 강한 상관성이 존재하는 것으로 나타났다. 한강 수계의 팔당댐의 유해남조류는 최근 6일 평균수온과 최근 4일 평균유량과 상관성이 높으며, 낙동강 수계의 칠서 지점은 최근 8일의 평균수온과 최근 7일의 평균유량과 상관성이 큰 것으로 도출되었다.
2. 분석된 수온, 유량과 유해남조류 발생과의 자료군집을 이용하여 본 연구에서 제안한 유해남조류 발생도표를 도시하고 적용성을 고찰하였다. 팔당댐 지점의 114주, 칠서지점의 384주의 자료를 이용하였으며, window filter를 적용하여 연속적인 분위값을 산정하고 이를 열지도 형태로 도시하였으며, 이를 2024년 8월 12일부터 19일 자료를 예로 적용성을 검토하여 유해남조류 대응 실무자가 수온과 유량을 통하여 간편하게 유해남조류 추이를 전망할 수 있음을 보였다. 또한, 팔당댐은 수온 23°C 이상, 유량 600m³/s 이하에서는 조류경보 '관심'단계 기준인 1,000 cell/ml 이상의 유해남조류가 나타날 수 있으며, 칠서지점은 수온 20°C 이상, 유량 800m³/s 이하에서 조류경보 '주의'단계 기준인 10,000 cell/ml 이상으로 발생할 수 있는 기준으로 제시하였다.

본 연구를 통하여 제안된 '유해남조류 발생도표' 방법을 이용한다면 녹조현장에서 실무자가 신속하게 의사결정을 하는데 큰 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 본 방법론이 신속성 및 효율성에 중점을 두어 개발이 되었기 때문에 정확성의 향상에 대한 부분은 지속적으로 평가될 필요가 있다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 "습지생태계 탄소흡수를 고려한 가치증진 기술개발"의 지원을 받아 연구되었습니다. (2022003630001)

References

재난 및 안전관리 기본법, [시행 2014. 2. 7.] [법률 제11994호, 2013. 8. 6., 일부개정]

- Aghashariatmadary, Z., Shariatmadari, Z., and Nejadsattari, T. (2017). "Models for estimating phytoplankton population densities under different environmental conditions with emphasis on climatic factors." *Rostaniha*, Vol. 18, No. 2, pp. 166–180.
- Alexandrou, M. A., Cardinale, B. J., Hall, J. D., Delwiche, C. F., Fritschie, K., Narwani, A., and Oakley, T. H. 2015. "Evolutionary relatedness does not predict competition and co-occurrence in natural or experimental communities of green algae." *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, Vol. 282, pp. 1799.
- Ahn, J. M., and Park, I. H. (2012). "An assessment on the hydraulic characteristics of a multi-dimensional model in response to measurement resolution and spatial interpolation methods." *Journal of Korean Society for Geospatial Information Science*, Vol. 20, No. 1, pp. 43–51.
- Anderson, C.R., Kudela, R.M., Kahru, M., Chao, Y., Rosenfeld, L.K., Bahr, F.L., Anderson, D.M., Norris, T.A., (2016). "Initial skill assessment of the California harmful algae risk mapping (C-HARM) system." *Harmful Algae* Vol. 59, pp. 1 – 18.
- Asia Economic News Agency [Seoul] (2024). "Algae Threatens 'Eating Water'...Eventually Increase Dam Discharges (녹조가 '먹는 물' 위협할라…결국 댐 방류량 확대)". August 20, p. 1. News URL: <https://www.asiae.co.kr/article/2024081914575706496>
- Bae, S., & Seo, D. (2021). "Changes in algal bloom dynamics in a regulated large river in response to eutrophic status." *Ecological Modelling*, Vol. 454, pp. 109590.
- Cao, M., Mao, K., Shen, X., Xu, T., Yan, Y., Yuan, Z., (2020). "Monitoring the spatial and temporal variations in the water surface and floating algal bloom areas in Dongting Lake using a long-term MODIS image time series." *Remote Sens.* Vol. 12, pp. 3622.
- Cho, Y. C., Kang, H. Y., Son, J. Y., Kang, T., and Im, J. K. (2023). "The Spatiotemporal Eutrophication Status and Trends in the Paldang Reservoir, Republic of Korea." *Sustainability*, Vol. 16, No. 1, pp. 373.
- Chung, H., Son, M., Kim, T., Park, J., and Lee, W. S. (2024). "Correlations Between Spatiotemporal Variations in Phytoplankton Community Structure and Physicochemical Parameters in the Seungchon and Juksan Weirs." *Water*, Vol. 16, No. 20, pp. 2976.
- Ferreira, Silva V., and Sant'Anna, C. (2017). "The effect of physicochemical conditions and nutrient sources on maximizing the growth and lipid productivity of green microalgae." *Phycological Research*, Vol. 65, No. 1, pp. 3–13.

- Franks, P.J., (2018). "Recent advances in modelling of harmful algal blooms." In: *Global Ecology And Oceanography Of Harmful Algal Blooms*, Springer, Berlin, Germany, pp. 359–377.
- Francis, G. (1878). "Poisonous Australian Lake." *Nature*, Vol. 18, pp. 11–12, <https://doi.org/10.1038/018011d0>
- Fan, Z., Feng, H., Jiang, J., Zhao, C., Jiang, N., Wang, W., and Zeng, F. (2020). "Monte Carlo optimization for sliding window size in Dixon quality control of environmental monitoring time series data." *Applied Sciences*, Vol. 10, No. 5, pp. 1876.
- García-López, F. J., Batyrshin, I., and Gelbukh, A. (2018). "Dynamic Local Trend Associations in Analysis of Comovements of Financial Time Series." In *Fuzzy Logic in Intelligent System Design: Theory and Applications*, Springer, Berlin, Germany, pp. 181–188.
- Glibert, P. M., and Burkholder, J. M. (2018). *Causes of harmful algal blooms. Harmful algal blooms: A compendium desk reference*, Wiley-Blackwell, N. J., U.S.A., pp. 1–38.
- Grinsted, A., Moore, J. C., Jevrejeva, S. (2004). "Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series." *Nonlin. Processes Geophys.* 2004, Vol. 11, pp. 561–566.
- Gulland, J. A. 1986. Predictability of living marine resources. Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 407, No. 1832, pp. 127–141.
- Han Flood Control Office (2024). Han Flood Control Office website, Ministry of Environment, accessed 14 Feb. 2024, <<https://www.hrfco.go.kr/>>.
- Harada, Ken-ichi. (2022). "Elucidation of Phenomena Involving Cyanobacteria in Freshwater Ecosystem by Chemically Ecological Approach." *Journal of the Pharmaceutical Society of Japan*, Vol. 142, No. 1, pp. 39–64.
- Hamilton, G., McVinish, R., and Mengersen, K. (2009). "Bayesian model averaging for harmful algal bloom prediction." *Ecological Applications*, Vol. 19, No. 7, pp. 1805–1814.
- Hong, S. M., Abbas, A., Kim, S., Kwon, D. H., Yoon, N., Yun, D., ... and Cho, K. H. (2023). "Autonomous calibration of EFDC for predicting chlorophyll-a using reinforcement learning and a real-time monitoring system." *Environmental Modelling & Software*, Vol. 168, pp. 105805.
- Huang, Y. (2015). "Uncertainty assessment in reservoir water quality modeling: implication for model improvement." *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 141, No. 1, pp. 04014051.
- Ikramov, N. B. (2022). "The Dynamic of Changes in the Algae Flora of the Northern Fergana Canal Under the Influence of Various Environmental Factor." *RA journal of applied research*, Vol. 8, No. 6, doi: 10.47191/rajar/v8i6.08
- Jang, G., Jo, M., Kim, J., Kim, S., Park, H., and Park, J. (2024). "Data-driven Model Prediction of Harmful Cyanobacterial Blooms in the Nakdong River in Response to Increased Temperatures Under Climate Change Scenarios." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 40, No. 3, pp. 121–129, <https://doi.org/10.15681/KSWE.2024.40.3.121>
- Jevrejeva, S., Moore, J. C., Grinsted, A. (2003). "Influence of the Arctic Oscillation and El Niño–Southern Oscillation (ENSO) on ice conditions in the Baltic Sea: The wavelet approach." *J. Geophys. Res.* Vol. 108, pp. 4677.
- Jeong, D. H., Lee, J., Kim, K., Lee, D., Hong, S., Yoon, J., ... and Kim, T. (2011). "A study on the management and improvement of alert system according to algal bloom in the Daecheong Reservoir." *Journal of Environmental Impact Assessment*, Vol. 20, No. 6, pp. 915–925.
- Jung, W. S., Jo, B. G., and Kim, Y. D. (2023). "A Study on the Occurrence Characteristics of Harmful Blue-Green Algae in Stagnant Rivers Using Machine Learning." *Applied Sciences*, Vol. 13, No. 6, pp. 3699.
- Kang, M., Van Le, V., Ko, S. R., Chun, S. J., Choi, D. Y., Shin, Y., ... and Ahn, C. Y. (2024). "Effect of rainfall in shaping microbial community during *Microcystis* bloom in Nakdong River," *Korea. Science of the Total Environment*, Vol. 928, pp. 172482.
- Kim, H., Lee, G., Lee, C. G., and Park, S. J. (2024). "Algae development in rivers with artificially constructed weirs: Dominant influence of discharge over temperature." *Journal of Environmental Management*, Vol. 355, pp. 120551.
- Kim, Y. H., Gwon, E. M., Kim, H. K., Cho, I. H., Lee, H., and Kim, B. H. (2020). "Control of Nuisance Cyanobacteria in Drinking Water Resources Using Alternative Algae-Blocking Mats." *Water*, Vol. 12, No. 6, pp. 1576.
- Kim, J., Lee, T., and Seo, D. (2017). "Algal bloom prediction of the lower Han River, Korea using the EFDC hydrodynamic and water quality model." *Ecological Modelling*, Vol. 366, pp. 27–36.
- Korea Hydro & Nuclear Power Company (2024), Hydro Power Dept. website, Hangang Hydro Power Dept. Accessed November 3, 2023. <https://www.khnp.co.kr/hangang/index.do>
- Koc, D.G., Koc, C., Ekinci, K., (2023). "Fusion-based machine learning approach for classification of algae varieties exposed to different light sources in the growth stage."

- Algal Res.* Vol. 71, pp. 103087.
- Lap, B. Q., and Ta, D. T. (2020). "Analysis of the principal factors affecting the algae growth in an urban eutrophic shallow lake by an ecosystem model." *Water, Air, & Soil Pollution*, Vol. 231, No. 11, pp. 537.
- Lee, S., Kim, J., Choi, B., Kim, G., and Lee, J. (2019a). "Harmful algal blooms and liver diseases: Focusing on the areas near the four major rivers in South Korea." *Journal of Environmental Science and Health, Part C*, Vol. 37, No. 4, pp. 356–370.
- Lee, T., Kim, S., Lee J., Kim, K., Lee, H., and Kim, D. (2024). "A study on algal bloom forecast system based on hydro-meteorological factors in the mainstream of Nakdong river using machine learning." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 26, pp. 245–253.
- Lee, Y., Woo, J. M., and Hong, Y. (2019b). "The economic valuation of water quality degradation from river algae blooms: Evidence from the Han River." *Environmental Policy*, Vol. 27, pp. 51–75.
- Lestgi, G., and Spiegel, S. 2017. A Sliding Window Filter for Time Series Streams. In Proceedings of the IOTSTREAM ING@ PKDD/ECML, Skopje, Macedonia, pp. 18–22.
- Lin, J. and Qu, L. (2000). "Feature extraction based on morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis." *J. Sound Vib.* Vol. 234, pp. 135–148. <https://doi.org/10.1006/jsvi.2000.2864>.
- Mcgillicuddy Jr., D., Brosnahan, M., Couture, D., He, R., Keafer, B., Manning, J., Martin, J., Pilskaln, C., Townsend, D., Anderson, D., (2014). "A red tide of Alexandrium fundyense in the Gulf of Maine." *Deep-Sea Res. II Top. Stud. Oceanogr.* Vol. 103, pp. 174–184.
- Misra, A. K., Tiwari, P. K., and Chandra, P. (2021). "Modeling the control of algal bloom in a lake by applying some external efforts with time delay." *Differential Equations and Dynamical Systems*, Vol. 29, pp. 539–568.
- Navarro, P. C., (2022). "On the Theoretical Prediction of Microalgae Growth for Parallel Flow." *Social Science Research Network*, arXiv preprint arXiv:1908.01472, doi: 10.2139/ssrn.4224055
- National Institute of Environmental Research (2024). Water Environment Information System website, Ministry of Environment, accessed 6 Feb. 2024, <<https://water.nier.go.kr/>>.
- Nguyen, H. V. M., Kim, J. K., and Chang, S. W. (2019). "A case study of low pressure air flotation ferryboat for algae removal in Korean rivers and lakes." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 69, pp. 32–38.
- Obenour, D. R., Gronewold, A., Stow, C., Bertani, I., Steger, C. E., Ruberg, S. A., and Scavia, D. (2014). "Probabilistic forecasting of harmful algal blooms in western Lake Erie." In AGU Fall Meeting Abstracts, Vol. 2014, pp. H11A-0848.
- Oh, H. Y., Lee, H. W., and Choi, J. H. 2023. "Prediction and analysis of algal bloom trend in Yeongsan River using EFDC." In Proceedings of EGU General Assembly Conference, pp. EGU-10669.
- Park, H. K., Cho, K. H., Won, D. H., Lee, J., Kong, D. S., and Jung, D. I. (2013). "Ecosystem responses to climate change in a large on-river reservoir, Lake Paldang, Korea." *Climatic Change*, Vol. 120, pp. 477–489.
- Rajwa-Kuligiewicz, A., Bialik, R. J., & Rowiński, P. M. (2016). "Wavelet characteristics of hydrological and dissolved oxygen time series in a lowland river." *Acta Geophysica*, Vol. 64, pp. 649–669.
- Reboah, P., Bolou-Bi, C. B., Nowak, S., & Verney-Carron, A. (2023). "Influence of climatic factors on cyanobacteria and green algae development on building surface." *Plos one*, Vol. 18, No. 3, pp. 0282140.
- Saranathan, A. M., Werther, M., Balasubramanian, S. V., Odermatt, D., and Pahlevan, N. (2024). "Assessment of advanced neural networks for the dual estimation of water quality indicators and their uncertainties." *Frontiers in Remote Sensing*, Vol. 5, pp. 1383147.
- Sang, Y. F., Wang, D., Wu, J. C., and Zhu, Q. P. (2010). "Wavelet cross-correlation method for hydrologic time series analysis." *Shuili Xuebao(Journal of Hydraulic Engineering)*, Vol. 41, No. 11, pp. 1272–1279.
- Schellart, A. N. A., Tait, S. J., Ashley, R. M., Farrar, D., and Hanson, D. 2008. "Uncertainty in deterministic predictions of flow quality modelling and receiving water impact." In 11th Int. Conf. on Urban Drainage, International Association for Hydro-Environment Engineering and Research/International Water Association, Vol. 1, pp. 1–10.
- Seo, D., Sigdel, R., Kwon, K. H., and Lee, Y. S. (2010). "3-D hydrodynamic modeling of Yongdam Lake, Korea using EFDC." *Desalination and water treatment*, Vol. 19, No. 1–3, pp. 42–48.
- Sheik, A.G., Kumar, A., Patnaik, R., Kumari, S., Bux, F., (2024). "Machine learning-based design and monitoring of algae blooms: recent trends and future perspectives – A short review." *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* Vol. 54, pp. 509–532.
- Son, H. J., Jung E.Y., Kim, G., Jang, S.H., An, B.R. (2024a). "The Long-Term Variations of Phytoplankton Biomass in the Lower Nakdong River: 2000~2021." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol.

- 46, No. 11, pp. 687–694. doi: 10.4491/ksee.2024.46.11.687
- Son, J. Y., Han, H. J., Cho, Y. C., Kang, T., and Im, J. K. (2024b). “Seasonal Variations in the Thermal Stratification Responses and Water Quality of the Paldang Lake.” *Water*, Vol. 16, No. 21, pp. 3057.
- Song, C.Y., Kim, J.Y., Kim, Y.J., Joo, H.J., Jae-Hyun, Seo. (2023). “A Study on the Predicting Harmful Cyanobacteria Algal Blooms Using Machine Learning Technology – The Nakdong River Case.” *Journal of The Korean Institute of Intelligent Systems*, Vol. 33, No. 1, pp. 29–36. doi: 10.5391/jkiis.2023.33.1.29
- Song, J. H., and Han, I. S. (2017). “Prediction and Characterization Analysis of River Water Quality using Multivariate Time Series Models.” *Journal of the Korean Society of Urban Environment*, Vol. 17, No. 3, pp. 243–253.
- Srivastava, A., Ahn, C. Y., Asthana, R. K., Lee, H. G., and Oh, H. M. (2015). “Status, alert system, and prediction of cyanobacterial bloom in South Korea.” *BioMed research international*, Vol. 2015, No. 1, pp. 584696.
- Wang, P., Tartakovsky, D. M., & Tartakovsky, A. M. (2012). “Stochastic Forecasting of Algae Blooms in Lakes. In Modelling and Simulation in Fluid Dynamics in Porous Media”. Springer New York, N.Y., U.S.A., pp. 99–108
- Xiao, X., He, J., Huang, H., Miller, T.R., Christakos, G., Reichwaldt, E.S., Ghadouani, A., Lin, S., Xu, X., Shi, J., 2017. “A novel single-parameter approach for forecasting algal blooms.” *Water Res.* Vol. 108, pp. 222–231.
- Xu, S., He, G., Fang, H., Bai, S., and Wu, X. (2022). “Parameter uncertainty and sensitivity analysis of the three Gorges Reservoir and Xiangxi River EFDC model.” *Journal of Hydrology*, Vol. 610, pp. 127881.
- Yi, H. S., Park, S., An, K. G., and Kwak, K. C. (2018). “Algal bloom prediction using extreme learning machine models at artificial weirs in the Nakdong River, Korea.” *International journal of environmental research and public health*, Vol. 15, No. 10, pp. 2078.
- Yu, H. Y., Zhou, B., Hu, Z. Y., Ma, Y., and Chao, A. M. (2009). “Study on correlation between chlorophyll a and algal density of biological monitoring.” *Environmental Monitoring in China*, Vol. 25, No. 6, pp. 40–43.
- Yue, G., and Ren, J. 2018. “A Self-learning Drinking Water Safety Detection Algorithm Based on Telescopic Sliding Window.” In Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Science and Application Engineering, Vol. 1, pp. 1–5.
- Zahir, M., Su, Y., Shahzad, M. I., Ayub, G., Rehman, S. U., and Ijaz, J. (2024). “A review on monitoring, forecasting, and early warning of harmful algal bloom.” *Aquaculture*, pp. 741351.
- Zheng, S., Lu, J., Zhao, H., Zhu, X., Luo, Z., Wang, Y., Fu, Y., Feng, J., Xiang, T., Torr, P. H., Zhang, L., 2021. “Rethinking semantic segmentation from a sequence-to-sequence perspective with transformers.” In: Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition, Vol. 1, pp. 6881–6890.
- Zúñiga, H., Vergara, C., Donoso-Bravo, A., & Jeison, D. (2020). “Effect of delays on the response of microalgae when exposed to dynamic environmental conditions.” *Processes*, Vol. 8, No. 1, pp. 87.