



Research Paper

Water Quality Analysis and Chl-*a* Prediction of 15 Large-scale Freshwater Lakes in Korea by Multivariate Statistical Analysis

Dong Hwi Lee¹ · Eue Tae Kang² · Jin Chul Joo^{3†} · Hyeon Woo Go¹ · Chae Min Ahn⁴ · Yong Hyeon Bae⁵ · Kwang Duck Song⁶

¹Department of Environmental Engineering, Hanbat National University, Republic of Korea

²Korea Rural Research Institute, Republic of Korea

³Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Republic of Korea

⁴Bukang Tech, Republic of Korea

⁵Human Network, Republic of Korea

⁶Gaon S&T, Republic of Korea

(Received November 23, 2022; Revised November 30, 2022; Accepted December 1, 2022)

Objectives : A large-scale freshwater lake is a freshwater lake with a storage of 5,000,000 tons or more among freshwater lakes. It is located at the end of the basin, so complex and various pollutants flow in from a wide basin, and it has a characteristic of longer retention and greater accumulation for a long time in the lake. Since the continuous inflow and accumulation of non-point pollution sources for agricultural purpose occurred due to the repeated reuse of agricultural water near freshwater lakes, and the complex water use and occurred drainage structure, water pollution is aggravating. In this study, the main pollution sources of large-scale freshwater lakes were derived through multivariate statistical analysis using various water quality factors for efficient freshwater lake management. The analysis is performed out to predict the future Chlorophyll-*a* (Chl-*a*) and to identify major factors affecting algal growth, and to use them as establish effective countermeasures to improve water quality based on the characteristics of freshwater lakes algal growth the future.

Methods : In the case of GanWol(GW), GeumGang(GG), GeumHO(GeH), NamYang(NY), DaeHo(DH), BuNam(BN), SapGyo(SG), ASan(AS), YoungSan(YS), YoungAm(YA) in the water environment information system operated by the Ministry of Environment, water quality data on a monthly basis for 10 years from January, 2011 to December, 2020 were collected from three point measurement located in the lake. In the case of GoHeung(GoH), GunNae(GN), Busa(BS), SeokMoon(SM), and HaeNam(HN), water quality data were collected on a quarterly basis for 5 years from April 2015 to March 2019 from one point measurement located in the lake.

Results and Discussion : As a result of Korean trophic state index (TSI_{ko}) analysis, most of the large-scale freshwater lakes in the central region of the West Sea were classified as Hypertrophic, and all of the large-scale freshwater lakes in the southern region of the West Sea were classified as Eutrophic. Based on the results from factor analysis and principal component analysis, countermeasures against organic matters, nutrients, and algal bloom in terms of type of large-scale freshwater lake should be prepared. As a result of multiple linear regression analysis for Chl-*a* prediction, large-scale freshwater lakes in the central region of the West Sea had higher explanatory rates than large-scale freshwater lakes in the southern region of the West Sea, but all were analyzed below 0.8, suggesting that the accuracy was not high.

Conclusions : BOD, COD, TOC, T-N, and T-P concentration of freshwater lakes in the central region of the West Sea have more deteriorating water quality than freshwater lakes in the southern region of the West Sea, suggesting that organic pollutants and nutrients need to be managed. As a result of the factor analysis, it is judged that organic matter & algae type nutrient type, and complex type classification, and appropriate water quality management measures for each type are required. All regression models used for prediction of Chl-*a* were analyzed as $p < 0.05$, and the independent variables of each prediction formula were meaningful in explaining Chl-*a*. Chl-*a* is changed by the complex effects of various water quality factors, and it is also judged that the influence of water quality external products such as precipitation, sunshine time, and flow rate should also be considered. In the future, if the regression is performed by integrating the water quality factors and external factors of a longer period, it is possible to create a model with a slightly higher explanatory rate by increasing the R^2 value.

Keywords : Multivariate statistical analysis, Large-scale freshwater lake, Multiple linear regression Principal component analysis

The Korean text of this paper can be translated into multiple languages on the website of <http://jksee.or.kr> through Google Translator.

† Corresponding author

E-mail: jincjoo@hanbat.ac.kr

Tel: 042-821-1264 Fax: 042-821-1476

© 2022, Korean Society of Environmental Engineers



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.

연구논문

다변량 통계분석을 이용한 국내 15개 대규모 담수호의 수질 분석 및 Chl-*a* 예측

이동휘¹ · 강의태² · 주진철^{3*} · 고현우¹ · 안채민⁴ · 배용현⁵ · 송광덕⁶

¹한밭대학교 환경공학과
²한국농어촌공사 농어촌연구원
³한밭대학교 건설환경공학과
⁴부강테크
⁵휴먼네트워크
⁶가온S&T

목적: 대규모 담수호는 담수호 중 저수 용량이 5,000,000 ton 이상인 담수호로 유역 최말단에 위치하고있어 넓은 유역에서 복잡하고 다양한 오염원이 유입되며 호내에 장기간 체류 및 누적되는 특성이 있다. 담수호 주변 농가들의 반복적 농업용수 재이용으로 농업용 비점오염원의 지속적인 유입과 퇴적, 복잡한 물이용 및 배수구조로 인해 수질 오염이 더욱 가중되고 있는 추세이다. 본 연구에서는 다양한 수질 인자를 활용한 다변량 통계분석을 통해 대규모 담수호의 주요오염원을 도출해 효율적인 담수호 관리의 기초자료로 활용하고, 부영양화로 인한 식물성 플랑크톤의 증식과 관련된 Chlorophyll-*a*(Chl-*a*)의 예측을 위한 다중선형회귀분석(multiple linear regression)을 진행하여 장래의 Chl-*a*를 예측하고 조류 대발생에 영향을 주는 주요 인자를 파악하여 추후 효율적인 담수호 특성별 수질 개선 대책 수립을 위한 보조 자료로 활용하고자한다.

방법: 환경부에서 운영하는 물환경정보시스템에서 간월호(GW), 금강호(GG), 금호호(GeH), 남양호(NY), 대호호(DH), 부남호(BN), 삼포호(SG), 아산호(AS), 영산호(YS), 영암호(YA)의 경우 호내에 위치한 3개의 측정망에서 2011.01-2020.12까지 10년간 1달 단위의 수질 자료를 수집하였으며, 고흥호(GoH), 군내호(GN), 부사호(BS), 석문호(SM), 해남호(HN)의 경우 호내에 위치한 1개의 측정망에서 2015.04-2019.03까지 5년간 분기 단위의 수질 인자를 수집하였다.

결과 및 토의: Korean trophic state index(TSI_{ko}) 분석 결과 서해 중부권역 대규모 담수호는 대부분 Hypertrophic 등급으로 분류되며, 서해 남부권역 대규모 담수호는 모두 Eutrophic 등급으로 분류되었다. 요인 분석과 주성분분석 결과에 따른 담수호 유형별 적합한 유기물질, 영양염류, 조류 등의 관리 방안이 마련되어야 할 것으로 판단된다. Chl-*a* 예측을 위한 다중선형회귀분석 결과 서해 중부권역의 대규모 담수호가 서해 남부권역 대규모 담수호 대비 Chl-*a* 예측을 위한 설명률은 높았으나 0.8 이하로 분석되어 정확성이 높지 않은 것으로 판단된다.

결론: 서해 중부권역에 해당하는 담수호가 BOD, COD, TOC, T-N, T-P 모두 서해 남부권역 담수호에 비해 호소 수질이 악화된 것으로 조사되어 유기오염물질과 영양염류의 관리가 필요할 것으로 판단된다. 요인분석 결과 organic matter & algae 유형, nutrients 유형, physico chemical factors 유형, other complex 유형으로 분류하였으며, 각 유형에 맞는 적절한 수질 관리 대책이 필요할 것으로 판단된다. principal component analysis(PCA) 이후 수질 인자의 차원축소를 위해 수질 인자를 variation factor(VF)로 그룹화하여 변환하고 변수로 활용하여 요인분석을 진행한 결과 기존의 담수호 대상 연구 대비 설명률이 낮아 대규모 담수호의 경우 PCA 분석 결과를 통해 높은 영향을 미치는 수질 인자만을 추출하여 다중선형회귀분석 등 추가적인 분석을 진행하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

주제어: 다변량 통계분석, 대규모 담수호, 다중선형회귀분석, 주성분 분석

1. 서론

담수호는 수자원의 저장고로서 인간활동에 중요한 역할을

하며 국토의 약 70%가 산지로 구성되어 있는 우리나라의 경우 강우의 유출이 빨라 생활용수 및 농업용수의 확보 목적으로 담수호의 중요성이 강조되고 있다.¹⁾ 대규모 담수호는 담수

호 중 저수 용량이 5,000,000 ton 이상인 농업용 저수지로, 유역 최말단에 위치하고 있어 넓은 유역에서 복잡하고 다양한 오염원이 유입되며 호내에 장기간 체류 및 누적되는 특성이 있다.^{2,3)} 최근에는 상류유역의 급격한 도시화로 인해 오염물질 배출량의 지속적 증가로 수질악화가 가중되고 있으며, 특히 담수호 주변 농가들의 반복적 농업용수의 재이용으로 농업용 비점오염원의 지속적 유입과 누적, 복잡한 물이용 및 배수 구조로 인해 수질 오염이 더욱 가중되고 있는 추세이다.⁴⁾

일반적으로 담수호의 수질에 영향을 미치는 요인은 수문과 기후, 담수호의 유역 및 형상, 유역과 호내의 물리화학적 및 생물학적 특성 등의 다양한 자연적 요인 이외에도, 유역 내 인간 활동에서 배출되는 다양한 오염물질을 포함한 생활하수, 공장폐수, 축산폐수, 관개회귀수와 복잡한 유입경로의 점·비점오염원의 유입 등이 인위적 요인에 해당된다.^{5,6)} 또한, 대규모 담수호는 특성상 담수호 초기에 많은 오염부하에 노출되어 있으며, 정체 수역으로 유속이 느리고 물질순환 및 반응에 따른 변환 속도도 느리기 때문에 퇴적되는 오염물질의 양이 많고 장기간 퇴적된 저층 퇴적물로부터 용출되는 오염물질이 담수호 수계의 1차 생산과 수질 변화에 영향을 미치는 주요 요인 중 하나로 보고되고 있다.^{7,8)}

최근까지 담수호의 효율적인 수질관리를 위해 외부오염원 유입 차단 공법과 내부오염원 저감 및 제거를 위한 다양한 물리적(physical), 화학적(chemical), 생물학적(biological) 및 복합적(converged) 수질정화 공법 등이 적용되었으나⁹⁾, 대부분 개별 담수호의 정체 구간 단위로 수질개선 사업이 실행되고 있어 대규모 담수호의 통합적이고 지속적인 수질 관리를 위한 대책은 미비한 실정이다.²⁾ 대규모 담수호 특성상 유역 최말단에 위치해 넓은 유역 내 다양한 오염원과 다수의 유입하천, 복잡한 농경배수 경로, 유역의 도시화에 따른 신종 오염물질의 미처리 유입 등을 고려 시 담수호 지점별과 구간별 맞춤형 수질개선 대책이 요구되며 이를 위해서는 확실적인 수질관리 대책이 아닌 수질관리에 영향을 미치는 핵심변수를 도출하고 수질악화의 주요 요인과 주요 요인을 활용한 수질 예측을 통해 효과적으로 대응하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

따라서, 대규모 담수호의 효율적인 수질관리를 위하여 담수호 특성별 주요 오염인자를 합리적으로 산출하고 신뢰성 있는 수질자료의 해석을 지원하기 위해서는 기본통계분석(basic statistical analysis)과 다변량 통계분석(multivariate statistics)을 이용하여 복잡한 변수의 차원을 줄이며 주성분분석(principal component analysis), 요인분석(factor analysis) 등을 통한 주요 오염 인자의 통계적인 도출이 필요하다. 이러한 다변량 통계분석 기법은 하천 및 호소의 수질 특성을 평가하고 수질관리 정책을 결정시에 주로 활용하였으며¹⁰⁾, 농업용 저수지와 대규모 담수호의 수질평가를 위해서 적용된 바가 있다.^{11,12)}

기존의 농업용수 수질 유형화 방법에서는 유효저수량/만수면적비(effective storage/water surface, ST/WS)와 부영양화지

수(trophic state index, TSI) 기반 영양상태와 제한 영양염(algal growth potential, AGP)을 활용한 분류방법 등이 있다. 예를 들어, ST/WS가 큰 것은 상대적으로 저수용량이 크고, 저수지가 깊은 형상으로서 내부생산을 억제할 수 있는 형태인 것으로 판단하는 반면 ST/WS가 작은 것은 수표면적이 크기 때문에 상대적으로 수체 내 광량 유입이 많고, 저수지의 깊이가 얕으며 저수용량이 적어 부영양화현상이 발생하기 쉬운 형태인 것으로 판단한다.¹³⁾ 또한 TP 농도, Chl-*a* 농도, 투명도 자료에 의해 계산된 TSI 지수를 도출해 TSI 값의 범위를 활용해 조류 성장에 대한 제한 영양염을 기준으로 유형을 구분하는 경우도 있다.¹⁴⁾

그러나 이러한 농업용저수지 유형화의 경우 소규모 담수호에서는 비교적 합리적인 분류가 가능하지만 넓은 유역 내 다양한 오염원의 유입과 축적 및 농업용수의 반복 재사용 및 복잡한 관개 회귀수 경로 등으로 인해 수질오염이 가중되고 있는 대규모 담수호에서는 적용하기 어려운 것으로 판단된다. 실제 최근 5년간 농업용 호소 975개소(저수지 953개, 담수호 22개)의 수질을 측정해 분석한 결과, 소규모 농업용 저수지는 수질이 개선되는 반면 대규모 담수호(16개)는 농업용수 적합 기준인 4등급을 초과하는 비율이 늘어나고 있는 추세이다.⁴⁾

따라서, 본 연구에서는 서해권역에 위치한 국내 15개 대규모 담수호의 효율적인 수질관리를 목표로 담수호별 수질평가를 수행하기 위하여 장기간 축적된 다양한 수질 인자를 활용해 기본통계분석, 요인분석, 주성분분석 등 다변량 통계분석을 실시하여 대규모 담수호의 주요오염원을 도출해 효율적인 담수호 관리의 기초자료로 활용하고, 대규모 담수호의 수질을 종합적으로 평가하고 유형별 분류를 통해 동일 유형 담수호별 최적의 수질관리기법을 제시하고자 한다. 또한 다양한 수질 인자를 활용한 다변량 통계분석을 통해 부영양화로 인한 식물성 플랑크톤의 증식과 관련된 Chl-*a*의 예측을 위한 다중선형 회귀분석을 진행하여 장래의 Chl-*a*를 예측하고 조류 대발생에 영향을 주는 주요 인자를 파악하여 추후 효율적인 담수호 특성별 수질 개선 대책 수립을 위한 보조 자료로 활용하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 연구범위 및 대상지역

Fig. 1에 제시된 국내 대규모 담수호 중 서해 중부권역에 위치한 9개 대규모 담수호인 GanWol(GW), GeumGang(GG), NamYang(NY), DaeHo(DH), BuNam(BN), BuSa(BS), SapGyo(SG), SukMun(SM), ASan(AS), 서해 남부권역에 위치한 6개 대규모 담수호인 GoHeung(GoH), GunNae(GN), GeumHo(GeH), YoungSan(YS), YoungAm(YA), HaeNam(HN)을 포함한 총 15개 대규모 담수호의 지난 10년 혹은 5년 간의 수질자료를 종합적으로 분석하였다. 연구 대상으로 선정된 대규모

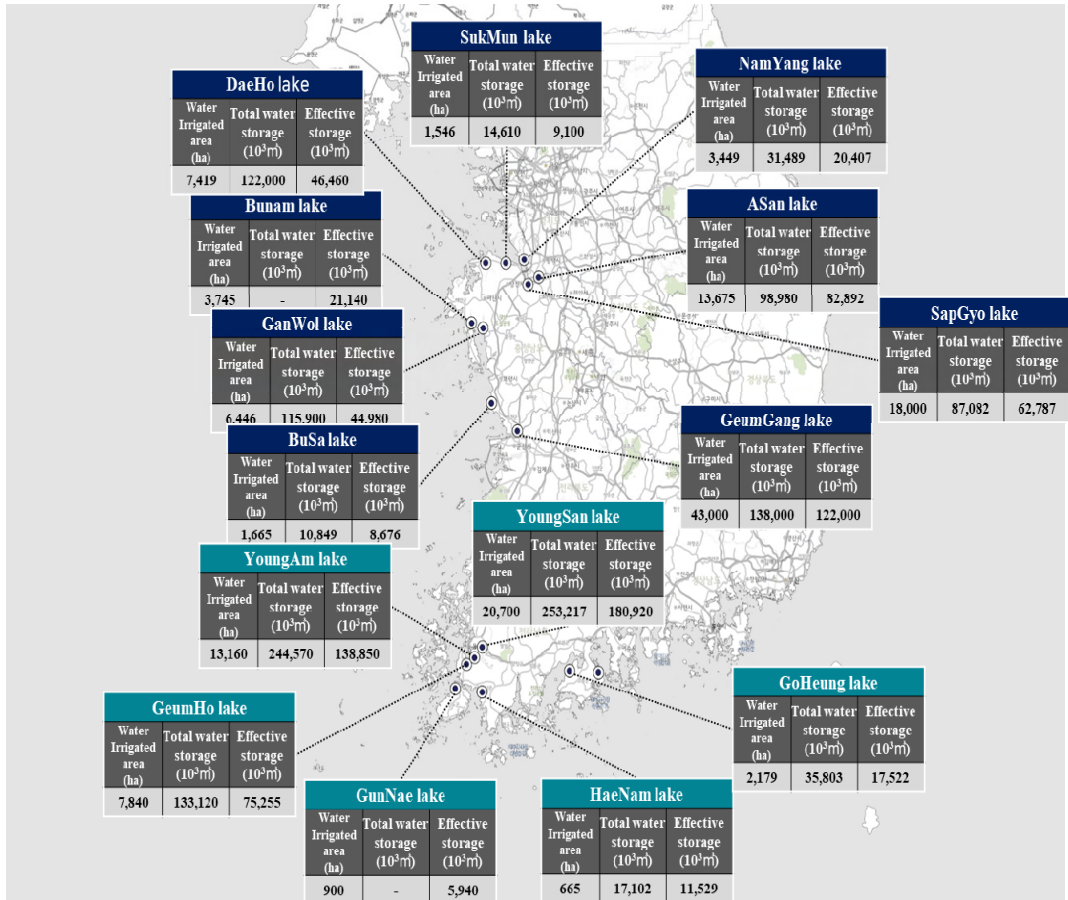


Fig. 1. Map of study area including water irrigated area, total water storage, and effective water storage of 15 large-scale freshwater lakes.

담수호의 기초 자료 조사를 진행한 결과, 대상 대규모 담수호의 평균 수혜면적(water irrigated area)은 9,636.27 ha, 평균 총 저수량(total water storage)은 100,209,380 m³, 평균 유효저수량(effective storage)은 56,563,870 m³으로 조사되었다.

2.2. 자료 수집

본 연구에서는 농업용수로 사용되는 국내 15개 대규모 담수호의 수질 자료를 환경부에서 운영하는 ‘물환경정보시스템 (<http://water.nier.go.kr>)’에서 수집하였다. GW, GG, GeH, NY, DH, BN, SG, AS, YS, YA의 경우 호내에 위치한 3개의 측정망에서 2011.01-2020.12 까지 10년간 1달 단위의 수질자료를 수집하고, GoH, GN, BS, SM, HN의 경우 호내에 위치한 1개의 측정망에서 2015.04-2019.03 까지 5년간 분기단위의 수질자료를 수집하였다. 물환경정보시스템에서 제공되는 다양한 수질자료 중 이화학적 인자인 pH, temperature(Temp.), dissolved oxygen (DO), electric conductivity(EC), total coliforms(T-Coli.), suspended solids(SS)와 유기오염물질인 biochemical oxygen demand(BOD), chemical oxygen demand(COD), total organic carbon(TOC), 영양염류인 total nitrogen(T-N), nitrate nitrogen (NO₃-N), ammonia nitrogen(NH₄-N), dissolved total nitrogen

(DT-N), total phosphorus(T-P), phosphate-phosphorus(PO₄-P), dissolved total phosphorus(DT-P), 독립영양식물인 조류의 Chl-a 자료를 수집하여 통계분석에 활용하였다(Table 1).

2.3. 한국형 부영양화지수(TSI_{ko}) 도출

한국형 부영양화지수에서는 우리나라 유역 특성을 고려해 외부기원 유기물 특성을 고려한 COD, 내부생성 유기물로 식물플랑크톤의 현존량을 의미하는 Chl-a, 부영양화의 주요 원인이 되는 인자 T-P를 부영양화 평가항목으로 선정하였으며, 개발된 부영양화지수 산출식은 다음과 같다.^{15,16)}

$$TSI_{ko}(COD) = 5.8 + 64.4 \log(COD \text{ mg/L}) \quad (Eq.1)$$

$$TSI_{ko}(T-P) = 114.6 + 43.3 \log(T-P \text{ mg/L}) \quad (Eq.2)$$

$$TSI_{ko}(Chl-a) = 12.2 + 38.6 \log(Chl-a \text{ mg/L}) \quad (Eq.3)$$

외부기원 유기물의 밀도지표는 COD로 50%, 내부생성 유기물의 지표인 조류의 밀도지표인 Chl-a와 조류의 밀도를 좌우하는 지표인 T-P 두가지에 각각 25%의 가중치를 두어 다음과

Table 1. Water quality parameters evaluated in this study from 15 large-scale freshwater lakes.

Freshwater lakes (No. of monitoring sites)	Abbreviation	Water Quality Parameters
GanWol (3)	GW	pH, EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$), DO (mg/L), BOD (mg/L), COD (mg/L), SS (mg/L), TOC (mg/L), T-N (mg/L), $\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L), $\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/L), DT-N(mg/L), T-P (mg/L), $\text{PO}_4\text{-P}$ (mg/L), DT-P(mg/L), T-Coli (/100 mL), Temp. ($^{\circ}\text{C}$), Chl- <i>a</i> (mg/m ³)
GeumGang (3)	GG	
GeumHo (3)	GeH	
NamYang (3)	NY	
DaeHo (3)	DH	
BuNam (3)	BN	
SapGyo (3)	SG	
ASan (3)	AS	
YoungSan (3)	YS	
YoungAm (3)	YA	
GoHeung (1)	GoH	pH, EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$), DO (mg/L), BOD (mg/L), COD (mg/L), SS (mg/L), TOC (mg/L), T-N (mg/L), T-P (mg/L), Temp. ($^{\circ}\text{C}$), Chl- <i>a</i> (mg/m ³)
GunNae (1)	GN	
BuSa (1)	BS	
SeokMun (1)	SM	
HaeNam (1)	HN	

같이 계산한다.

$$\text{종합TSI}_{\text{ko}} = 0.5\text{TSI}_{\text{ko}}(\text{COD}) + 0.25\text{TSI}_{\text{ko}}(\text{T-P}) + 0.25\text{TSI}_{\text{ko}}(\text{Chl-}a) \text{ (Eq.4)}$$

종합 TSI_{ko} 의 결과를 바탕으로 빈영양(Oligotrophic, $\text{TSI}_{\text{ko}} \leq 30$), 중영양(Mesotrophic, $30 < \text{TSI}_{\text{ko}} \leq 50$), 부영양(Eutrophic, $50 < \text{TSI}_{\text{ko}} \leq 70$), 과영양(Hypertrophic, $\text{TSI}_{\text{ko}} > 70$)의 4단계로 영양상태를 분석하였다.

2.4. 다변량 통계분석

자료의 통계분석 프로그램은 SPSS ver. 22(IL, USA)를 활용하였으며, 각 담수호별 기본통계분석과 상관분석, 요인분석 등의 다변량통계분석을 진행하였다. 기본통계분석을 통해 평균값, 중간값, 표준편차, 사분위수 등 빈도분석과 히스토그램 등의 그래프 분석을 진행하였으며, 기본통계 분석 후 수질자료 표준화(standardization)를 실시 후 Shapiro-wilk 검정기준으로 정규성 검증(normality test)을 실시하여 $p > 0.05$ 이면 정규성 분포로 판정하였다. 각 담수호의 수질 인자가 정규성을 띠지 않을 경우 로그변환 후 분석을 진행하여 수질 인자가 정규성분포를 나타내도록 변환하였다. 대상 담수호 중 3개의 수질 인자 측정값을 가진 담수호(GW, GG, NY, DH, BN, SG, AS, GeH, YS, YA)의 경우 일원분산분석(analysis of variance, ANOVA)을 진행하였다. ANOVA 분석을 통해 공간적(spatial) 수질 변화가 통계학적으로 유의하지 않다($p < 0.05$)는 가설이 기각된 5개 담수호(GW, NY, AS, GeH, YS)의 경우 담수호 중앙부에 위치한 측정망에서 수집된 수질 인자가 담수호를 대표한다고 가정하여 해당 측정망의 수질자료를 토대로 분석을 진행하였다.

상관분석(correlation analysis)은 피어슨 상관계수(Pearson Correlation Coefficient: r)를 이용하였으며, 요인분석은 실행

하기 전 자료에 대한 타당성을 검증하기 위해 표본 적합도 검정(Kaiser Meyer Olkin test, KMO test)을 실행하였다. KMO test를 통해 1에 가까울수록 타당성이 높으며, 0.5 이하일 경우 타당성이 낮은 것으로 판단하였다.^{17,18)} 요인 패턴의 구조를 단순화시켜 요인에 대한 해석을 보다 쉽게 하기 위해 요인 축을 회전(rotation)시키는데 요인 축을 회전하는 방법에는 크게 직교회전(orthogonal)과 사각회전(oblique)이 있다.¹⁹⁾ 본 연구는 직교회전법으로 요인 적재 값이 가장 높은 변수를 최소화하는 Varimax 회전법을 활용하였다.

다중선형회귀분석은 독립변수가 2개 이상인 경우 독립변수와 종속변수 간의 상호 연관성 정도를 파악하는 분석방법으로 본 연구에서는 다중선형회귀분석을 통해 Chl-*a*와 수질 인자들이 함께 포함된(lumped) varimax factors간의 상호 연관성 정도를 파악하였다. 변수 투입 방법은 입력(enter), 전진(forward), 후진(backward)법을 비교하여 가정 최적의 방법을 활용해 분석하였다.²⁰⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 담수호 수질 분석 결과

앞서 수집된 수질 인자를 활용하여 15개 대상 대규모 담수호의 수질 분석 결과를 Box and Whisker plot으로 Fig. 2에 제시하였다. 유기오염물질인 COD, TOC 농도 분석 결과, 서해 중부권역 담수호가 남부권역 담수호 대비 높은 유기오염물질 농도를 나타냈으며, 모든 담수호가 평균적으로 농업용수 사용기준인 호소 수질기준(IV 등급)을 초과(COD: 8 mg/L 이하, TOC: 6 mg/L 이하)하였다. 또한, 담수호별 COD, TOC 농도 평균값 차이가 통계학적으로 유의($p < 0.05$)하고, 변동계수(coefficient of variation)도 담수호별 차이가 큰 것으로 조사되

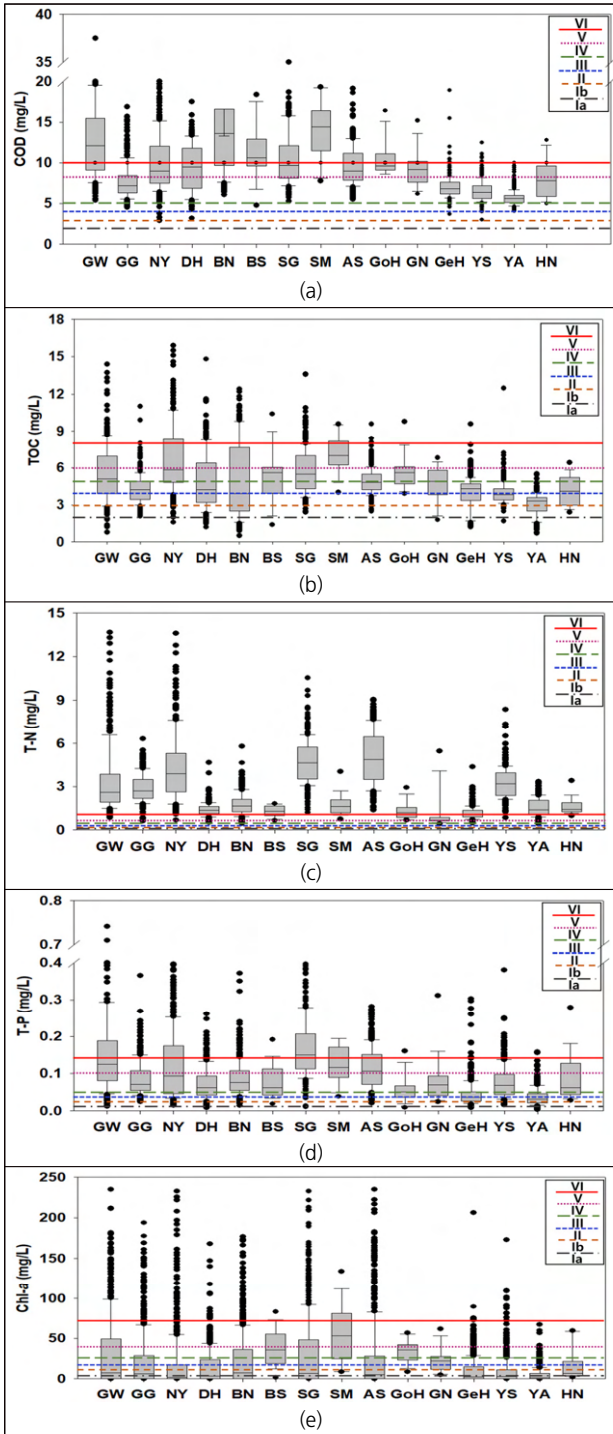


Fig. 2. Box and Whisker plots for different water quality parameters of 15 large-scale freshwater lakes during 2010-2020: (a)COD, (b)TOC, (c)T-N, (d)T-P, (e)Chl-*a* with water quality standards.

있으며, 이러한 분석결과는 최근 급격하게 도시화/산업화된 서해 중부권역에 위치한 담수호(GW, BN, SM)로 생활하수·축산폐수 등이 지속 유입되어 수질이 갈수록 악화되고 있고, 강우 유출수 내 유기물과 영양염류의 유입 증가로 인해 난분해성 유기물질의 축적과 내부 발생량 증가를 유발하여 비교적

높은 유기오염물질 농도를 유발하는 것으로 판단된다.^{21,22)}

T-N과 T-P의 경우에도 서해 중부권역의 담수호가 서해 남부권역 담수호에 비해 높은 농도(호소 수질 기준 V-VI)로 조사되었다. T-N의 경우 GN를 제외한 모든 담수호에서 농업용수 수질기준(IV 등급)을 초과(T-N: 1.0 mg/L 이하)하며 이는 대규모 담수호 특성상 넓은 유역에서 발생하는 축산계 및 토지계 비점오염원의 지속적 유입 및 축적으로 인해, 비교적 높은 농도의 T-N 값이 확인된 것으로 판단된다. T-P의 경우 GeH, YA를 제외한 모든 담수호에서 농업용수 수질기준(IV 등급)을 초과(T-P 호소 4등급 기준: 0.1 이하)하였으며, 강우시 유출되는 비점오염물질과 인위적인 활동이 활발한 유역 내 하류부에서 T-P의 배출이 지속적으로 증가하였기 때문으로 판단된다.

Chl-*a* 농도 역시 T-N, T-P 농도와 동일하게 서해 중부권역 담수호가 서해 남부권역 담수호에 비해 높게 측정되었으며 여름철에 정체된 수역에서 조류의 과다한 성장이 관측되었으나, Chl-*a*의 계절별 편차가 매우 크고 여름철에 가장 높은 Chl-*a* 농도를 나타내 변동 계수는 매우 높은 편이다. 대규모 담수호의 경우, 넓은 유역에서 다량의 비점오염물질이 유입됨에 따라 영양염류가 풍부하고 정체된 수역이기 때문에 여름철에 조류의 과다한 성장이 관측된다.²³⁾ 서해 중부권역 담수호는 미처리 하수의 유입, 축산계, 토지계 비점오염원의 지속적 유입과 내부 퇴적토의 영양염류 용출로 조류가 과다 발생하는 반면, 남부권역 담수호는 YS과 GeH를 제외하면 조류 과다 발생이 제한적인 것으로 분석되었으며, 이러한 결과는 남부권역 유역 대비 도시화, 개발활동 등의 토지이용 고도화가 진행된 서해 중부권역 유역의 불투수면의 증가로 인한 비점오염원 유출 증가가 주요 요인으로 판단된다.

3.2. 한국형 부영양화지수 산정 결과

수집된 수질자료를 활용하여 15개 대상 대규모 담수호의 연간 한국형 부영양화지수(TSI_{ko})를 산정, (1) COD, (2) Chl-*a*, (3) T-P와 (4) 종합 TSI_{ko} 4개의 단계로 나누어 분석한 결과는 Fig. 3과 같다. 일반적으로 서해 중부권역의 담수호가 서해 남부권역 담수호에 비해 주요 토지 이용이 도시화/산업화된 비율이 급격히 증가하고 있으며, 강우시 축산시설 및 농지에서 유입되는 비점오염원의 유입량의 증대 및 홍수기 농경지에서 다량 배출되는 인의 유입 등으로 조류발생에 적합한 부영양화 조건으로 산정되었다.^{21,24)}

NY, SG, YA, HN, YS, GN는 TSI_{ko}(T-P) > TSI_{ko}(Chl-*a*)로 산정되어 총인 이외에도 투명도, 체류시간 등의 다른 요인이 조류 성장을 제한 할 가능성이 있다. 또한, DH, BN, BS, SM, YA, GoH, GN는 TSI_{ko}(COD) > TSI_{ko}(Chl-*a*)으로 유기물의 근원이 주로 외부기원 유기물이며 처리되지 않은 하수와 산림이나 농경지의 부식질이 많이 유입되었을 것으로 사료된다. GW, GG, AS, GeH는 TSI_{ko}(Chl-*a*) > TSI_{ko}(T-P) > TSI_{ko}(COD)

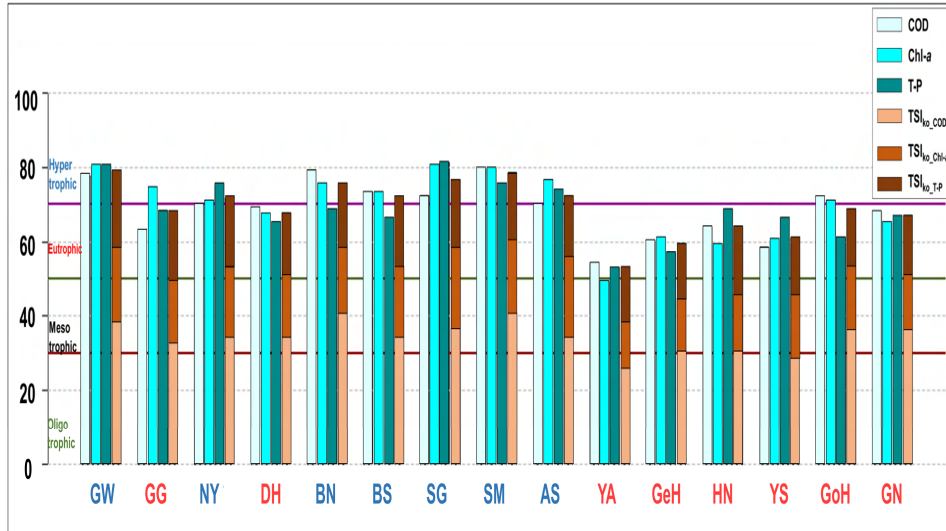


Fig. 3. Bar plots for TSI_{ko} results of 15 large-scale freshwater lakes.

의 경우이며 부유성 조류가 우점하여 수면에 밀집하게 서식하며 표층에 조류가 발생하는 특성을 나타내며 조류의 내부생산이 활발하여 수체의 영양상태가 부영양으로 분류되는 것으로 판단된다.²⁵⁾

3.3. 담수호 상관 분석 결과

연구 대상 대규모 담수호 중 서해 중부권역의 GW, NY, DH, 서해 남부권역의 GeH, YS, YA를 대표 담수호로 선정하여 Pearson 상관분석을 진행하였으며, R studio를 사용한 상관분

석 결과는 Fig. 4에 나타났다. 본 연구에서는 다양한 환경인자에 의해 성장속도와 증식량이 결정되는 내부생성 유기물인 Chl-a와 다른 수질 인자 간의 Pearson 상관 관계를 주로 분석하였다. GW의 경우 Chl-a와 BOD, COD, SS, T-P, TOC, Temp., NH₄-N, NO₃-N이 0.01 수준에서 유의하였고, BOD, COD의 상관계수가 가장 높았다. pH, EC, PO₄-P의 경우 0.05 수준에서 유의한 결과를 나타냈다. NY의 경우 Chl-a와 pH, DO, BOD, COD, SS가 0.01 수준에서 유의하였고, T-N, Temp., NO₃-N은 0.05 수준에서 유의한 결과를 나타냈다. DH

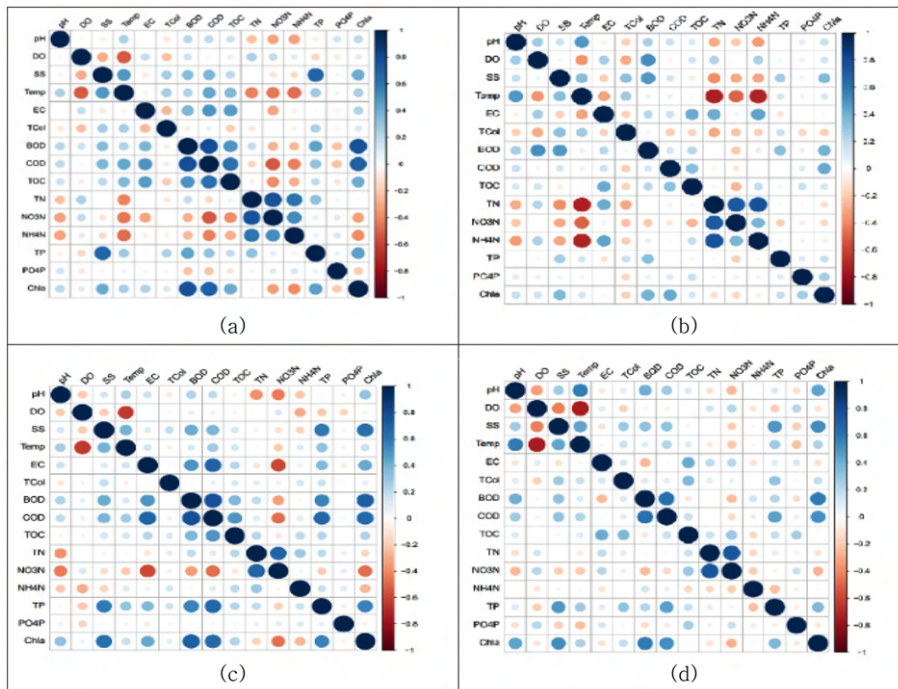


Fig. 4. Pearson correlation analysis on water quality parameters during 2010-2020 for each large-scale freshwater lake: (a)GW, (b)NY, (c)DH, (d)GeH, (e)YS, and (f)YA.

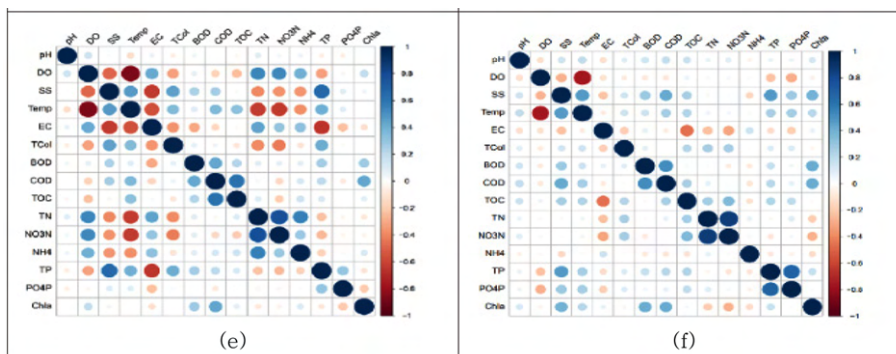


Fig. 4. Pearson correlation analysis on water quality parameters during 2010-2020 for each large-scale freshwater lake: (a)GW, (b)NY, (c)DH, (d)GeH, (e)YS, and (f)YA (Continued).

의 경우 Chl-a와 pH, BOD, COD, SS, T-P, TOC, NH₄-N, NO₃-N, EC가 0.01 수준에서 유의하고, Temp.의 경우 0.05 수준에서 유의한 결과를 나타냈다. 서해 중부권역 3개 담수호 모두 유기물 인자인 BOD, COD가 Chl-a와 높은 양의 상관관계를 나타내 유입되는 유기물질 혹은 담수호내에 존재하는 유기물질의 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

GeH의 경우 Chl-a와 pH, BOD, COD, SS, T-P, Temp.가 0.01 수준에서 유의하였고, NO₃-N의 경우 0.05 수준에서 유의한 것으로 분석되었다. YS의 경우 pH, BOD, COD, PO₄-P가 0.01 수준에서 유의하였고, DO가 0.05 수준에서 유의한 것으로 분석되었다. YA의 경우 Chl-a와 pH, BOD, COD, SS, T-N, T-P, Temp., NH₄-N, NO₃-N이 0.01 수준에서 유의한 것으로 분석되었다. Pearson 상관계수의 차이는 있지만 6개 담수호

모두 BOD, COD가 가장 상관계수가 높아 유기물질의 우선적인 관리가 필요하다고 판단된다. 이러한 유기물과 조류의 높은 상관성은 다른 연구에서도 동일하게 보고²⁶⁾되고 있으며, 유역에서 유입되는 외부기원 유기물 특성을 고려한 BOD, COD, 내부생성 유기물인 식물 플랑크톤 현존량의 높은 상관성을 의미한다. 그러나 Pearson 상관계수 결과를 종합적으로 분석하였을 때 일부 수질 인자를 제외한 수질 인자들의 상관계수 값의 유의한 차이가 확인되지 않았다. 부영양화는 다양한 수질 인자의 복합적인 작용에 의해 발생하며, 수체 지점별 특성이 매우 다른 대규모 담수호의 조류 발생 예측을 위해서는 다양한 수질 인자와 환경인자 사이의 시공간에 따른 복합적인 상호작용이 고려되어야 한다고 판단된다.

Table 2. Results of factor analysis for large-scale freshwater lakes located in central region.

Reservoir	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	KMO-test	
GW	Variable	BOD, COD, Chl-a	Temp., DO, PO ₄ -P	TN, NO ₃ -N	TOC, T-Coli.	pH	N.A.	0.721
	Cumulative rate	23.38	41.92	60.04	72.00	78.82		
GG	Variable	Temp., T-N, NO ₃ -N	SS, T-P	BOD, COD, Chl-a	NH ₄ -N	N.A.	N.A.	0.721
	Cumulative rate	24.38	43.87	60.49	69.25			
NY	Variable	Temp.,DO, T-N, NH ₄ -N	BOD, COD, Chl-a	T-P	TOC, EC, TN/TP	pH, T-Coli.	N.A.	0.630
	Cumulative rate	24.38	40.78	56.32	69.79	78.84		
DH	Variable	COD, T-P, Chl-a, TN/TP	T-N, NO ₃ -N	T-N, NO ₃ -N	T-P, PO ₄ -P	N.A.	N.A.	0.665
	Cumulative rate	19.42	36.00	50.23	64.08			
BN	Variable	BOD, Chl-a	COD, TOC, EC	T-N	Temp., DO	PO ₄ -P	T-Coli.	0.590
	Cumulative rate	18.27	33.49	46.33	57.47	67.76	75.58	
BS	Variable	COD, SS, EC, T-P, Chl-a	T-N	Temp.	N.A.	N.A.	N.A.	0.453
	Cumulative rate	40.75	61.50	77.77				
SG	Variable	Temp., NO ₃ -N	Chl-a	T-P, PO ₄ -P	EC, T-N, NH ₄ -N	N.A.	N.A.	0.686
	Cumulative rate	19.06	37.72	53.72	69.50			
SM	Variable	pH, TOC, COD, EC, SS, Chl-a	Temp., DO, T-P	T-N	N.A.	N.A.	N.A.	0.195
	Cumulative rate	37.97	69.91	84.48				

Table 3. Results of factor analysis for large-scale freshwater lakes located in southern region.

Reservoir	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6	KMO-test	
YA	Variable	T-P, PO ₄ -P	T-N, NO ₃ -N	Temp., DO	EC	BOD, COD	N.A.	0.649
	Cumulative rate	15.17	30.09	44.45	57.53	70.34		
GeH	Variable	EC, T-P, PO ₄ -P	T-N, NO ₃ -N	SS, Chl- <i>a</i>	Temp., DO	TOC	N.A.	0.583
	Cumulative rate	18.10	33.74	48.94	63.29	75.47		
HN	Variable	DO, T-P, TN/TP	pH, COD, TOC, Chl- <i>a</i>	EC	N.A.	N.A.	N.A.	0.337
	Cumulative rate	33.93	64.63	83.34				
YS	Variable	SS, EC, T-P, TN/TP	Temp., T-N, NO ₃ -N	COD	Chl- <i>a</i>	N.A.	N.A.	0.708
	Cumulative rate	24.37	46.28	59.03	71.30			
GoH	Variable	COD, T-N, T-P	Chl- <i>a</i>	TN/TP, EC	pH	Temp., DO	N.A.	0.209
	Cumulative rate	26.01	43.36	59.86	74.56	89.17		
GN	Variable	Temp., DO, COD, TOC, Chl- <i>a</i>	EC, T-P	T-N	pH	N.A.	N.A.	0.438
	Cumulative rate	40.80	61.43	74.36	86.65			

3.4 요인 분석 및 주성분 분석 결과

15개 담수호의 요인분석 결과를 **Tables 2 ~ 4**에 나타냈다. 대부분 호소의 KMO-test 결과가 0.5 이상으로 요인분석의 타당성이 높게 평가됐으나, BS, SM, HN, GoH, GN의 경우 0.5 이하로 타당성이 낮아 요인분석 결과의 신뢰도가 낮은 것으로 판단된다. SM, GoH의 경우 KMO-test 결과가 0.3 이하로 분석되어 타당성이 비교적 낮아 수질 인자를 추가로 확보한 뒤 다변량 통계분석을 진행해야 정확하고 의미있는 분석이 이루어질 것으로 판단된다. 모든 담수호의 경우 3~6개의 요인이 추출되었으며, 추출된 요인은 평균 70% 이상의 기여율을 나타냈다. 그러나 요인 추출 결과 다양한 요인들이 복합적으로 추출되어 요인들 간의 상호작용이 매우 복잡해 명확한 요인의 도출이 어려워, 기여율이 가장 높은 제1 요인(Factor 1)을 통해 유형화를 진행한 선행연구²⁷⁾의 기법을 준용하였다. 유의성이 가장 높은 요인 1에 추출된 수질 인자를 바탕으로 organic matter & algae (BOD, COD, TOC, Chl-*a*), nutrients (T-N, NH₄-N, NO₃-N, TP, PO₄-P), physico chemical factors (pH, DO, SS, Temp., EC, T-Coli), other complex 유형으로 분류하여 요인 분석을 진행하였다.

분석 결과 GW, DH, BN, SM, GN의 경우 organic matter & algae로 분류되어 유역 내의 도심하천 및 산업단지 등에서

Table 4. Classification of 15 large-scale freshwater lakes based on major factors (factors 1) from factor analysis.

	Organic matter & Algae	Nutrients	Physico chemical factors	Other complex
Parameters (variables)	BOD, COD, TOC, SS, Chl- <i>a</i>	T-N, T-P, NH ₄ -N, NO ₃ -N, PO ₄ -P	pH, DO, Temp., EC, T-Coli.	Various variables
Agricultural Reservoir	GW, DH, BN, SM, GN	GG, SG, YA, GeH, HN, GoH	NY, AS	BS, YS

유입되는 유기물 오염물질 부하의 증가로 인한 것으로 판단되며, 유입부에서 난분해성 유기물질의 유입저감과 호내 퇴적토의 지속적 준설 등 유기물질과 조류를 동시에 관리할 수 있는 방안이 필요할 것으로 판단된다. GG, SG, YA, GeH, HN, GoH의 경우 nutrients 유형으로 분류되어 수계 인근지역에 위치한 농업, 축산단지로부터 유입되는 질소계열 오염물질과 인계열 오염물질 부하가 증대되어 오염이 진행된 것으로 판단되며, 조류 대발생의 원인이 될 수 있는 영양염류의 저감을 위해 비료 사용 저감, 하수처리장 증설 등 관리를 통해 조류 발생을 억제할 필요가 있을 것으로 판단된다. NY, AS의 경우 physico chemical factors로 분류된다. physico chemical factors 중 DO가 낮은 무산소 상태의 경우 준설토의 영양염류 용출이 일어날 가능성이 높기 때문에²⁸⁾ 호수 저질의 DO 관리를 통한 인계열 오염물질의 수계 내로 용출의 저감이 중요할 것으로 판단된다. BS, YS의 경우 Other complex 유형으로 분류되어 수계의 오염원과 토지이용특성의 영향보다는 다양한 요인들의 결합된 상호작용으로 조류 대발생이 지속되는 것으로 판단된다.

GW, NY, DH, GeH, YS, YA의 요인 3까지의 주성분 분석 결과를 **Fig. 5**에 제시하였다. 주성분 분석 결과 6개 담수호의 주요 요인(principal component) PC1-3의 요인간 유형화가 복합적으로 이루어져 명확한 유형화는 어려우며 이는 담수호의 수질이 다양한 수질 인자 간의 상호적이며 복합적인 영향에 의해 변동되는 것으로 판단된다. 넓은 유역에서 다양하고 복잡한 오염물질이 유입되고 반복적 농업용수의 재이용으로 관개 회귀수 내 다양한 비점오염원의 지속적 유입과 누적, 복잡한 물이용 및 배수구조로 인해 특정한 수질 인자가 지배적인 요인을 가지고 대규모 담수호의 수질 특성을 명확하게 설명하기는 어려운 것으로 판단된다. 유사한 연구²⁹⁾에서의 요인 분석 결과에서도 하류로 유하하면서 농경지와 주거지로부터 비롯되는 탁수와 농촌 생활하수의 영향이 큰 것으로 추정된다고 보고하고 있다. 해당 연구에서는 일반적으로 PC1은 유기오염

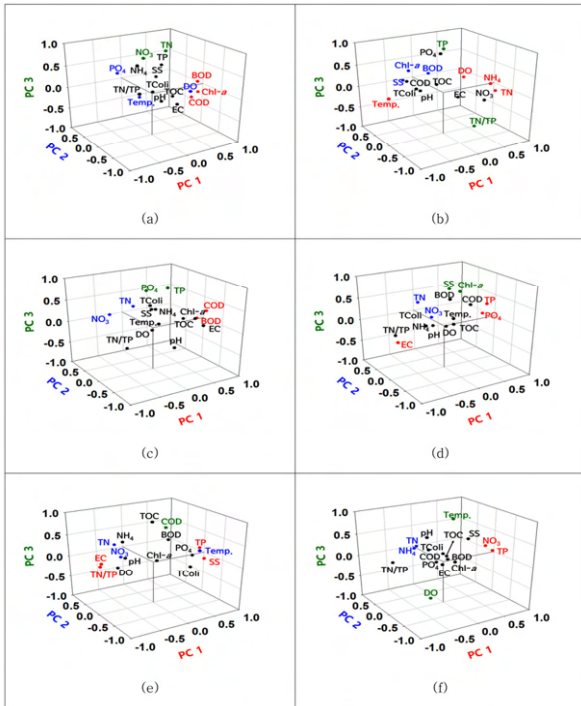


Fig. 5. Principal component analysis on water quality parameters during 2010-2020 for each large-scale freshwater lake (Spearman's correlation $\rho > 0.2$): (a)GW, (b)NY, (c)DH, (d)GeH, (e)YS, and (f)YA.

물질이 주요 요인, PC2는 영양염류가 주요 요인, PC3은 기타 다양한 수질 인자의 결합이 주요 요인으로 조사되어 본 연구와 비교적 유사한 것으로 판단된다.

TSI_{ko} 분석 결과와 주성분 분석 결과(즉, organic matter & algae, nutrients, physico chemical factors, 그리고 other complex 유형)를 종합하여 Fig. 6에 제시하였다. 서해 중부권역의 7개 담수호는 Hypertrophic 등급으로 분류되었으며, 주요 오염원인은 유기물과 조류인 것으로 판명되었다. 반면 서해 남부권역의 모든 담수호는 Eutrophic 등급으로 분류되었으며, 주요 오염원인은 영양염류인 것으로 판명되어 담수호 별 오염특성에 적합한 맞춤형 수질관리가 필요함을 확인할 수 있었다.

PCA 분석 후 PC1-2가 복합적인 결과를 나타내는 NY과

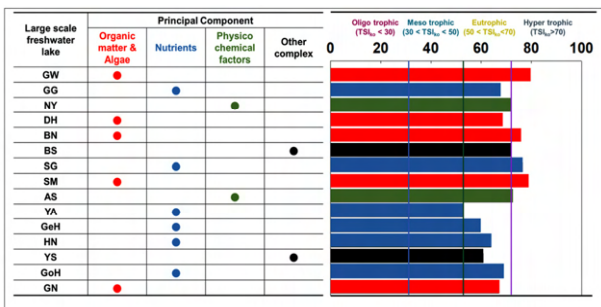


Fig. 6. Comparison of TSI_{ko} and PCA analysis results for 15 large-scale freshwater lakes.

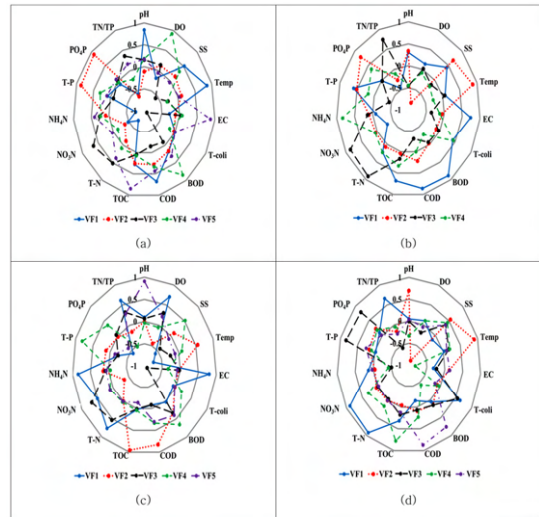


Fig. 7. Varimax factors and loadings on identified water quality parameters after rotation: (a)NY, (b)DH, (c)YS, and (d)YA.

YS, PC1-3가 비교적 유형화가 이루어지는 DH, YA로 구분하여 NY, DH, YS, YA의 계절별 평균 수질 인자들을 사용하여 차원을 축소시켜 VF(varimax factor)값으로 변환한 VF별 수질 인자들의 기여율을 Fig. 7에 나타냈다.

NY의 경우 VF1-5의 총 설명율이 86.58%로 분석되었다. VF1의 경우 36.96%의 설명율을 가지며 pH와 Temp.가 높은 양의 기여율을 나타내며, T-N과 NH₄-N이 높은 양의 기여율을 나타낸다. 즉, 이화학적 요인과 질소계 수질 인자의 영향이 클 것으로 판단되며, 실제 NY의 경우 서해 중부권역 담수호 중 평균 T-N 농도가 비교적 높은 것으로 조사되었다. VF2의 경우 21.54%의 설명율을 가지며 T-P, PO₄-P가 높은 양의 기여율을 나타냈다. VF3의 경우 11.77%의 설명율을 가지며 T-Coli이 높은 음의 기여율을 나타냈다. DH의 경우 VF1-4의 총 설명율이 75.41%로 분석되었다. VF1의 경우 35.09%의 설명율을 가지며 BOD, COD, EC가 높은 양의 기여율을 나타내어 유기오염물질 인자의 영향이 클 것으로 판단된다. VF2의 경우 17.54%의 설명율을 가지며 Temp.가 높은 양의 기여율을, DO가 높은 음의 기여율을 나타냈다. VF3의 경우 13.95%의 설명율을 가지며 T-N, NO₃-N이 높은 양의 기여율을 나타냈다. VF4의 경우 8.83%의 설명율을 가지며 NH₃-N이 높은 양의 기여율을 나타냈다.

YS의 경우 VF1-5가 83.29%의 총 설명율을 가지는 것으로 분석된다. VF1의 경우 43.70%의 설명율을 가지며 DO, T-N, EC가 높은 양의 기여율, Temp.가 높은 음의 기여율을 가지는 것으로 분석되어 이화학적 요인과 질소 농도가 영향이 높은 것으로 판단된다. VF2의 경우 15.30%의 설명율을 가지며 COD, TOC가 높은 양의 기여율을 가진다. VF3의 경우 9.92%의 설명율을 가지며 T-Coli이 높은 음의 기여율을 가지는 것으로 분석된다. YA의 경우 VF1-5가 총 78.45%의 설명율을 나타냈다. VF1의

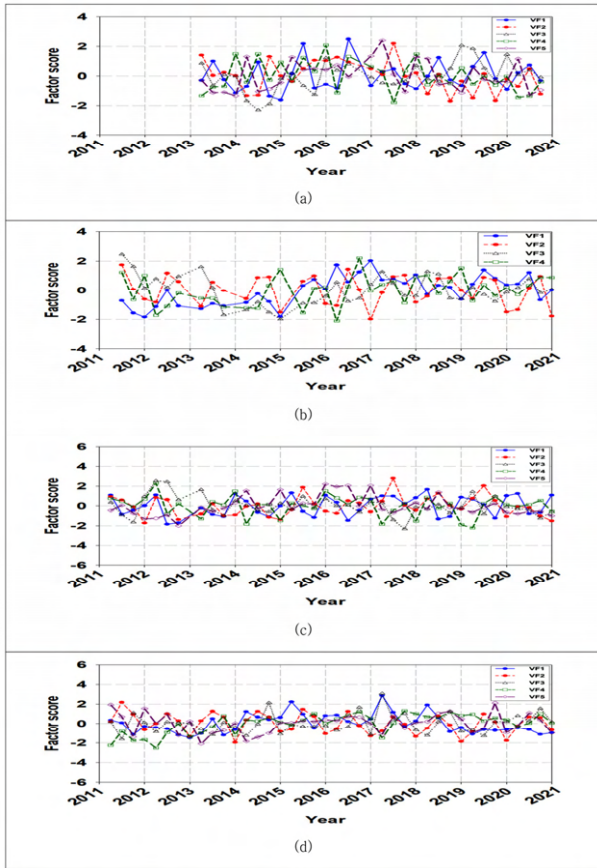


Fig. 8. Changes in varimax factors with time during 2011-2021 for each large-scale freshwater lake: (a)NY, (b)DH, (c)YS, and (d)YA.

경우 26.87%의 설명율을 가지며 T-N, NO₃-N이 높은 양의 기여율을 나타내어 질소계 수질 인자의 영향이 클 것으로 판단된다. VF2의 경우 23.06%의 설명율을 가지며 Temp.가 높은 양의 기여율을 나타내며, DO가 높은 음의 기여율을 나타내었다. VF3의 경우 12.79%의 설명율을 가지며 T-P, PO₄-P가 높은 양의 기여율을 가지는 것으로 분석되었다.

본 연구의 대상지역인 NY, DH, YS, YA 4개 담수호 VF Factor score의 시계열 변화 결과 (Fig. 8)는 기존의 연구³⁰⁾와 다르게 명확한 경향성을 판단하기 어려우며 이는 계절적 요인보다 각 수질 인자 간의 복합적인 작용이 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 PCA 분석 이후 수질 인자의 차원 축소를 위해 수질 인자를 VF로 그룹화하여 변환하고 변수로 활용하여 요인분석을 진행한 결과가 기존의 담수호 대상 연구^{31,32)} 대비 설명률이 낮아 대규모 담수호의 경우에는 PCA 분석 결과를 통해 높은 영향을 미치는 수질 인자만을 추출하여 다중 선형회귀분석 등 추가적인 분석을 진행하는 것이 타당할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과가 나타나는 원인은 대규모 담수호의 특성상 유역 하구에 위치하여 넓은 유역에서 다양하고 많은 양의 오염물질이 유입되고 측정 지점별로 수질 인자의 농도가 상이하며, 담수호 내 퇴적토에 포함된 영양염

Table 5. Multiple linear regressions of Chl-*a* using varimax factors for NY, DH, YS, and YA.

Multiple linear regression model by enter		R ²	p
NY	Y=3.38+0.40VF1+0.30VF2-0.09VF3+0.35VF4+0.03VF5	0.611	0.0
DH	Y=2.94+0.61VF1+0.21VF2-0.26VF3-0.23VF4	0.774	0.0
YS	Y=2.30+0.01VF1+0.10VF2-0.10VF3+0.15VF4+0.30VF5	0.288	0.0
YA	Y=1.83-0.21VF1+0.09VF2+0.1VF3-0.04VF4+0.21VF5	0.285	0.0
Multiple linear regression model by forward		R ²	p
NY	Y=3.38+0.40VF1+0.30VF2+0.35VF4	0.551	0.0
DH	Y=2.94+0.61VF1+0.21VF2-0.26VF3-0.23VF4	0.774	0.0
YS	Y=2.30+0.01VF1+0.10VF2-0.01VF3+0.15VF4	0.236	0.0
YA	Y=1.83-0.21VF1+0.21VF5	0.303	0.0
Multiple linear regression model by backward		R ²	p
NY	Y=3.38+0.40VF1+0.30VF2+0.35VF4	0.551	0.0
DH	Y=2.94+0.61VF1+0.21VF2-0.26VF3-0.23VF4	0.774	0.0
YS	Y=2.30+0.15VF4+0.30VF5	0.285	0.0
YA	Y=1.83-0.21VF1+0.21VF5	0.303	0.0

류와 일사량, 풍량, 수위 등 담수호 외적요인들의 복합적인 영향 때문인 것으로 판단된다.

3.5. Chl-*a* 예측을 위한 Multiple linear regression analysis

위에서 분석된 VF를 사용하여 Chl-*a*의 변화를 예측하기 위하여 다중선형회귀분석을 진행하였다. NY, DH, YS, YA의 VF값을 이용하여 Enter, Forward, Backward multiple linear regression을 진행하였다(Table 5).

모든 regression model의 p<0.05로 분석되어 각 예측식의 독립변수들이 Chl-*a*를 설명하는데 의미가 있었으며, NY, DH의 다중선형회귀분석 모델의 경우 각각 R² 값이 0.611, 0.774로 분석되었으며 YS, YA의 경우 각각 R²가 0.288, 0.285로 분석되어 대상 담수호 중 서해 중부권역의 담수호가 서해 남부권역 담수호에 비해 설명률은 높았으나 모두 0.8 이하로 분석되어 정확성이 높지 않은 것으로 판단된다. 이러한 결과의 원인은 본 연구에서는 수질 인자를 계절별 평균값을 사용하여 분석을 진행하였으나 일 자료(daily data)를 사용할 경우 Chl-*a*와 복합 영향인자들의 regression이 신뢰성을 높일 수 있으며 Chl-*a*가 다양한 수질 인자의 복합적인 영향에 의해 변화^{33,34)} 되기 때문일 것으로 판단된다. 조류 성장에 영향을 주는 강수량, 일조시간, 유량 등 수질 인자 외적인 영향에 대한 데이터는 사용하지 않고 수질 인자만을 사용하여 분석하였기 때문인 것으로 판단된다. 추후 더 많은 수질 인자의 수집 및 수질 외적인 인자에 대한 수질자료와의 통합적인 분석을 진행하면 예측의 신뢰성(R²)을 높일 수 있을 것으로 판단된다.³⁵⁾

4. 결론

본 연구는 국내 농업용수로 이용되는 서해 중부, 남부권역

15개 대규모 담수호를 대상으로 수질평가를 수행하기 위하여 다양한 수질 인자를 수집하여 SPSS ver. 22를 활용해 기본통계분석, 요인분석, 주성분분석 등 다변량 통계분석을 진행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 서해 중부권역과 서해 남부권역 담수호 대부분 농업용수 수질기준을 초과하는 것으로 분석되며, 서해 중부권역에 위치한 대규모 담수호가 BOD, COD, TOC, T-N, T-P 모두 서해 남부권역 대규모 담수호 대비 높은 농도를 나타내 유기오염물질과 영양염류의 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다. 서해 중부권역 대규모 담수호는 미처리 하수의 유입, 축산계, 토지계 비점오염원의 지속적 유입과 내부 퇴적토의 영양염류 용출로 조류가 과다 발생하는 반면, 남부권역 대규모 담수호는 YS, GeH를 제외하면 조류 과다 발생이 제한적인 것으로 분석되었으며 이러한 결과는 서해 남부권역 유역 대비 도시화, 개발활동 등의 토지이용 고도화가 진행된 서해 중부권역 유역의 불투수면의 증가로 인한 비점오염원 유출 증가가 주요 요인으로 판단된다.

2) NY, SG, YA, HN, YS, GN는 $TSI_{ko}(T-P) > TSI_{ko}(Chl-a)$ 로 산정되어 총인 이외에도 투명도, 체류시간 등의 다른 요인이 조류 성장을 제한 할 가능성이 있다. 또한, DH, BN, BS, SM, YA, GoH, GN는 $TSI_{ko}(COD) > TSI_{ko}(Chl-a)$ 로 유기물의 근원이 주로 외부기원 유기물이며 처리되지 않은 하수와 산림이나 농경지의 부식질이 많이 유입되었을 것으로 사료된다. GW, GG, AS, GeH는 $TSI_{ko}(Chl-a) > TSI_{ko}(T-P) > TSI_{ko}(COD)$ 의 경우이며 부유성 조류가 우점하여 수면에 밀접하게 서식하며 표층에 조류가 발생하는 특성을 나타내며 조류의 내부생산이 활발하여 수체의 영양상태가 부영양으로 분류되는 것으로 판단된다.

3) Pearson 상관계수의 차이는 있지만 6개 담수호 모두 BOD, COD가 가장 상관계수가 높아 유기물질의 우선적인 관리가 필요하다고 판단된다. 이러한 유기물과 조류의 높은 상관성은 다른 연구에서도 동일하게 보고되고 있으며, 유역에서 유입되는 외부기원 유기물 특성을 고려한 BOD, COD, 내부생성 유기물인 식물 플랑크톤 현존량의 높은 상관성을 의미한다. 그러나 Pearson 상관계수 결과를 종합적으로 분석하였을 때 일부 수질 인자를 제외한 수질 인자들의 상관계수 값의 유의한 차이가 확인되지 않았다. 부영양화는 다양한 수질 인자의 복합적인 작용에 의해 발생하며, 수체 지점 별 특성이 매우 다른 대규모 담수호의 조류 발생 예측을 위해서는 다양한 수질 인자와 환경인자 사이의 시공간에 따른 복합적인 상호작용이 고려되어야 한다고 판단된다.

4) 요인분석 결과 추출된 요인은 평균 70% 이상의 기여율을 나타냈으며 다양한 요인들이 복합적으로 추출되어 요인들 간의 상호작용이 매우 복잡해 명확한 요인 도출이 어려워 기여율이 가장 높은 제1 요인을 통해 유형화를 진행하였다. TSI_{ko} 분석 결과와 주성분 분석 결과 서해 중부권역의 7개 담수호는

Hypertrophic 등급으로 분류되었으며, 주요 오염원인은 유기물과 조류인 것으로 판명된다. 서해 남부권역의 모든 담수호는 Eutrophic 등급으로 분류되어 주요 오염원인은 영양염류인 것으로 판명되어 담수호 별 오염특성에 적합한 맞춤형 수질관리가 필요함을 확인할 수 있었다.

5) PCA 분석 이후 수질 인자의 차원축소를 위해 수질 인자를 VF로 그룹화하여 변환하고 변수로 활용하여 요인분석을 진행한 결과 기존의 담수호 대상 연구 대비 설명률이 낮아 대규모 담수호의 경우 PCA 분석 결과를 통해 높은 영향을 미치는 수질 인자만을 추출하여 다중선형회귀분석 등 추가적인 분석을 진행하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국농어촌공사 농어촌연구원의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Y. S. Kwon, M. J. Bae, J. S. Kim, Y. J. Kim, B. H. Kim, Characterizing changes of water quality and relationships with environmental factors in the selected korean reservoirs, *J. Korean Environ. Eng.*, 47(3), 146-159(2014).
2. J. U. Kim, W. J. Jang, J. K. Shin, E. T. Kang, J. H. Kim, Y. E. Park, S. J. Kim, Estimating TOC concentration using an optically-active water quality factors in estuarine reservoirs, *J. Korean Soc. Water Environ.*, 37(6), 531-538(2021).
3. C. S. Oh, Y. S. Song, J. S. Yoon, J. R. Jang, A study on appropriate water quality management measures dependent on a hydrodynamic characteristics in saemangeum freshening reservoir, *J. Korean Coastal Disaster Prevention*, 8(1), 41-50 (2021).
4. Korea Rural Community Corporation, A study on water quality improvement measures considering the pollution characteristics of large scale freshwater lakes, (2021).
5. J. H. Jeon, C. G. Yoon, J. H. Ham, H. I. Kim, S. J. Hwang, Effects of physical parameters on water quality in agricultural reservoirs, *J. Korean Limn.*, 35(1), 28-35(2002).
6. S. H. Jang, C. I. Zhang, S. W. Na, K. G. Kim, J. J. An, J. H. Lee, A analysis of trophic structure in lake namyang using the ecopath modeling, *J. Korean Limn.*, 41(2), 144-154(2008).
7. K. S. Lee, K. S. Yoon, H. J. Kim, H. I. Kim, A program of water quality management for agricultural reservoirs by trophic state, *J. Korean Environ. Agriculture*, 22(2), 166-171 (2003).
8. M. J. Lee, J. Y. Seo, S. H. Baek, Water quality characteristics and spatial distribution of phytoplankton during dry and rainy seasons in bunam lake and cheonsu bay, Korea, *J. Korean Environ. Biology*, 39(2), 184-194(2021).
9. K. D. Byeon, G. Y. Kim, I. J. Lee, S. R. Lee, T. M. Hwang, J. C. Joo, Investigation and evaluation of algae removal technologies applied in domestic rivers and lakes, *J. of Korean*

- Soc. Environ. Eng., 38(7), 387-394(2016).
10. Y. Y. Kim, S. J. Lee, Evaluation of water quality for the han river tributaries using multivariate analysis, J. Korean Soc. Environ. Engineer, 33(7), 501-510(2011).
 11. H. I. Kim, H. J. Kim, Water quality management of agricultural lakes through analysis of agricultural water quality survey network data, J. Korea Committee on Irrigation and Drainage, 19(1), 19-29(2012).
 12. H. J. Seo, I. S. Kang, Y. Eun, W. S. Jeong, S. J. Kim, Evaluation of water quality characteristics using multivariate statistical analysis in the fourth reservoir, J. Environ. Analysis, Health and Toxicology, 22(3), 117-125(2019).
 13. K. S. Yoon, K. S. Lee, H. J. Kim, H. I. Kim, Classification and water quality management of agricultural reservoirs, J. Korean Soc. Agricultural Eng., 4, 66-77(2003).
 14. J. G. Kim, S. C. Oh, Characteristics of water quality and evaluation of eutrophication for reservoirs in kunsan, J. Environ. Science, 16(3), 357-367(2007).
 15. NIER, Development of a comprehensive evaluation of water environmental research (III), (2006).
 16. J. B. Park, B. S. Kal, J. G. Lee, S. H. Hong, M. J. Choi, H. S. Seo, Analysis of the trophic characteristics of the soak river watershed using the Korean trophic state index, J. Wetlands Research, 4, 330-337(2018).
 17. S. J. Jung, D. J. Lee, K. S. Hwang, K. H. Lee, K. C. Choi, S. S. Im, Y. H. Lee, J. Y. Lee, B. J. Lim, Evaluation of pollutant characteristics in Yeongsan River using multivariate analysis, J. Korean. Limn., 45(4), 368-377(2012).
 18. M. A. Kim, J. K. Lee, K. D. Zoh, Evaluation of the Geum river by multivariate analysis: principal component analysis and factor analysis, J. Korean Soc., 23(1), 161-168(2007).
 19. B. Parinet, A. Lhote, B. Legube, Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management-application to a tropical lake system, Ecol. Modell, 1(178), 295-311(2004).
 20. J. P. Kristopher, J. C. Patrick, J. B. Daniel, Computational tools for probing interactions in multiple linear regression, multilevel modeling, and latent curve analysis, J. Educational and Behavioral Statistics. 31(4), 437-448(2006).
 21. Y. J. Seo, Development status of freshwater lakes in Korea, J. Korea Water Resources, 29(5), 12-19(1996).
 22. J. H. Ham, C. G. Yoon, W. S. Koo, H. C. Kim, H. B. Shin, Analysis of field experimental data for water quality improvement of tributary stream to estuarine reservoir using constructed wetland system, J. Korean Soc. Agricultural Eng., 46(5), 141-153(2004).
 23. H. S. Lee, S. W. Chung, H. Y. Jeong, B. H. Min, Analysis the effects of curtain weir on the control of algal bloom according to installation location in daecheong reservoir, J. Korean Soc. Water Quality, 26(2), 231-242(2010).
 24. M. O. Lee, J. K. Kim, B. K. Kim, Marine environmental characteristics of cheonsu bay, Korea, J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy, 25(3), 150-169(2022).
 25. D. S. Kong, B. C. Kim, Suggestion for trophic state index of Korean lakes(upper Layler), J. Korean Soc. Water Environ., 35(4), 340-351(2019).
 26. H. S. Kim, E. M. Choi, D. W. Kim, D. S. Kong, K. M. Kim, B. C. Kim, Water quality trend analysis based on watershed characteristics in agriculture reservoirs, J. Korean Llimn., 40(2), 214-222(2007).
 27. J. H. Kim, J. C. Joo, C. M. Ahn, D. H. Hwang, Water quality assessment of 14 reservoirs in geum river basin using multivariate statistical analysis, J. Korean Soc. Environ. Eng., 43(3), 171-186(2021).
 28. J. C. Joo, S. H. Choi, N. J. Heo, Z. Liu, J. Y. Jeon, J. W. Hur, Analysis of the benthic nutrient fluxes from sediments in agricultural reservoirs used as fishing spots, J. Korean Soc. Environ. Eng., 39(11), 613-625(2017).
 29. C. S. Rim, J. K. Shin, Cluster and factor analyses using water quality data in the sapkyo reservoir watershed, J. Korea Water Resource Soc., 35(2), 149-159(2002).
 30. Z. H. Liu, J. C. Joo, E. B. Kang, J. H. Kim, S. E. Oh, S. H. Choi, Assessment of water quality and algae growth for the ganwol reservoir using multivariate statistical analysis, J. River Basin Management, 18(2), 217-230(2020).
 31. S. Y. Jung, I. K. Kim, Analysis of water quality factor and correlation between water quality and chl-*a* in middle and downstream weir section of nakdong river, J. Korean Soc. Environ. Eng., 39(2), 89-96(2017).
 32. J. S. Park, K. H. Lee, A study on the characteristics of water quality change in the Yeongsan River basin using multivariate analysis technique, J. Korea Water treatment, 30(2), 61-72(2012).
 33. J. S. Lim, Y. W. Kim, J. H. Lee, T. J. Park, I. G. Byun, Evaluation of correlation between chlorophyll-*a* and multiple parameters by multiple linear regression analysis, J. Korean Soc. Environ. Eng., 37(5), 253-261(2015).
 34. S. M. Lee, K. D. Park, I. K. Kim, Comparison of machine learning algorithms for Chl-*a* prediction in the middle of nakdong river(focusing on water quality and quantity factors), J. Korean Soc. Water and Waste Water, 34(4), 277-288(2020).
 35. S. E. Oh, H. K. Ahn, S. K. Chae, The study on the prediction of algae occurrence by the multiple regression analysis after weir construction at namhan river, J. Environ. Impact Assess, 26(6), 470-478(2017).

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors and Contribution Statement

Dong Hwi Lee

Department of Environmental Engineering, Hanbat National University, Master Candidate, ORCID[®] 0000-0001-6223-5903: Conceptualization, Data analysis, Methodology, Visualization, Validation, Writing-original draft, Writing-review and editing.

Eue Tae Kang

Korea Rural Research Institute, Senior Researcher, [ORCID[®]](#) 0000-0002-1161-6682: Funding acquisition, Supervision.

Jin Chul Joo

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Professor, [ORCID[®]](#) 0000-0001-8551-3945: Conceptualization, Data analysis, Methodology, Visualization, Validation, Writing-original draft, Writing-review and editing.

Hyeon Woo Go

Department of Environmental Engineering, Hanbat National University, Master Candidate, [ORCID[®]](#) 0000-0002-9384-1954: Methodology, Validation, Visualization.

Chae Min Ahn

Bukang Tech, Employee, [ORCID[®]](#) 0000-0003-1766-5474: Methodology, Validation, Visualization.

Yong Hyeon Bae

Human Network, Corporation Director, Visualization.

Kwang Duck Song

Gaon S&T, Corporation Director, [ORCID[®]](#) 0000-0002-6339-4487: Data analysis.