Research Paper

Spatiotemporal Distribution of Algae and Characteristics of Algal Abundance in Lake Okjung, Korea

Ye-eun Moon · Hyun-su Kim[†]

Department of Earth and Environmental Sciences, Jeonbuk National University

(Received September 5, 2019; Revised October 9, 2019; Accepted October 14, 2019)

Objectives : The objective of this study was to identify the water quality parameters and environmental factors that control the growth and distribution of phytoplankton in Lake Okjung by analyzing water quality and meteorological data using various statistical analysis methods.

Methods : Water samples collected from the lake between May and November, 2017 were analyzed for various water quality parameters following the Standard Methods for Water Quality Analysis. Identification and quantification of phytoplankton species from the lake were conducted manually under the microscope. Meteorological data of the lake watershed were also collected and analyzed in combination with water quality and phytoplankton data using various statistical analysis methods. Correlation analysis and multivariable statistical methods were applied to identify the parameters that influenced the distribution of phytoplankton in the lake.

Results and Discussion : While the concentration of particulate matter was elevated in July and August presumably due to concentrated precipitation in the summer, total phosphorus concentration appeared to be controlled by fertilizer application associated with agricultural activities in the area, which was evidenced by the higher concentrations in May and September. Comparison of total nitrogen and total phosphorus data indicated that 76 samples out of 81 showed N/P ratios higher than 17 indicating that Lake Okjung was in a phosphorus-limited condition during the study period. Calculation of Korea Trophic State Index (TSI_{ko}) showed that the lake is generally in mesotrophic or oligotrophic conditions. The phytoplankton community was dominated by chlorophyte (50%), diatoms (25%), and cyanobacteria (9.6%) in terms of the number of species, and the highest cell concentrations were observed in the area where Oknyeodong-cheon, one of the tributaries, joins the lake. Principal component analysis identified 4 components that explained 74.6% of the total variance of the data with PC1, PC2, PC3, and PC4 explaining 40.4%, 14.9%, 11.3%, and 8.0%, respectively. These components were attributed to biogeochemical change induced by growth of phytoplankton in response to meteorological fluctuation, inflow of phosphorus from regional agricultural activities and its impact on phytoplankton growth, physical change of the lake water caused by concentrated precipitation in the summer, and environmental changes causing growth of cyanobacteria in the summer.

Conclusions : Lake Okjung was in P-limited conditions and the distribution of phytoplankton appeared to be controlled by seasonal variation of meteorological conditions and input of nutrients, especially phosphorus from the 2 main tributaries, Oknyeodong-cheon and Seomjin river. Although seasonal distribution of precipitation did not cause a significant increase in phosphorus concentration in the lake, proper management of pollution sources in the watershed of the 2 tributaries seem to be important in controlling algal bloom formation as severely concentrated rainfall in the area has the potential to produce eutrophic conditions in the lake and trigger explosive growth of phytoplankton.

Key Words : Lake Okjung, Algae, Statistical Analysis, Nutrients, Seomjin River Dam

[†] Corresponding author E-mail: hyunkim@jbnu.ac.kr Tel: 063-270-3369 Fax: 063-270-3399

연구논문

옥정호 조류의 시공간적 분포와 조류발생 특성 분석

문예은 · 김현수^{*}

전북대학교 지구환경과학과

목적: 옥정호 내 조류와 이에 영향을 주는 수질 및 기상인자들의 시공간적 분포변화를 파악한 후, 통계적 분석을 이용하여 각 인자들 간의 관계를 종합적으로 비교하여 조류의 성장에 영향을 미치는 요인을 파악하고자 하였다.

방법: 2017년 5월부터 11월까지 현장 조사를 통해 분석에 필요한 시료를 직접 채수하였으며, 수질오염공정시험법에 의거하여 실험실 수질 분석을 수행하여 영양염류, 유기물 및 기타 수질인자를 분석하고, 조류 동정 및 계수작업을 수행하였다. 그 외에 기상인자에 대한 조사를 수행한 후 환경변화에 따른 분포 변화를 파악하였다. 도출된 자료를 비교하고, 상관분석과 다변량 통계분석인 주성분분석 및 군집분석을 수행함으로 조류와 연관있는 인자들 간의 시공간적 분포 변화를 확인하였으며, 조류의 성장에 영향을 미치는 요인을 파악하였다.

결과 및 토의: 수질인자의 시공간적 분포 결과 입자성 물질과 연관있는 항목들의 경우 여름철 강우에 의한 결과로 7, 8월에 높은 농도로 나타났으며, 영양염류인 인의 경우 시비시기와 더불어서 농도의 변화가 나타나는 것으로 판단된다. 지점에 따른 변화는 대체로 옥녀동천 유입부인 지점 O에서 상대적으로 높은 농도로 나타났으며, 질소계 열은 호수 내부 지점으로 갈수록 농도가 증가하는 양상을 보였다. N/P ratio 계산결과 총 81개의 시료 중 77개의 시료에서 16 이상의 값을 나타내어 옥정호 전반적으로 인 제한환경임을 파악하였으며, 한국형 부영양화지수(TSIko) 분석 결과 옥정호는 시공간적으로 거의 대부분 빈영양에 가까운 중영양 또는 빈영양 기준에 속함을 확인하였다. 조류인자 분석 결과 종 조성별로 남조류(9.6%), 규조류(25%), 녹조류(50%)로 관찰되었으며, 지점 O에서 높은 현존량을 보였다. 상관분석 결과를 바탕으로 주성분분석을 실시한 결과 전체 자료분산에 대해서 총 74.6%의 설명력을 가지는 4개의 요인이 추출되었으며, 요인별 설명력은 PC1 (40.4%), PC2 (14.9%), PC3 (11.3%), PC4 (8.0%)인 것으로 나타났다. 각 요인은 기상조건의 변화로 인한 조류 성장으로 초래된 생지구화학적 변화, 유역 농업활동으로 인한 인의 유입이 조류의 성장에 미치는 영향, 집중 강우로 인한 호수 수체의 물리적 변화, 여름철 남조류 성장을 유발하는 환경 변화를 지시하는 것으로 판단된다. 군집분석결과 8개 조사지점이 세 군집으로 나뉘어졌으며, 각 군집은 호내 흐름에 따른 수질변화에 따라 분류된 것으로 판단된다. 각 유입하천의 유량을 기준으로 오염부하량을 계산한 결과 유량이 많은 지점 S에서 높은 부하량을 보였다.

결론: 옥정호는 전반적으로 인 제한환경에 포함되며, 상류 유입하천으로부터의 유기물 및 영양염류의 유입이 조류의 성장에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 특히 강우시 유역에 존재하는 비점오염원으로부터 유입되는 높은 농도의 인으로 인해 부영양화가 발생할 가능성이 있기 때문에 이에 대한 관리가 필요하다고 판단된다. 수질 농도와 조류 분포에서는 지점 O에서 높은 농도로 분석되었지만, 부하량 분포에서는 많은 유량으로 인해 지점 S에서 높게 나타난 것으로 보아 체류시간이 길어지는 시기에 두 하천이 합류되는 지점에서 조류의 과다성장이 발생할 수 있는 잠재력이 존재한다고 판단되어 호수 상류에서의 관리가 필요하다고 판단된다.

주제어: 옥정호, 조류, 통계분석, 영양염류, 섬진강댐

1. 서론

우리나라에서는 하절기 강우가 집중되는 기후 특성과 지속적으로 증가하는 물 수요에 대응하기 위해 하천에 댐을 건설하여 저수지를 조성함으로써 수자원을 저장하는 물 관리 방법이 주로 사용되어왔다. 인공적으로 조성된 저수지

는 자연적으로 형성된 호수에 비해 유역면적이 넓은 특성을 보여 유역 내 토지 이용으로 발생하는 오염물질의 영향을 받기 쉬우며, 특히 주변유역으로부터의 과도한 영양염류의 유입으로 인한 부영양화에 취약하다.¹⁾ 호수 내부로 질소나 인과 같은 영양염류가 과도하게 유입되어 발생하는 부영양화는 조류의 과다 성장으로 이어져 조류의 개체수

및 종 분포에 영향을 미치기도 한다. 이러한 현상은 수체 내 용존산소를 고갈시켜 어류 및 수생 생물의 폐사를 초래할 수 있으며, 악취 발생과 물의 색깔 변화 및 탁도 증가 등 심미적 불편감을 유발하기도 한다.²⁾ 또한, 상수처리공정의 여과처리 과정에서 멤브레인의 폐색을 일으킬 수 있으며, 사멸한 조류 세포가 생분해되는 과정에서 잔류물질로 형성되는 난분해성 유기물질은 소독 및 살균 공정에 광범위하게 적용되는 염소처리 과정의 부산물로서 트리할로메탄(THMs)과 같은 발암물질을 생성시키기도 한다.³⁻⁵⁾ 이 외에도, 일부 조류의 경우 독성물질을 분비하여 수생 생물과 가축의 폐사를 유발하기도 한다.^{3,6)}

부영양화로 인한 조류의 과도한 성장은 공공보건과 수생태계 전반에 심각한 악영향을 미칠 수 있기 때문에, 국내 호수 수질관리의 중점은 조류의 과다성장 억제와 유역으로부터 유입되는 질소와 인에 대한 관리를 통한 부영양화 제어 대책에 집중되어있다.⁷⁻¹⁰⁾ 조류의 과다성장을 제어할 수 있는 방안을 마련하기 위해서는 호수 내에서 조류 발생과 성장에 중요한 영향을 미치는 수질 및 환경 인자의 파악이 필수적이거나, 조류의 성장은 질소나 인과 같은 영양염류 농도 외에 다양한 기상 및 수환경 인자에 의해서도 영향을 받으며, 각 인자가 미치는 영향은 복잡한 비선형적 상호관련성을 보이는 경우가 대부분이다.¹¹⁾ 또한, 오염원의 분포와 부하량, 수리지질학적 조건 등은 호수마다 다른 양상을 보이기 때문에, 특정 호수에서 조류의 시공간적 발생 및 성장에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위해서 현장조사 및 기상 자료에 대해 다양한 통계적 분석방법, 특히 다변량 통계분석방법을 적용하여 각 호수별로 복잡한 조류발생 유발인자들과 조류 간의 상호작용을 파악하는 연구가 주로 수행되고 있다.¹²⁻¹⁴⁾

섬진강 수계의 최상류에 위치한 옥정호는 전라북도 서부지역에 생활용수를 공급하는 중요한 수자원으로 인공 저수지의 특성 상 영양염류의 과다유입으로 인한 조류 발생에 취약할 수 있으며, 최근 이루어진 상수원 보호구역 재조정으로 수질오염에 대한 우려가 증가하고 있어 수질 및 환경인자와 조류의 시공간적 분포에 대한 종합적 분석을 바탕으로 호 내 조류발생에 영향을 미치는 인자를 파악하는 연구결과의 도출과 이에 근거한 효율적 조류관리 방안을 마련하는 것이 필요하다. 그러나, 섬진강 수계에서 수행된 대부분의 연구는 섬진강 중, 하류 하천과 영산강 수계의 호수에 관련된 연구에 집중되어 왔으며, 옥정호를 대상으로 수행된 연구는 주로 주변 오염원 관리, 강우시 상류 비점오염물질 유출 특성 등에 집중되었고, 동식물성 플랑크톤에 대한 조사연구 또한 생물상 조사의 일환으로 이루어졌거나 실제 시료채취가 아닌 측정망 자료를 바탕으로 이루어져 옥정호 내 조류 발생에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위한 연구결과가 매우 부족한 상황이다.¹⁵⁻²⁰⁾ 또한, 현재 옥정

호에서의 이루어지고 있는 정기적 조류조사는 조류정보제에 따라 1개소(호수 외부의 철보 취수구)에서 유해 남조류 개체수를 파악하는 데 그치고 있어 호 내 식물성 플랑크톤의 시공간적 분포변화와 이를 유발하는 인자를 파악하기에는 한계가 있다.

본 연구는 옥정호 내 조류의 시공간적 분포와 이에 영향을 미치는 물리적 및 화학적 환경조건을 종합적으로 분석하기 위해 수행되었다. 이를 위해, 호 내 주요지점에서 수질인자와 조류 분포의 시공간적 변화에 대한 현장조사를 수행하고, 기상 및 환경조건에 대한 자료조사를 수행하였다. 수집된 자료에 대한 통계적 분석방법의 적용을 통해 조류발생과 환경조건의 상호관련성을 파악하여 조류의 성장에 영향을 미치는 인자를 알아내고자 하였으며, 이를 통해 조류의 과다성장을 예방 및 제어함으로 수질 문제 해결에 대한 학문적 연구결과를 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 조사 지역

연구지역인 옥정호는 전라북도 임실군 운암면에 위치하고 있으며, 호남지역, 특히 동진강 유역의 곡창지대에 부족한 물의 수요를 보완하기 위하여 1928년 섬진강 상류에 구운암댐을 건설하여 운암저수지를 조성한 것이 그 기원이 되었다. 이 후 증가하는 물 수요를 충족시키기 위하여 운암댐의 하류지역인 전북 임실군 강진면 용수리와 정읍시 산내면 중성리를 연결하는 섬진강댐을 건설하여 옥정호가 조성되었다. 섬진강댐은 우리나라 최초의 다목적 댐으로서 댐의 건설을 통해 전라북도 김제시와 정읍시 및 주변 지역에 각종 용수를 공급하고 있으며, 호수 내부의 취수구를 통해 동진강으로 유역을 변경한 후, 낙차를 이용한 수력발전소인 철보발전소의 운영이 이루어지고 있다.

높이 64 m, 길이 344.2 m 규모의 섬진강 댐은 1965년 12월 완공되었으며, 이로 인해 저수지 만수 면적 26.5 km², 저수용량 4.6 × 10⁸ m³의 옥정호가 조성되었다. 섬진강의 최상단 본류구간에 위치하고 있는 옥정호의 유역 면적은 763 km²이며, 이는 전체 섬진강 유역 면적의 약 15.6%에 해당한다. 옥정호 유역은 전라북도 정읍시, 진안군, 임실군 및 순창군의 4개 시·군과 16개 면에 걸쳐 위치하고 있으며, 대부분 산지와 농업지역으로 구성되어 있다. 옥정호 인근의 유입 지천으로는 진안군 백운면 화암리에 위치한 팔공산에서 발원된 섬진강 본류에 옥녀동천을 포함한 여러 크고 작은 지천들이 합류되며, 섬진강 댐 인근에서 추령천이 합류된다.

2.2. 현장조사 및 수질분석 방법

옥정호 내에서 수질인자 및 조류 분류군의 시공간적 변

Fig. 1. Areal map of Lake Okjung and locations of the sampling sites.

화에 대한 호수의 흐름과 수심 및 유입 하천의 영향을 파악하기 위해 총 8개의 조사지점을 선정하여 2017년 5월부터 11월까지 기계적 문제로 선박의 사용이 제한된 6월을 제외하고 월 1회 현장조사를 수행하였다(Fig. 1). 조사 지점은 주요 지천 유입부와 호수 내부 수체의 흐름에 따른 변화를 파악하기 위해서 호 내로 유입되는 섬진강 본류(지점 S), 옥녀동천(지점 O), 추령천(지점 C) 등 총 3개 하천의 도입부와, 옥녀동천과 섬진강 본류의 합류점(지점 1), 추령천과 옥정호의 합류점(지점 4), 댐 인근(지점 5)과, 호 내 2개의 지점(지점 2, 3)을 선정하였다. 수심에 따른 변화를 파악하기 위하여 수심이 가장 깊은 지점 5(Fig. 2(d))에서는 표층(수심 1 m), 심층(호수 바닥으로부터 1 m 상부), 중층(최고 심도의 1/2 지점)으로 나누어 시료를 채취하였으며, 수심이 얕은 상류 유입하천 도입부(지점 S, O, 1)를 제외한 모든 지점에서 호수 기저의 특성을 파악하기 위하여 표층과 심층에서 시료를 채취하였다.

옥정호 유역의 기상 자료와 유입 하천의 수문 자료는 문헌 조사를 통해 획득하였으며, 그 외 수질 인자와 조류 분석을 실시하였다. 기상 자료는 옥정호 유역 내에 위치하고 있는 임실기상관측소의 기상청 관측자료 중 강수량, 기온, 일조량 자료를 사용하였으며, 수문 자료는 국가 수자원관리 종합 정보시스템(WAMIS)의 실시간 수문자료를 이용하였다.^{21,22)}

수질 조사 항목은 수온(Temp), 투명도, 수소이온농도(pH), 용존산소(DO), 전기전도도(EC), 산화환원전위(ORP), 생화학적 산소요구량(BOD), 화학적 산소요구량(COD), 부유물질(SS), 총 인(T-P), 총 질소(T-N), 암모니아성 질소(NH₃-N), 질산성 질소(NO₃-N), 아질산성 질소(NO₂-N), 그리고 음이온인 불소이온(F⁻), 염소이온(Cl⁻), 황산염 이온(SO₄²⁻)과 염록소

-a (Chl-*a*)를 측정하였으며, 조류 분류군에 대한 정성 및 정량적 분석을 수행하였다. 총 유기탄소(TOC)는 전라북도 보건환경연구원에 분석을 의뢰하였으며, 호수 수온은 HOBO Water Temperature Pro v2 (Onset Computer Co., U.S.A.)를 사용하여 수심에 따른 변화를 측정하였고, 투명도는 세치 디스크(Secchi disk)를 사용하여 현장에서 측정하였다. 이 외의 현장 측정 및 실험실 분석 항목을 위한 물 시료 채취는 2.2리터 반돈 채수기(van Dorn sampler, Wildlife Supply Co., U.S.A.)를 사용하여 수행되었으며, DO, pH, EC, ORP는 시료채취 즉시 현장에서 Portable Multimeter (HQ40D, Hach Co., USA)를 사용하여 측정하였다. 실험실 분석을 위해 채취된 시료는 햇빛을 차단한 냉장상태로 운반한 후 분석항목에 따른 전처리를 수행하였으며, 각 시료는 실험을 실시하기 전까지 4℃ 이하로 냉장 보관하였다. 모든 수질 항목은 수질오염공정시험방법에 따라 분석하였으며, COD는 과망간산칼륨 적정법으로 측정하였다.²³⁾ T-P, T-N, NH₃-N, Chl-*a*농도는 UV/Vis Spectrophotometer (Optizen 2120UV plus)를 사용하여 흡광광도법으로 측정하였으며, Ion Chromatography (Dionex ICS-90)를 사용하여 음이온에 대한 분석을 수행하였다.

수질분석 결과를 이용하여 옥정호의 부영양화 정도를 파악하기 위해 환경부와 국립환경과학원에서 COD, Chl-*a*, T-P를 조합하여 개발한 한국형 부영양화지수(TSI_{ko})를 계산하였다.²⁴⁾

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

$$TSI_{ko} (Chl-a) = 12.2 + 38.6 \log (Chl-a \text{ mg/m}^3)$$

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

$$\text{종합 } TSI_{ko} = 0.5 TSI_{ko} (COD) + 0.25 TSI_{ko} (Chl-a) + 0.25 TSI_{ko} (T-P)$$

조류에 대한 분석은 채취된 시료를 Lugol 용액으로 고정하고 침강 농축시킨 후 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학현미경(Nikon TS-100)하에서 동정 및 계수하였다. 특정 조류종의 우점 정도를 파악하기 위하여 Naughton's dominance index를 이용하여 우점도 지수(Dominance Index, DI)를 계산하였으며, 출현하는 조류 종의 풍부성, 다양성을 평가하기 위해 다양성지수(Diversity index, H')를 계산하였다.^{25,26)}

$$DI = \frac{N_1 + N_2}{N}$$

$$H' = - \sum_{i=1}^S (N_i/N) \times \ln(N_i/N)$$

(N_1 = 우점종의 개체수, N_2 = 아우점종의 개체수,

N = 총 개체수, N_i = i 종의 개체수, S = 총 종수)

2.3. 통계분석

수질에 영향을 미치는 각 인자들 간의 상호관련성을 파악하고자 상관성 분석을 수행하였으며, 다양한 환경인자들을 통합하여 관계를 해석함으로 조류 성장을 포함한 수질 변화를 일으키는 요인을 파악하기 위하여 다변량 통계분석을 수행하였다. 통계분석에 사용한 수질항목은 수온, 투명도, pH, DO, EC, ORP, BOD, COD, TOC, SS, T-P, T-N, $\text{NO}_3\text{-N}$, F^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Chl- a 및 조류 분류군별 현존량(총조류, 남조류, 녹조류, 규조류)이며, 분석항목 중 $\text{NH}_3\text{-N}$ 의 경우 검출한계 이하로 측정되어 분석에서 제외하였다. 이 외 기상인자인 일조량과 강수량을 사용하였다. 상관분석과 주성분분석, 군집분석을 통계분석 프로그램인 SPSS Statistics Version 12.0 (SPSS Inc., U.S.A.)을 사용하여 수행하였다.

상관분석(Correlation analysis)은 상관계수 값 (r)을 이용하여 두 변수 사이의 상관관계를 나타내는 분석이며, 본 연구에서는 -1과 1사이의 상관계수를 사용하여 나타내는 Pearson 상관분석을 사용하였다. 상관분석에는 앞서 나온 모든 인자를 사용하였다.

그 외에 다변량 통계분석인 주성분분석(Principal component analysis)과 군집분석을 수행하였다. 주성분분석은 변수들 간의 상관성을 바탕으로 관련있는 변수들을 공통된 새로운 요인으로 묶음으로 데이터를 축소시키는 요인분석(Factor analysis) 방법 중 하나이며, 가장 많이 사용되는 방법이다. 분석에 사용될 요인의 수는 최소 고유값(Minimum eigenvalue) 방법을 사용하여 1이상의 고유값(Eigenvalue)을 갖는 요인을 사용하였으며, 요인 회전방법 중 하나인 베리맥스(varimax) 방식이 사용되었다. 주성분분석은 상관분석을 통해 얻어진 상관성을 바탕으로 상관성이 적은 인자들은 제외하고 분석하였으며, 분석에는 강수량, 일조량, 수온, pH, DO, 투명도, BOD, COD, TOC, T-P, T-N, Chl- a 및 조류 분류군별 현존량(전체조류, 남조류, 녹조류, 규조류)을 사용하였다. 군집분석

(Cluster analysis)은 변수들 간의 유사성을 파악하여 가까운 개체들끼리 군집을 구성하는 분석방법이며, 적절한 군집계수를 결정하기 위해 Dendrogram을 이용하는 시각적 방법이 가장 많이 사용된다. 본 연구에서는 Z점수로 표준화된 값을 사용하여 계층적 군집분석을 수행하였으며, 유사성 거리의 계산법으로 유클리디안(Euclidean) 제곱거리 방법을 사용하고, 군집 추출 방식은 Ward의 방법을 이용하였다.²⁷⁾ 분석에는 조류와 수질인자간의 관계를 파악하기 위하여 상관분석과 동일하게 모든 인자를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기상 및 수리 환경 조사

조사기간 중 옥정호 유역의 평균 기온과 강수량은 7월에 각각 25.9℃와 283.5 mm로 가장 높았고, 11월에 가장 낮은 5.1℃와 14.2 mm로 파악되었으며, 기온과 강수량이 가장 높았던 7월에는 장마전선의 영향으로 일조시간은 가장 적은 것으로 나타났다(Table 1, Fig. 2). 조사 초반인 2017년 5월부터 7월 초까지 지속된 강수량 저하에 따른 호소 내로의 유입량 감소와 5, 6월 농업용수 공급을 위한 방류량 증가로 인해 6월에 댐 수위가 연구기간 중 최저수위 (176.2 m)를 보였다. 이 후, 방류량의 감소와 여름철 장마 및 집중호우의 영향으로 유입량이 증가하면서 9월에 수위가 회복된 후(181.5 m) 안정화되었다. 조사 지점별로는 수심이 얕은 상류지점이 유입량과 방류량 변화에 민감한 영향을 받는 것으로 나타났으며, 특히 옥녀동천 유입부인 조사지점 O에서는 5월과 7월 조사 시 수심 감소가 매우 크게 나타났다(Fig. 2(d)). 옥정호의 수심은 하천 유입부에서 섬진강댐 인근의 하류로 전이하며 점차 깊어지는 양상을 보이며 댐 앞 지점인 지점 5에서 가장 깊은 수심이 측정되었으며, 투명도 분포에서도 유사한 양상을 보였다. 투명도의 경우 호수 내부 지점 특히 지점 3에서 주로 가장 높은 값을 보였으며, 상류 유입하천인 지점 S와 O에서 가장 낮은 값을 보였다. 월별 분포로 보았을 때 호수 내부 지점에서 5월의 값이 가장 높게 측정되었으며, 7월의 값이 가장 낮게 측정된 것으로 보아 호수로 유입되는 상류 유입하천 주변 유역으로부터 강우의 영향을 받아 입자성 물질이 유입되어 나타난 결과로 판단된다. 더불어 상류 유입하천에 위치한 지점의 경우 수심이 얕기 때문에 강우나 바람의 영향으로 수체 내에서 심층까지 혼합이 이루어짐으로 인해 하부 퇴적물의 재 부유가 일어나 나타난 결과로 판단된다.²⁸⁾ 각 조사 지점에서 수심과 투명도를 비교한 결과, 조사기간 전체 자료에 대한 비교 결과 양의 상관성이 있는 것으로 나타났으며, 강우에 의한 혼탁현상의 영향을 줄이기 위해 7, 8월의 데이터를 배제하고 비교한 결과, 두 인자간의 상관성이 증가함을 보였다($R^2 = 0.53$) (Fig. 2(f)).

Fig. 2. Spatiotemporal distribution of environmental parameters in Lake Okjung. (a) water and air temperature, (b) precipitation and irradiation hours, (c) water level, inflow and outflow, (d) water depth with sites, (e) Secchi depth with sites, and (f) water depth vs. Secchi depth.

3.2. 수질 분포 조사

조사 시점에 따른 평균 표층수온 분포는 12.6~29.8℃로 월평균기온과 유사한 패턴을 보였으며(**Fig. 3(a)**), 표층과 심층과의 수온 차이는 7월에 최대치를 보인 후 점차 감소하였고, 11월에는 수심이 깊은 댐 인근을 제외한 대부분의 지점에서 수심에 따른 수온 차이가 5℃ 미만으로 줄어들면서 수온약층이 점차 줄어들며 성층이 완화되는 현상이 관찰되었다. DO 분포는 표층에서 8.35~9.78 mg/L, 심층에서 4.33~7.14 mg/L의 범위를 보였으며(**Fig. 3(b)**), 시간이 지남에 따라 표층과 심층의 차이가 약간 증가하는 경향을 보였으며, 표층과 심층의 농도 차이는 수심에 따라 증가하는 양상을 보였다(**Fig. 4(b)**). EC는 표층에서 146.4~291.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 심층에서 135.5~167.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 나타나 심층은 시공간적으로 비교적 일정한 분포를 보였으나, 표층의 경우 7, 8월에 섬진강 본류(지점 S) 및 옥녀동천(지점 O) 유입부 및 호 내 인근지점에서 증가하는 양상을 나타내었다. ORP는 표층에서 120.8~345.7 mV, 심층에서 186.5~393.9 mV의 범위를 보였으며, 전체적인 표층의 증감패턴이 EC와 유사한 양상을 보였으며, 이는 강우의 영향을 받아 주변 유역으로부터

높은 농도의 영양염 및 유기물이 유입되어 나타난 결과로 보인다.²⁹⁾ SS는 표층에서 9.6~18.6 mg/L, 심층에서 5.9~12.8 mg/L의 범위를 보였으며, 강우량과 유입량의 증가가 일어나는 시기에 유입 하천 지점들에서 비교적 높은 값을 보였지만 호수 내부 지점에서는 점차 줄어드는 경향을 보였다(**Fig. 4(c)**). Chl-*a*는 표층에서 3.4~12.7 mg/m^3 , 심층에서 2.3~5.8 mg/m^3 로 나타나 유입하천, 특히 지점 O에서 높게 나타났으며, 이를 제외한 지점에서 호소의 수질 환경 기준으로 2등급 이내의 양호한 수질로 나타났다. Chl-*a* 농도는 8월에서 9월로 전이하며 표층에서의 농도가 급격히 증가하였는데, 장마 이후 줄어든 강수량과 유입량의 감소로 인한 체류시간 증가와 일조량 증가 등이 복합적으로 작용하여 조류의 성장이 증가한 것으로 판단되며, 유사한 증가양상이 국내 여러 저수지에 대한 연구결과에서 보고된 바 있다.³⁰⁾ 수체 내의 유기물질을 나타내는 인자인 COD는 총인, Chl-*a*과 유사하게 상류의 유입하천, 특히 지점 O에서 높은 농도를 보이며 유입되었다가 하류 지점으로 갈수록 점차 농도가 감소하는 양상을 보였으며, TOC 농도변화는 COD와 유사한 것으로 파악되었다(**Fig. 4(e)**).

Table 1. Mean, maximum and minimum values of water quality and algal parameters measured in this study.

Parameter	unit	May			July			August		
		min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean
Water temp.	°C	7.3	22.6	16.2	8.6	30.7	22.4	6.6	28.4	21.7
pH		6.22	8.54	7.36	6.17	8.74	7.37	6.79	9.31	8.10
DO	mg/L	5.01	11.31	8.79	2.82	11.76	7.52	1.53	9.99	7.05
EC	μS/cm	126.6	201.6	147.3	130.5	263.0	184.0	133.1	309.0	197.3
ORP	mV	83.3	254.1	150.9	232.2	316.0	285.6	258.1	368.3	303.5
SD	m	0.40	3.30	2.24	0.63	1.16	0.92	1.19	2.39	1.81
SS	mg/L	0.0	0.0	0.0	2.0	22.7	10.0	5.0	38.5	16.0
TOC	mg/L	1.8	3.5	2.3	2.2	4.0	2.9	2.1	3.3	2.9
BOD ₅	mg/L	0.30	8.10	2.04	0.60	2.80	1.55	0.31	2.38	1.19
COD	mg/L	1.40	7.00	2.72	2.00	5.50	3.30	1.80	4.45	3.35
T-P	mg/L	0.005	0.104	0.024	0.005	0.063	0.015	0.005	0.023	0.010
T-N	mg/L	0.720	1.776	1.425	0.928	2.352	1.679	0.816	2.160	1.444
NO ₃ ⁻ N	mg/L	0.041	1.470	1.089	0.560	2.239	1.377	0.532	1.629	1.168
Chl- <i>a</i>	mg/m ³	1.10	27.80	5.88	1.70	17.50	5.28	0.40	12.10	3.52
F ⁻	mg/L	0.06	0.12	0.09	0.06	0.32	0.18	0.06	0.56	0.35
Cl ⁻	mg/L	12.84	24.81	16.77	10.02	20.09	14.59	10.98	14.74	13.25
SO ₄ ²⁻	mg/L	9.43	14.75	11.27	8.38	14.55	11.31	9.84	12.24	11.14
Irradiation hour	hr	258.6	258.6	258.6	98.1	98.1	98.1	174.5	174.5	174.5
Precipitation	mm	43.1	43.1	43.1	283.5	283.5	283.5	226.0	226.0	226.0
Cyanobacteria	Cells/mL	533.3	3133.3	1785.7	933.3	5933.3	1988.9	333.3	2133.3	1112.8
Diatoms	Cells/mL	1000.0	4066.7	2581.0	933.3	4533.3	2494.4	733.3	5066.7	2189.7
Chlorophyta	Cells/mL	0.0	5933.3	1742.9	133.3	3800.0	755.6	200.0	3600.0	1497.4
Total algae	Cells/mL	3333.3	13733.3	6395.2	2733.3	14000.0	5677.8	2200.0	10466.7	5702.6

Table 1. Mean, maximum and minimum values of water quality and algal parameters measured in this study. (cont.)

Parameter	unit	September			October			November		
		min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean
Water temp.	°C	7.9	24.3	20.0	7.3	19.6	16.3	6.1	14.8	11.9
pH		6.74	8.80	7.57	6.85	8.87	7.61	6.64	7.96	7.39
DO	mg/L	1.41	9.35	6.87	1.77	11.27	7.31	1.49	10.82	7.79
EC	μS/cm	125.6	306.0	180.6	125.7	182.2	144.1	144.1	528.0	236.6
ORP	mV	238.3	366.3	313.6	-71.1	306.0	236.5	294.7	405.6	366.4
SD	m	1.00	2.65	2.08	0.97	2.75	2.03	0.50	2.50	1.79
SS	mg/L	2.0	19.5	8.9	1.5	25.0	7.7	5.5	17.0	9.5
TOC	mg/L	1.9	3.2	2.4	1.9	3.0	2.5	2.2	3.5	2.6
BOD ₅	mg/L	0.92	5.25	2.19	0.32	3.97	1.97	0.91	4.94	2.09
COD	mg/L	2.10	6.70	3.57	2.40	4.75	3.38	2.30	4.60	2.90
T-P	mg/L	0.005	0.094	0.025	0.007	0.222	0.037	0.005	0.016	0.005
T-N	mg/L	1.152	2.160	1.686	0.912	2.160	1.601	0.880	2.400	1.549
NO ₃ ⁻ N	mg/L	0.525	1.669	1.147	0.415	1.680	1.043	0.168	1.394	0.835
Chl- <i>a</i>	mg/m ³	0.90	27.40	6.95	1.43	19.57	9.10	2.17	22.37	9.52
F ⁻	mg/L	0.08	0.41	0.24	0.07	0.18	0.12	0.07	0.17	0.12
Cl ⁻	mg/L	9.95	14.96	11.80	10.47	15.97	12.18	10.21	16.70	11.94
SO ₄ ²⁻	mg/L	9.08	12.78	10.12	4.90	12.26	9.16	7.26	13.86	10.05
Irradiation hour	hr	187.4	187.4	187.4	158.9	158.9	158.9	150.1	150.1	150.1
Precipitation	mm	115.5	115.5	115.5	57.7	57.7	57.7	14.2	14.2	14.2
Cyanobacteria	Cells/mL	333.3	1533.3	819.0	133.3	1733.3	752.4	533.3	2266.7	1223.8
Diatoms	Cells/mL	800.0	7533.3	3361.9	866.7	4333.3	2709.5	1400.0	4133.3	2909.5
Chlorophyta	Cells/mL	66.7	3533.3	1171.4	200.0	2866.7	1471.4	66.7	3533.3	1481.0
Total algae	Cells/mL	2600.0	13333.3	6366.7	2466.7	8866.7	5781.0	2733.3	9533.3	6414.3

Fig. 3. Temporal variation of water quality parameters in Lake Okjung. The error bars are maximum and minimum values measured at each sampling time in this study. (a) water temperature, (b) pH, DO, (c) SS, (d) ORP, EC (e) COD, TOC, (f) Chl-*a*, (g) T-P, and (h) T-N, NO₃-N.

총 인은 표층에서 0.005~0.03 mg/L, 심층에서 0.005~0.06 mg/L으로 나타났으며, 5월과 9월의 표층 평균값이 다른 조사시기의 결과에 비해 상대적으로 높은 값을 나타내는 것을 보아, 봄철의 영농활동 중 발생하는 비료 살포와 8월 말~9월 초 추가적 비료 살포 시기의 영향으로 호내에 영양 염류가 유입되어 증가한 것으로 판단된다.³¹⁾ 지점별 총 인 농도의 증감양상은 특히 표층 시료에서 Chl-*a*와 매우 유사한 것으로 나타났으며(Fig. 4(f), (g)), 특히 지점 O에서 공통적으로 가장 높은 농도를 나타내는 것으로 보아 유량이

적은 유입하천인 옥녀동천에서 인 유입이 조류의 성장에 영향을 미칠 수 있음을 지시한다. 총 질소 농도는 표층에서 1.28~1.59 mg/L, 심층에서 1.38~1.90 mg/L로 나타났으며, 하류지점으로 갈수록 농도가 점차 감소하는 양상을 보인 총 인과 달리 섬진강 본류와 옥녀동천 유입부에 비해 호내 지점들에서의 농도가 더 높은 특징을 나타내었으며(Fig. 4(g), (h)), 추령천 유입부에서의 농도가 가장 높은 것으로 파악되었다. 8월을 제외한 모든 시기에서 표층보다 심층에서 높은 농도를 보였으며 8월에 심층에서 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 4. Spatial variation of water quality parameters in Lake Okjung. The error bars are maximum and minimum values measured at each sampling site in this study. (a) water temperature, (b) pH, DO, (c) SS, (d) ORP, EC, (e) COD, TOC, (f) Chl-*a*, (g) T-P, and (h) T-N, NO₃-N.

질산성 질소 또한 총 질소의 분포와 전체적으로 유사한 양상을 보이는 것으로 측정되었으나 총 질소와는 달리 8월 이후 심층에서의 농도가 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 인과 질소의 농도가 표층보다 심층에서 높게 측정되고, 수심이 깊어지는 호수 내부 지점에서 증가하는 양상은 호내로 유입된 영양염이 흐름에 따라서 심층에 축적되어 나타난 결과로 판단되어지며, 이 외에 퇴적물에 축적된 영양염이 심층수로 용출되어 유입될 가능성도 있어 이에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.³²⁾

Redfield는 해수와 해양조류를 이용하여 C, N, P 성분비를 조사한 결과, 수질과 조류구성비 모두 평균 106:16:1 (질량의 경우 42:7:1)의 비율로 존재한다고 제시한 바 있다.³³⁾ 이후 조류의 성장에 요구되는 질소와 인의 비율을 파악하기 위해 수행된 다양한 연구 결과 N/P ratio가 8~15 미만인 경우 질소가 조류 성장의 제한요소로 작용하고, 17~29 이상인 경우 인이 조류 성장의 제한요소로 작용하는 것으로 보고된 바 있다.^{12,34,35)} 국내 호소 생활환경기준은 N/P ratio가 7 미만인 경우 질소 제한, 16을 초과하는 경우 인 제한환경

Fig. 5. N/P ratios of water samples measured in this study.

으로 정의하고 있으며, 이를 본 연구에서 분석된 시료에 적용한 결과 총 81개의 시료 중 4개의 시료(지점 S의 5월 표

층 시료, 지점 O의 5, 9월 표층 시료, 지점 5의 10월 심층 시료)만이 질소제한 또는 인과 질소 동시제한 환경을 지시하고, 나머지 77개의 시료는 모두 16이상의 값을 나타내어 옥정호는 전반적으로 인 제한환경인 것으로 나타났다(Fig. 5). 옥정호의 월별 한국형 부영양화지수(TSI_{ko})의 평균값은 10월에 41.6로 가장 높은 값을 보였으며, 중영양호의 기준에 포함되는 값으로 나타났다. 조사기간 중 부영양화 지수 값은 주로 빈영양 조건에 가까운 중영양 상태를 나타내었으며, 부영양화 지수가 증가할 것으로 예상되었던 7, 8월의 경우에도 빈영양 상태와 중영양 상태의 경계조건을 보였고, 9, 10월에 비교적 높은 값을 보였다. 지점별 평균값에서는 상류 유입하천인 지점 O에서 52.7로 부영양호기준에 해당되는 가장 높은 값으로 나타났으며, 호소 내 지점으로 갈수록 값이 감소하는 경향을 보여서 가장 하류 지점인 지점 5에서 27.1의 값으로 나타나 빈영양호의 특성을 보였다.

Fig. 6. Spatiotemporal distribution of algal taxonomic groups in Lake Okjung. Relative percentages in terms of (a) the number of species and (b) cell concentration, average concentrations of taxonomic groups at each (c) sampling time and (d) location, and variations in relative abundance with (e) time and (f) location.

3.3. 조류 분포 조사

조사기간 중 옥정호에서 관찰된 조류는 남조류(Cyanobacteria) 5종(9.6%), 규조류(Diatoms) 13종(25%), 녹조류(Chlorophyta) 26종(50%), 그 외의 조류 분류군이 8종으로 총 52종이 관찰되었으며, 조류 분류군별 평균 현존량은 남조류 20.8%, 규조류 44.8%, 녹조류 22.5% 등으로, 3가지 분류군이 약 88%를 차지하는 것으로 나타났다(**Fig. 6(a), (b)**). 이들 분류군이 조사기간 전체에 걸쳐서 우점하는 것으로 나타났으며, 이 중 가장 많은 현존량으로 우점하는 것은 규조류로 관찰되었다. 우점 분류군별로 가장 많이 출현하는 종은 규조류는 *Synedra acus*, *Synedra ulna*, 남조류는 *Microcystis aeruginosa*, 녹조류는 *Chlorella vulgaris*인 것으로 관찰되었다.

호수 전체 지점에서의 월별 전체 조류 분류군 분포 결과 7, 8월에는 적은 현존량을 보였으며, 9월 다시 회복되는 양상을 보였는데(**Fig. 6(c)**), 이는 옥정호의 영양상태가 5~8월까지는 빈영양에 가까운 중영양 상태였다가 7, 8월의 강수량 증가로 인해 유입된 높은 농도의 영양염류 및 유기물에 의하여 9월의 영양상태가 증가하여 조류 성장에 좀 더 적합한 수체 환경이 조성되었기 때문일 것이라 생각할 수 있다. 이와 같은 호수의 영양상태에서 7, 8월의 경우 장마 및 집중강우로 인해 일조량이 줄어들어 조류의 광합성이 활발하지 못했으며, 호소 내부로의 물의 유입량이 급격히 증가함으로 흐름이 빨라져 조류의 성장시간이 충분히 주어지지 못해 이러한 결과가 나온 것으로 판단된다.³⁶⁾

남조류의 현존량은 조사기간 동안 점차 감소하는 경향을 보이며 10월에 752 cells/mL로 가장 적은 현존량을 보였다(**Fig. 6(c)**). 규조류는 평균 수온이 점차 낮아지는 9월에 3,362 cells/mL로 우점하였으며, 녹조류는 7월에 648 cells/mL까지 급감하였다가 이후 증가하여 거의 일정한 분포를 보였다. 백분율 분포에서는 남조류가 7월에 비율이 증가한 반면, 녹조류는 감소하였다(**Fig. 6(e)**). 규조류는 백분율 분포에서도 현존량 변화와 유사한 변화를 보였다. 이와 같은 조류분포 양상은 낮은 수온을 선호하는 규조류와 각각 중간 수온과 고온을 선호하는 녹조류와 남조류의 특성을 반영하고 있다고 판단된다.^{12,37)} 지점별 분포에서는 상류 유입하천인 지점 O에서 다른 지점들에 비해 현저히 높은 현존량을 보였으며, 이 후 하류인 댐 앞 지점으로 갈수록 적어지는 분포양상을 보였다(**Fig. 6(d), (f)**). 이는 지점 O에서의 영양염류, 특히 총 인의 측정 농도가 가장 높았던 사실과 호 내에서 하류로 진행하면서 감소하는 인 농도분포, 그리고 옥정호가 전체적으로 인 제한환경으로 파악된 결과와 부합하는 양상으로 판단되며, 특히 주요 유입하천 중 가장 유량이 적은 지점 O가 영양염류 농도변화에 민감하기 때문으로 생각할 수 있다.

조사기간 내 옥정호에서 발견된 조류의 우점종은 5, 7월에는 남조류인 *Microcystis aeruginosa*로 나타났으며, 이후

Table 2. Monthly variations in dominant and subdominant algal species, dominance index (DI) and diversity index (H').

Sampling month	Dominant species	Subdominant species	DI	H'
5	<i>Microcystis aeruginosa</i>	<i>Synedra acus</i>	0.43	2.42
7	<i>Microcystis aeruginosa</i>	<i>Synedra acus</i>	0.50	2.31
8	<i>Synedra acus</i>	<i>Microcystis aeruginosa</i>	0.36	2.71
9	<i>Synedra acus</i>	<i>Microcystis aeruginosa</i>	0.47	2.30
10	<i>Synedra acus</i>	<i>Microcystis aeruginosa</i>	0.33	2.66
11	<i>Synedra acus</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	0.34	2.56

8월부터 11월까지 규조류인 *Synedra acus*가 우점하였다. 5월부터 10월까지의 두 종이 우점종과 아우점종으로 번갈아가면서 나타났으며, 11월에는 녹조류인 *Chlorella vulgaris*가 아우점종으로 나타났다. 우점도 지수는 0.33~0.50 사이의 안정적인 범위로 양호한 상태로 나타났으며(**Table 2**), 남조류가 우점하는 7월에 0.5로 가장 높은 값이 나타났다.³⁸⁾ 10월에 0.33으로 우점도 지수가 가장 낮게 나타났는데, 이는 기온의 감소와 일조량의 감소로 인해 남조류와 규조류의 성장이 억제되어서 개체수가 감소함으로 나타난 결과로 판단된다. 월별 조류 분류군의 다양성지수는 2.31~2.71의 범위에서 나타나 약간 양호한 상태로 나타났다.³⁸⁾ 분석값은 7월에 감소하여 2.31의 최소값을 보이다가 8월에 급증하여 2.71의 값으로 최대값을 보였으며, 우점도지수와 반대의 경향으로 나타났다. 봄철인 5월에 남조류와 규조류의 성장이 억제된 환경에서 녹조류가 성장하며 다양한 종이 출현한 것에 기인한 것으로 보이며, 7월에 최소값을 보이는 것은 녹조류의 감소로 인해 종수가 감소함으로 나타난 결과로 보여 이후 남조류와 녹조류가 다시 성장하게 되면서 종 다양성이 증가하여 나타난 결과로 보인다.

3.4. 통계 분석

3.4.1. 상관분석

수질 환경 인자들과 조류 관련 인자들간의 변동 특성을 파악하기 위해 상관분석을 실시한 결과, 투명도의 경우 대부분의 항목과 음의 상관성을 보였다(**Table 3**). SS와 Secchi 깊이를 비교한 결과 전체 데이터에서는 상관도가 높지 않았지만, 9월의 값에서 비교적 상관도가 높게 나타났으며($R^2 = 0.43$), 이는 하절기에 발생한 집중강우로 인해 유입 하천 부근의 비점오염원으로부터 다양한 물질이 유입되어 수중의 부유물질이 증가하였기 때문인 것으로 판단된다.

Table 3. Correlation coefficients between weather, water quality and algal taxonomic group parameters. (** : $p < 0.01$, * : $p < 0.05$)

	Temp	pH	DO	Eh	SD	SS	TOC	BOD	COD	TP	TN	NO ₃ ⁻	Chl- <i>a</i>	F	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Irradiation hour	Precipi- tation	Cyano bacteria	Diatom	Chloro phyta	Total
Temp	1																					
pH	.702**	1																				
DO	.512**	.671**	1																			
Eh	-.005	-.078	.126	1																		
SD	-.301**	-.295**	-.355**	-.132	1																	
SS	.337**	.323**	.087	.421**	-.403**	1																
TOC	.589**	.658**	.389**	-.022	-.615**	.400**	1															
BOD	.007	.276*	.127	-.244*	-.378**	.018	.463**	1														
COD	.552**	.664**	.453**	-.101	-.547**	.376**	.768**	.660**	1													
TP	.066	.149	-.017	-.521**	-.152	.032	.303**	.577**	.526**	1												
TN	-.151	-.517**	-.513**	.186	.322**	.010	-.313**	-.247*	-.322**	.003	1											
NO ₃ ⁻	.126	-.321**	-.042	.189	.213	-.012	-.371**	-.686**	-.405**	-.421**	.605**	1										
Chl- <i>a</i>	.176	.467**	.568**	-.041	-.533**	.212	.505**	.652**	.755**	.380**	-.350**	-.382**	1									
F	.418**	.455**	.058	.261*	-.144	.410**	.334**	-.089	.307**	-.031	-.348**	-.120	-.070	1								
Cl ⁻	.053	.099	.066	-.597**	-.207	-.289**	.189	.353**	.079	.197	-.348**	-.306**	.075	-.064	1							
SO ₄ ²⁻	.344**	.396**	.421**	-.144	-.477**	.152	.378**	.128	.291**	-.100	-.556**	-.137	.304**	.294**	.637**	1						
Irradiation hour	.118	-.004	.132	-.514**	.484**	-.401**	-.349**	.090	-.133	.102	-.171	-.077	-.045	-.144	.299**	.087	1					
Precipi- tation	.444**	.129	-.106	.132	-.426**	.370**	.375**	-.211	.148	-.091	.064	.309**	-.252*	.500**	.080	.274*	-.514**	1				
Cyano bacteria	.186	.049	.111	-.247*	-.270*	-.068	.261*	.171	.074	.044	-.202	-.139	.034	-.061	.572**	.462**	-.002	.178	1			
Diatom	.435**	.365**	.417**	.165	-.137	.180	.240*	.120	.428**	.068	-.101	.009	.379**	.119	-.190	.058	.018	-.125	.006	1		
Chloro phyta	.279*	.595**	.587**	-.173	-.437**	.047	.531**	.592**	.638**	.272*	-.628**	-.492**	.706**	.146	.340**	.463**	.196	-.178	.258*	.314**	1	
Total	.483**	.606**	.618**	-.034	-.398*	.150	.543**	.430**	.648**	.170	-.464**	-.295**	.634**	.173	.173	.399**	.072	-.090	.398**	.734**	.797**	1

질소 계열 화합물의 경우 총 질소와 질산성 질소 모두 녹조류와 유의미한 음의 상관성을 보인 것을 제외하고는 규조류, 남조류 및 총 조류 현존량과 통계적인 유의성이 없는 것으로 나타났으며, Chl-*a*의 경우에도 유사한 양상을 보였다. 이러한 결과는 조사기간 중 옥정호가 전반적으로 인 제한환경에 해당하여 질소 화합물 농도 증가 또는 감소가 조류 현존량에 영향을 미치지 못했기 때문인 것으로 판단된다. 남조류의 경우 공기 중의 질소가스(N_2)를 고정시켜 영양물질로 사용할 수 있는 능력을 지니고 있어 질소가 적은 상황에서도 성장할 수 있는 생물학적 특성을 보이기도 하지만³⁹⁾, 인에 비해 질소 화합물의 농도가 높은 옥정호 환경에서 이러한 대사작용이 중요한 역할을 할 가능성은 낮다고 할 수 있다. 인 화합물에 비해 상대적으로 수용성이 높은 질소화합물의 경우 강우시 호수로 쉽게 유입되게 되며 본 연구에서 분석한 결과도 강수량이 증가한 7월에 조사지점의 총 질소 농도가 증가함을 나타내고 있으나(Fig. 3), 강우현상이 집중되는 기간에는 조류 성장에 필요한 일조량 등이 절대적으로 부족하고 체류시간이 감소하여 조류성장을 촉진시키지 못하였을 가능성도 있다. 총 인의 경우에는 조류의 현존량을 지시하는 인자들 중 Chl-*a*와 0.380 ($p < 0.01$)의 값으로 나타나 유의한 상관성을 보이기는 하지만, 각 조류분류군 및 총 조류 현존량과는 유의미한 상관성을 나타내지 못하였다. 이렇듯 전체적으로 영양염류가 조류 분포와 통계적으로 유의성이 없이 나타난 이유는 전체적으로 옥정호의 영양상태가 빈영양 또는 빈영양에 가까운 중영양 상태를 유지하였기 때문에 호 내 영양염류 농도의 변화보다는 기상인자와 같은 환경인자의 영향이 조류분포에 더 중요한 영향을 미쳤을 가능성이 있음을 지시하는 것으로 판단된다. 총 인 농도변화는 강수량과의 통계적으로 유의성이 없는 것으로 나타나, 호수 내부의 인 농도 변화를 초래한 기작이 집중 강우에 의한 유입보다는 유역, 특히 섬진강 및 옥녀동천 상류 유역의 농업활동에 의한 것이었을 가능성을 지시하고 있다.³¹⁾

유기물 항목인 COD, TOC, BOD_5 의 경우 Chl-*a*, 총 조류 현존량과 유의미한 또는 강한 양의 상관성을 보였으며, 조류 분류군 중 녹조류와 공통적으로 유의미한 상관성을 가지는 것으로 파악되었다(Table 3). 그 외 인자들과의 상관성 분석 결과, 질소 화합물과는 음의 상관관계를, 총 인과는 양의 상관관계를 가지는 것으로 파악되었으며, 강수량과의 상관성이 매우 약한 것으로 나타났다. 이러한 상관성을 종합하여 볼 때, 옥정호 내 조류 현존량의 증가는 유역, 특히 섬진강 본류와 옥녀동천 유역 상류의 농업활동, 특히 시비활동과 연계된 인과 유기물 발생과 연관성이 있는 것으로 판단된다. 유기물의 유입은 도시지역 오염원을 통해 유입될 수 있으나, 유기물질 농도를 지시하는 인자들이 Cl^- 및 SO_4^{2-} 와 통계적으로 유의성이 없다는 사실이 농업활동

과의 연계성을 뒷받침하는 것으로 판단된다. 분류군별로 살펴보면, 남조류는 Cl^- , SO_4^{2-} 와 양의 상관성을 보였다. 호수에서 Cl^- 과 SO_4^{2-} 는 바다로부터 유입되는 에어로졸과 도로의 제설제 성분 유입, 오폐수 성분 유입 등의 외부 유입원으로부터의 영향을 받는 것으로 알려져있다.^{12,40)}

Chl-*a*의 경우 pH 및 DO와 유의한 양의 상관성을 보였으며, 투명도와는 유의한 음의 상관성을 보였다. Chl-*a*는 광합성을 수행하는 모든 조류세포에 존재하기 때문에, 조류 현존량을 지시하는 간접적 인자로 광범위하게 사용된다. 조류 증식으로 인한 광합성의 증가는 수체의 pH와 DO의 농도에 영향을 미쳐 상승시킨다는 다양한 연구결과가 발표된 바 있으며, 부영양화로 인하여 조류의 과도한 성장이 발생하는 경우 물색깔의 변화와 투명도의 저하를 초래하기도 한다.^{36,41)} 또한 조류의 과다 성장을 통해 표층을 제외한 수체 내에서 광합성에 의한 용존산소 증가보다 사멸하는 조류의 생분해 과정에서 소모되는 산소의 양이 더 커지게 되어 용존산소 고갈이 초래될 수 있지만, 본 조사 기간에 옥정호 수체의 영양상태가 빈영양 또는 중영양 상태였고, 조류의 현존량 또한 대부분의 조사 시료에서 약 6,000 cells/mL 이하로 나타났으며, 이는 최근 연구지역 인근인 용담호에서 조사된 결과에 비해서도 낮은 것으로 파악되어¹²⁾, 조류 사멸에 따른 용존산소 소모의 영향은 미미했기 때문인 것으로 판단된다. 특히, 월별 시료에 대한 Chl-*a*와 DO, pH 사이의 상관성 분석 결과 조류 현존량의 급격한 증가가 관찰되었던 9월의 분석자료에서 가장 높은 상관도를 보였다.

3.4.2. 주성분 분석

상관분석을 바탕으로 조류관련 인자와 통계적 유의성이 없는 인자를 제외하고 주성분 분석을 수행하였으며, Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) test와 Bartlett's test를 실행하여 분석의 타당성을 검증하였다. KMO test는 결과값이 1에 근접할수록 분석의 타당성이 높고, 0.5 이하일 경우 분석이 적당하지 않다고 판단되며, Bartlett's test에서는 유의확률이 0에 가까울수록 유의성이 높다고 판단된다.^{42,43)} KMO test 실행 결과 0.701로 분석되었으며, Bartlett's test 결과 유의확률이 0.001 이하로 나타나($p < 0.05$) 두 조건 모두 만족하여 분석이 가능하다고 설명된다. 주성분분석 결과 4개의 요인이 추출되었으며, 전체 자료 분산에 대한 기여율은 요인 1이 40.4%, 요인 2가 14.9%, 요인 3이 11.3%, 요인 4가 8.0%로 총 74.6%의 설명력을 가지는 것으로 나타났다(Table 4, Fig. 7).

요인 1은 pH, 수온, DO, 규조류 및 전체 조류 현존량과 강한 양의 상관성을 보였으며, Chl-*a*, COD, TOC, 녹조류 분류군과 유의한 양의 상관성, 총 질소와 유의한 음의 상관성을 나타내었다. 이는 수온이 높은 시기에 조류의 성장이 증가하여 조류의 광합성이 활발해지며, 수체의 pH가 증가하고, DO가 증가하는 현상을 의미한다고 판단된다.^{36,41)} 하

Table 4. Loadings of principal components rotated by varimax method.

Parameter	PC1	PC2	PC3	PC4
pH	0.795	0.191	0.147	0.225
Temp	0.772	-0.053	0.437	0.011
DO	0.762	0.055	-0.104	0.37
Diatoms	0.759	0.121	-0.105	-0.172
Total	0.729	0.34	-0.055	0.4
BOD	0.042	0.886	-0.061	0.229
T-P	-0.02	0.791	0.003	-0.157
Chl- <i>a</i>	0.437	0.725	-0.065	0.22
COD	0.572	0.71	0.277	0.086
Precipitation	0.024	-0.212	0.877	0.046
Irradiation hours	0.071	-0.029	-0.792	0.11
SD	-0.184	-0.397	-0.6	-0.247
TOC	0.468	0.462	0.557	0.262
T-N	-0.335	-0.093	0.144	-0.731
Cyanobacteria	-0.048	0.003	0.196	0.684
Chlorophyta	0.491	0.512	-0.157	0.574
Eigenvalue	6.463	2.377	1.815	1.278
Percentage variance explained	40.392	14.858	11.341	7.989
Cumulative percentage variance explained	40.392	55.25	66.59	74.579

지만 총 인과의 상관성은 미미한 것으로 나타났으며, 총 질소와는 유의한 음의 상관성을 보이는 것으로 보아 조사기간 중 전반적으로 수질 상태가 양호했던 옥정호에서 조류 성장을 유발하는 요소는 영양염류의 농도변화가 아닌 수온과 같은 기상 및 환경인자라는 사실을 나타내는 것으로 판단된다. 따라서, 요인 1은 기상 및 환경조건의 변화로 인해 전체 조류와 규조류, 녹조류의 현존량이 변하면서 수체의 조건이 변화하는 생지구화학적 변화로 판단된다.

요인 2는 BODs, 총 인, Chl-*a*, COD와 강한 양의 상관성을 보였으며, 전체 조류 현존량, TOC, 녹조류와 유의한 양의 상관성, 투명도와 유의한 음의 상관성을 나타내었다. 이는 상기한 상관성 분석 결과에서와 마찬가지로 유역의 농업활동, 특히 시비활동과 연계된 유기물질 및 인의 유입이 증가함에 따라 조류의 성장이 유발(Chl-*a* 증가)되는 기작을 의미하는 것으로 판단된다. 이는 시비시기(3~5월)와 추가적 비료 살포시기(8월 말~9월 초)의 영향을 받아 농경지로부터 인 성분을 포함한 비료의 유출이 발생하여 호 내 인 농도가 봄철과 가을철에 증가한 것과 더불어 상대적으로 중간 온도에서 우점하는 경향이 있는 녹조류가 5월과 9월에 증가하여 전체 조류의 현존량에도 영향을 미치는 것을 지시하는 것으로 보인다(Fig. 2(g), Fig. 6(c)).³¹⁾ 더불어 요인 2가 총 질소와는 상관성이 미미한 것으로 보아 호수환경이

Fig. 7. Principal component (PC) loading plots. (a) PC1 vs PC2 and (b) PC1 vs PC3.

전반적으로 인 제한조건에 해당되기 때문에 조류의 성장이 총 질소보다 총 인의 영향을 많이 받는다고 판단된다.

요인 3은 강수량과 강한 양의 상관성을 보였으며, 일조시간과 강한 음의 상관성, 투명도와 유의한 음의 상관성, TOC, 수온과 유의한 상관성을 나타내었다. 이는 기상인자들과 관련있는 항목들이며, 여름철 집중강우 현상으로 인해 주변 유역으로부터 유기물을 포함한 물질들이 유입되면서 발생하는 투명도의 감소와 같은 물리적 변화를 의미하는 것으로 판단된다. 모든 조류 분류군들과 통계적인 유의성이 보이지 않은 것은 강우현상과 동반되어 나타나는 호수 내의 체류시간 감소로 인해 조류의 성장에 필요한 시간이 충분히 주어지지 않기 때문으로 판단된다.

요인 4는 총 질소와 강한 음의 상관성을 보였으며, 남조류, 녹조류, 전체 조류 현존량, DO와 유의한 양의 상관성을 나타내었다. 주성분 요인에 대한 총 질소와 조류군 사이의 상반된 상관성은 상기한 상관성 분석 결과와 유사한 양상을 보이는 것이며, 남조류와의 강한 통계적 상관성이 요인 4에서만 발견된 것으로 보아 호수 환경변화와 이에 따른 남조류 분류군의 변화를 나타내는 것으로 생각할 수 있으나, 전체적으로 인 제한환경인 옥정호 환경에서 요인 4와 강한 음의 상관성을 보이는 총질소의 영향을 파악하는 것은 어려움이 있다. 조사기간내의 옥정호의 영양상태는

Fig. 8. Dendrogram from hierarchical cluster analysis (HCA).

전반적으로 양호한 것으로 나타났으며, 조류의 농도 또한 높지 않았으므로 남조류 변화를 유발하는 인자를 파악하기 위해서는 지속적인 모니터링을 통해 남조류의 변성환경을 파악하는 추가적인 데이터의 축적이 필요하다고 판단된다.

3.4.3 군집분석

수질항목과 조류 자료를 바탕으로 각 지점에서의 표층, 심층 자료의 평균 데이터를 사용하여 군집분석을 수행한 결과 본 연구에서 조사된 지점들은 3개의 군집으로 나뉘었다(Fig.8). 군집 1로 분류된 지점 S(섬진강 본류)와 지점 O(옥녀동천 합류천)이 유사성을 보였으며, 이는 상류 유입하천으로서 얕은 수심과 주변 유역으로부터 유입되는 오염물질 및 기상조건에 따른 유량의 변화에 의해 영향을 많이 받는 지역으로 판단된다. 유입 지류 합류지점이지만 지점 S, O와 상이한 수질 및 조류분포 특성을 보인 지점 C(추령

Fig. 9. Algal cell concentrations in each cluster from HCA with changes in water temperatures of (a) cluster 1, (b) cluster 2, and (c) cluster 3, and N/P ratios of (d) cluster 1, (e) cluster 2, and (f) cluster 3.

Table 5. Discharges and pollution loadings of inflow streams.

Site	Discharge (m ³ /sec)	BOD (kg/day)	COD (kg/day)	TOC (kg/day)	SS (kg/day)	T-N (kg/day)	T-P (kg/day)
S	1.28	345.69	421.77	300.48	1470.22	103.65	4.28
O	0.06	21.25	25.40	15.53	109.32	6.49	0.28
C	0.58	74.03	163.19	127.44	603.14	88.63	0.61

천 합류부)는 지점 1, 2와 함께 군집 2로 분류되었다. 군집 2에 속하는 지점들은 지류로부터 이격된 지점들이지만 지류 유입부와와의 거리가 멀지 않아서 지류 수질특성의 영향을 받는 지역으로 판단된다. 마지막으로 군집 3으로 분류된 지점 3, 4, 5의 경우 호수 내부의 지점으로 수심이 깊어지는 지점이며, 흐름에 따른 영향보다는 심층에서 퇴적물로부터의 용출과 생지구화학적 조건의 변화 등 수체 내부에서 발생하는 작용들에 의해 영향을 받는 지역으로 판단된다. 군집 2와 3은 비교적 가까운 거리를 보이며 유사성이 있는 것으로 보였지만, 군집 1과는 거리가 멀게 측정되며, 거의 유사성이 없는 것으로 분석되었다. 이는 지점의 위치별 특성을 보았을 때 흐름이 호수내부로 진행할수록 수체의 특성이 상류 유입하천의 특징에서 수심이 증가하고 체류시간이 증가하는 호수의 특징으로 변화되어 이와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다.

부영양 수계에서 조류의 발생과 발생하는 종의 변화에 대한 다양한 연구가 수행되었으며, 이 중 수온과 TN/TP ratio와 조류 발생 사이의 상관성에 대한 연구결과가 다수 보고되었다.⁴⁴⁾ 군집분석을 통해 분류된 각 군집에서 수온 및 TN/TP ratio와 조류 인자들 간의 상관성을 파악하기 위하여 표층 시료의 각 조류 분류군의 현존량을 수온과 N/P ratio와 비교하여 분석을 실시하였다(Fig. 9). 각 군집별 조류의 현존량과 수온의 상관관계를 분석한 결과 각각 군집 1에서 규조류, 군집 2에서 녹조류, 전체 조류, 군집 3에서 모든 분류군과 유의한 상관성을 보였다. 각 분류군별 가장 높은 현존량을 보인 구간은 규조류 24.1℃, 남조류 30.6℃, 녹조류 23℃로, 기존에 보고된 연구결과와 마찬가지로 남조류가 상대적으로 높은 온도의 환경을 선호하며, 규조류는 남조류와 반대의 성향으로 낮은 온도의 환경을 선호하고, 녹조류는 중간의 성향을 선호하는 특성을 보이고 있으며, 호내 다른 지점에 비해 군집 3에 해당되는 지점에서 수온이 조류의 성장에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다.^{12,37)} N/P ratio를 이용하여 상관관계를 분석한 결과 군집 1에서만 규조류, 녹조류, 전체 조류와 유의한 상관성을 나타내었다. 군집 1은 섬진강 유입부인 지점 S와 옥녀동천 유입부인 지점 O로 구성되어 있으며, N/P ratio가 감소하며 전체적인 조류 현존량이 증가하는 양상을 보여 두 하천의 상류 유역에서 인 관리가 필요할 것으로 판단된다. 전체 군집 분포에서 조류 분류군별 가장 높은 현존량은 규조류의

경우 N/P ratio가 군집 2의 61.4, 군집 1의 14.2인 시료에서 유사하게 높은 값을 보였으며, 남조류는 군집 3의 266.2, 녹조류는 군집 1의 12 (10.6, 11.1) 미만에서 나타났다.

각 유입하천의 유량을 기준으로 오염부하량을 계산하였으며(Table 5), 유량데이터는 전라북도 보건환경연구원의 조사 데이터를 사용하였다.²⁰⁾ 분석 결과 유량이 가장 적은 지점 O는 인 등의 농도가 가장 높은 것으로 조사되었으나, 유입하천 중 가장 적은 유량으로 인해 부하량은 낮은 것으로 파악되었으며, 유량이 가장 큰 지점 S에서의 부하량이 가장 높게 나타났다. 지점 O의 높은 조류 및 수질인자 농도와 지점 S의 높은 부하량은 군집 1의 상류 유역의 오염원 관리가 호 내 조류 발생의 관리에 중요함을 지시하는 것으로 판단된다. 부하량은 유량의 영향을 받기 때문에 건기와 강우시의 유출량을 고려해야하며, 각 지점에서의 수질농도 또한 고려해야하기 때문에 시기에 따른 환경변화를 파악하여 각각의 조건에 따른 관리방안을 파악할 필요가 있다고 판단된다.

4. 결론

- 1) 옥정호의 수질, 환경인자 및 조류 관련 인자들에 대한 분석 결과 조사기간 중 옥정호의 영양상태는 빈영양에 가까운 중영양 또는 빈영양 상태인 것으로 파악되었으며, 옥정호는 전체적으로 인 제한환경인 것으로 나타났다. 조류의 성장에 영향을 미치는 영양염류의 분포 조사 결과, 질소 농도는 하절기 농도가 상대적으로 높은 것으로 나타났으나, 인의 경우 5월과 9월에 농도가 증가하는 것으로 나타나 유역의 농업활동과 관련된 시기와의 연관성이 있을 것으로 판단된다.
- 2) 유기물 및 질소와 인 계열의 영양염류를 포함한 수질 인자들의 조사지점 별 농도분포는 대부분의 인자들이 옥정호 상류의 옥녀동천 유입지점에서 가장 높았고, 그 뒤를 이어 섬진강 유입부의 농도가 높았으나, 질소의 경우는 옥정호 최 하류인 섬진강댐 인근의 추령천 유입부에서 가장 높은 것으로 파악되어 유입지류 유역별로 다른 특성을 나타냈으며, 조류 현존량의 간접적 지시항목인 Chl-*a* 농도는 총 인 농도 분포와 유사한 특성을 나타내었다.
- 3) 옥정호에서 나타난 조류 분류군은 현존량 기준 남조류

(20.8%), 규조류(44.8%), 녹조류(22.5%) 세 분류군이 전체의 약 88%를 차지하며, 조사기간 전체에 걸쳐서 현존량으로 규조류가 우점하는 것으로 나타났으며, 남조류인 *Microcystis aeruginosa*와 규조류인 *Synedra acus*가 번갈아가며 우점하는 것으로 파악되었으며, 연중 조류 현존량은 낮은 상태로 안정적인 분포를 보였다.

- 4) 상관분석을 바탕으로 주성분분석을 실시한 결과 PC1 (40.4%), PC2 (14.9%), PC3 (11.3%), PC4 (8.0%)로 총 74.6%의 설명력을 가지는 것으로 나타났으며, 각 요인은 수온과 같은 기상조건 변화에 따른 조류 발생과 이에 수반되는 생지구화학적 변화, 유역 농업활동으로 인한 인 농도의 변화로 인한 조류의 성장, 강우현상으로 인한 부유물질 유입과 같은 수체의 물리적 변화 및 남조류 성장을 유발하는 환경변화 판단되어진다. 군집분석결과 유입지류의 특성과 호 내 물 흐름에 따라 3개의 군집으로 나뉘어졌다.
- 5) 상류 유입하천인 지점 S와 지점 O의 특성에 비추어볼 때, 각각 부하량과 조류의 현존량이 높게 나타난 것으로 보아 두 하천의 영향을 받아 체류시간이 길어지는 시기에 호수의 상부에서 조류의 성장이 급증할 것으로 예상된다. N/P ratio와의 상관성 분석에서도 이 두 지점이 속한 군집 1에서 인 농도 증가에 따른 조류 현존량 증가가 발생한 것으로 보아 군집 1에 속하는 두 하천 유역의 인 관리방안의 마련이 필요할 것으로 판단된다.
- 6) 본 연구 결과는 수질이 비교적 양호한 옥정호 환경에서 영양염류의 농도변화보다는 수온변화를 포함한 기상 및 수체 환경조건의 변화가 대부분의 조류 변화를 유발하는 주된 요소임을 시사하였다. 그러나, 한정된 조사기간 동안 남조류 농도가 낮은 상태에서 변화의 폭도 크지 않았으며, 남조류 분포와 여러 조사항목 사이의 유의한 통계적 상관관계를 나타내지 않아 본 연구결과를 바탕으로 호수 수질관리의 주요 모니터링 대상인 남조류 성장을 유발하는 인자를 정확히 파악하는 것은 어려움이 있다. 그러므로, 호수 수질 및 기상인자와 조류에 대한 지속적인 모니터링을 통해 남조류를 포함한 조류 분류군의 번성 환경을 파악할 필요가 있다고 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국수자원공사 섬진강지사의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. K. W. Thornton, B. L. Kimmel, F. E. Payne, Reservoir Limnology: Ecological Perspectives, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, pp. 1-246(1990).
2. H. K. Park, Y. C. Seo, B. H. Park, Effect of chlorination on disinfection byproducts production and release of microcystins from bloom-forming algae, J. Korean Soc. Water Environ., 22(3), 513-520(2006).
3. M. K. Kim, B. R. Moon, T. K. Kim, K. D. Zoh, A study on production & removal of microcystin, Taste & odor compounds from algal bloom in the water treatment processes, KJPH, 52(1), 33-42(2015).
4. H. J. Kum, J. S. Kim, Y. Chung, Characterization of disinfection by-products by *Chlamydomonas Pulsatilla*, J. Korean Soc. Water Qual., 21(5), 535-540(2005).
5. H. J. Son, J. M. Jung, H. S. Yeom, J. T. Choi, S. H. Jang, Formation of disinfection by-products from blue-green algae by chlorination, J. Environ. Sci., 21(8), 1015-1021(2012).
6. H. J. Son, H. S. Yeom, J. M. Jung, J. T. Choi, Decomposition of *Microcystis sp.* cell and formation of chlorination disinfection by-products, J. Korean Soc. Environ. Eng., 34(5), 351-358(2012).
7. B. J. Lim, W. H. Jheong, M. S. Byeon, S. O. Jun, Inhibitory effect of *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae) growth by plants in vitro, Korean J. Limnol., 33(2), 136-144(2000).
8. G. J. Joo, M. H. Jang, S. B. Park, J. M. Jung, J. S. Roh, K. S. Jeong, Application of an algal fence for the reduction of algal intake into the water intake facility, Korean J. Limnol., 36(4), 467-472(2003).
9. Y. J. Yun, E. J. Jang, H. S. Park, S. W. Chung, Evaluation of eutrophication and control alternatives in Sejong weir using EFDC model, J. Environ. Impact Assess., 27(6), 548-561(2018).
10. D. S. Kong, J. K. Min, M. S. Byeon, H. K. Park, S. U. Cheon, Temporal and spatial characteristics of water quality in a river-reservoir (Paldang), J. Korean Soc. Water Environ., 34(5), 470-486(2018).
11. M. S. Kim, Y. R. Chung, E. H. Suh, W. S. Song, Eutrophication of Nakdong river and statistical analysis of environmental factors, ALGAE., 17(2), 105-115(2002).
12. H. S. Kim, I. H. Jeong, Characterization of algal community of Yongdam reservoir and identification of ecological factors inducing the changes in community composition, J. Soil Groundw. Environ., 20(7), 121-134(2015).
13. S. J. Yu, E. J. Lee, M. J. Park, K. S. Kim, J. K. Im, I. G. Ryu, H. J. Choi, M. S. Byeon, H. R. Noh, Changes in the water environment based on the statistical data in the Lake Paldang, J. Korean Soc. Water Environ., 34(6), 688-702(2018).
14. Y. J. Park, H. S. Kim, Y. J. Ban, H. S. Lee, Dynamics of epilithic diatom communities and biological water quality assessment in Geum river and downstream Yongdam, J. of KSFEA., 20(3), 138-144(2017).
15. J. E. Na, M. H. Jung, I. S. Cho, J. H. Park, K. S. Hwang, H. J. Song, B. J. Lim, G. H. La, H. W. Kim, H. Y. Lee, Phytoplankton community in reservoirs of Yeongsan and Seomjin river basins, Korea, Korean J. Environ. Biol., 30(1), 39-46(2012).
16. C. H. Won, A Study on the Improvement of water quality according to the pollution management plan of Seomjin river

- water system, J. of the Korean Society for Environmental Technology, 19(6), 514-527(2018).
17. D. H. Kwak, S. J. Yoo, J. H. Kim, I. H. Lim, J. Y. Kwon, P. G. Chung, Characteristics of non-point pollutant discharge from upper watershed of Seomjin dam during rainy season, J. Korean Soc. Water Wastewater, 22(1), 39-48(2008).
18. Okjung lake environment and biota investigation, Ministry of Environment, Korea(2017).
19. H. R. Lee, A Study of the relationship between the critical influential factors about bloom in Lake Okjeong, Chosun University, Korea, pp. 1-49(2010).
20. S. A. Kim, J. H. Choi, S. D. Jeong, J. S. Yun, K. H. Kang, J. C. Kim, S. R. Park, S. M. Jin, J. J. Pak, T. S. Yoo, Survey of water quality around Ok-jung Lake, Jeollabukdo Institute of Health & Environment Research, Korea, 117-151(2017).
21. Korea Meteorological administration, <http://www.weather.go.kr/> (2019).
22. WAMIS, <http://wamis.go.kr/>(2019).
23. Water Pollution Standard Method, Ministry of Environment, Korea(2017).
24. Development of a comprehensive evaluation of water environmental research(III), National Institute of Environmental Research., 224-227(2006).
25. S. J. Mcnaughton, Relationships among functional properties of California grassland, Nature, 216, 168-169(1967).
26. C. E. Shannon, W. Weaver, The Mathematical Theory of Communication. Urbana, IL: The University of Illinois Press, 1-117(1949).
27. S. R. Ahn, S. H. Kim, S. J. Kim, A study on hydrologic clustering for standard watersheds of Korea water resources unit map using multivariate statistical analysis, J. of the KAGIS., 17(1), 91-106(2014).
28. B. W. Kong, W. J. Lee, D. G. Ra, C. J. Cheong, Analysis of temporal-spatial characteristics of water quality using water quality index in the Suncheon bay, J. of the Korean Society for Environmental Technology, 17(2), 96-104(2016).
29. V. F. Haavisto, Effects of a heavy rainfall on redox potential and acidity of a waterlogged peat, Can. J. Soil Sci., 54, 133-135(1974).
30. S. Y. Noh, Y. N. Shin, H. L. Choi, J. Y. Lee, J. A. Lee, D. H. Rhew, Characteristics of algae occurrence on environmental changes, J. Environ. Impact Assess., 24(3), 278-286(2015).
31. C. M. Song, J. S. Kim, H. Jang, Nutrient behavior in an upland field of cabbage adjacent to the river. J. Korean Soc. Agric. Eng., 52(3), 65-71(2010).
32. D. C. Cho, E. M. Lee, B. G. Park, S. H. Kwon, Correlation of releases of nutrient salts in sediment with vicinal oxic conditions, J. Environ. Sci. Int., 20(7), 845-855(2011).
33. A. C. Redfield, The biological control of chemical factors in the environment, Am. Sci., 46, 205-221(1958).
34. D. S. Kong, Statistical analysis on water quality characteristics of large lakes in Korea, J. Korean Soc. Water Environ., 35(2), 165-180(2019).
35. C. Forsberg, S. O. Ryding, Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes, Arch. Hydrobiol., 89, 189-207(1980).
36. K. A. Seo, S. J. Jung, J. H. Park, K. S. Hwang, B. J. Lim, Relationships between the characteristics of algae occurrence and environmental factors in Lake Juam, Korea, J. Korean Soc. Water Environ., 29(3), 317-328(2013).
37. T. L. Richardson, C. E. Gibson, S. I. Heaney, Temperature, growth and seasonal succession of phytoplankton in Lake Baikal, Siberia, Freshw. Biol., 44, 431-440(2000).
38. J. W. Hur, H. S. Kang, M. H. Jang, Investigation on physical habitat condition and fish fauna in Dal stream of Han river basin, J. Korean Soc. Environ. Eng., 33(8), 564-571(2011).
39. J. W. Park, Y. G. Kim, W. M. Heo, B. C. Kim, W. H. Yih, Bloom-forming cyanobacteria in Yongdam lake (1) Nutrient limitation in a laboratory strain of a nitrogen-fixing cyanobacterium, anabaena spiroides v. crassa, Journal of the Korean Society of Oceanography, 11(4), 158-164(2006).
40. E. L. Thunqvist, Increased chloride concentration in lake due to deicing salt application, Water Sci. Technol., 48(9), 51-59(2003).
41. H. J. Lee, J. K. Seo, H. K. Jeong, B. M. Tak, J. K. Lee, Phytoplankton community in Junam reservoir by pollution sources, loads and water quality, J. Environ. Sci. Int., 19(11), 1445-1456(2010).
42. P. Bernard, L. Antoinette, L. Bernard, Principal component analysis: an appropriate tool for water quality evaluation and management-application to a tropical lake system, Ecol. Model., 178(3-4), 295-311(2004).
43. 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. Water Environ., 23(1), 161-168(2007).
44. H. S. Kim, S. J. Hwang, D. S. Kong, Cyanobacterial development and succession and affecting factors in a eutrophic reservoir, Korean J. Limnol., 40(1), 121-129(2007).