Research Paper

Water Quality Assessment of 14 Reservoirs in Geum River Basin Using Multivariate Statistical Analysis

Jin Ho Kim¹ · Jin Chul Joo^{2,†} · Chae Min Ahn³ · Dae Ho Hwang⁴

¹Land & Housing Institute

²Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University

³Department of Environmental Engineering, Hanbat National University

⁴Korea Water Policy Research Institute

(Received January 18, 2021; Revised February 25, 2021; Accepted March 3, 2021)

Objectives : 14 reservoirs in the Geum river watershed were clustered and classified using the results of factor analysis based on water quality characteristics. Also, correlation analysis between pollutants (land system, living system, livestock system) and water quality characteristics was performed to elucidate the effect of pollutants on water quality.

Methods : Cluster analysis (CA), principal component analysis (PCA), and factor analysis (FA) using water quality data of 14 reservoirs in the Geum river watershed during the last 5 years (2014-2018) were performed to derive the principal components. Then, correlation analysis between principal components and pollutants was performed to verify the feasibility of clustering.

Results and Discussion : From the factor analysis (FA) using water quality data of 14 reservoirs in the Geum river watershed, three to six principal components (PCs) were extracted and extracted PCs explained approximately 74% of overall variations in water quality. As a result of clustering reservoirs based on the extracted PCs, the reservoirs clustered by nitrogen and seasonal PCs were Ganwol, Geumgang, and Sapgyo, the reservoirs clustered by organic pollution and internal production PCs were Tapjung, Dae, Seokmun, and Yongdam, the reservoirs clustered by organic pollution, internal production, and phosphorus are Bunam, Yedang, and Cheongcheon, and finally the remaining Boryeong, Daecheong, Chopyeong, and Songak were clustered as other factors. From the correlation analysis between principal components and pollutants, significant correlation between the land, living, and livestock pollutants and water quality characteristics was found in Ganwol, Topjeong, Daeho, Bunam, and Daecheong. These reservoirs are considered to require continuous and careful management of specific (land, living, livestock) pollutants. In terms of water quality and pollutant management, the Ganwol, Sapgyo, and Seokmunho are considered to implement intensive measures to improve water quality and to reduce the input of various pollutants.

Conclusions : Although the water quality of the reservoir is a result of complex interactions such as influent water factors, morphological and hydrological factors, internal production factors, and various pollutants, optimized watershed and water quality management measures can be implemented through multivariate statistical analysis.

Keywords : Geum River Watershed, Multivariate Statistical Analysis, Water Quality Management, Pollutants, Principal Component Analysis (PCA)

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

연구논문

다변량 통계분석기법을 활용한 금강수계 14개 호소의 수질평가

김진호¹ · 주진철^{2,*} · 안채민³ · 황대호⁴

¹토지주택연구원

²한밭대학교 건설환경공학과

³한밭대학교 환경공학과

⁴한국물관리정책연구소

목적: 금강수계 내 14개 호소의 수질 특성별 군집화를 위해 요인분석의 결과(factor 1 기반)를 활용해 호소를 군집 및 분류하고 오염원(토지계, 생활계, 축산계)과 수질인자 간 상관분석(correlation analysis)을 통해 오염원이 수질에 미치는 영향을 조사하였다.

방법: 금강수계 내 14개 호소의 최근 5년(2014~2018)의 다양한 수질항목 자료를 활용해 군집분석(cluster analysis, CA), 주성분분석(principle component analysis, PCA), 요인분석(factor analysis, FA)을 활용해 수질에 영향을 미치는 주성분을 도출하고, 요인분석을 통해 나온 결과를 바탕으로 실제 오염원과의 상관성을 분석하였다.

결과 및 토의: 14개 호소의 요인분석 결과 3~6개의 요인이 추출되었으며 평균 74%의 설명력을 나타냈다. 요인 1에 추출된 수질인자를 바탕으로 호소를 분류한 결과, 질소 요인과 계질 요인으로 분류된 호소는 간월호, 금강호, 삼교호이며, 유기오염과 내부생산으로 분류된 호소는 탐정지, 대호, 석문호, 용담호이며, 유기오염과 내부생산 그리고 인 요인으로 분류된 호소는 부남호, 예당지, 청천지이다. 나머지 보령호, 대청호, 초평지, 송악지는 기타 호소로 분류되었다. 요인분석을 통해 나온 결과와 실제 오염원과의 상관성을 분석한 결과, 토지계, 생활계, 축산계 오염원과 높은 상관성을 나타낸 호소는 간월호, 탐정지, 대호, 부남호, 대청호이며 이들 호소는 특정(토지계, 생활계, 축산계) 오염원의 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다. 수질과 오염원 관리 측면에서 나쁨으로 평가된 간월호, 삼교호, 석문호는 수질개선을 위한 대책과 오염원 유입 방지 대책이 필요할 것으로 판단된다.

결론: 호소의 수질은 유입수, 형태학적 요소, 수문학적 요소, 내부생산요소, 오염원 등의 복합적인 작용으로 인한 결과로서 매우 복잡한 인과관계를 형성하고 있으나 다변량 통계분석 등의 통계학적인 기법을 통해 호소 특성에 맞는 맞춤형 유역 및 수질관리 방안의 도출이 가능하다.

주제어: 금강수계, 다변량 통계분석, 수질관리, 오염원, 주성분분석

1. 서론

한반도의 강수는 근대적 기상관측이 시작된 1905년 이래 강수량 변동폭이 점진적으로 증가하는 추세를 나타내고 있으며, 연간 강수량이 홍수기(6~9월)에 약 68%로 편중되며, 국토의 65%가 산악지형으로 하천의 경사가 급해 유출이 빠르고 갈수기에는 유출량이 적은 특성을 가지고 있다.¹⁾ 이러한 강수와 유역 특성을 반영해 수자원의 저장고로써 인간 활동에 중요한 역할을 하는 호소가 전국에 17,289개가 있는 것으로 보고되고 있으나²⁾, 각종 개발과 수자원의 무분별한 이용으로 인한 호소유역의 오염원 증가 및 지구온난화에 따른 기후변화로 인해 호소의 수질오염도는 점진적으로 증가 추세이며 이로 인한 수자원의 이용가치 저하 및 수생태계의 교란

및 건강성 악화 등의 다양한 문제점이 발생하고 있다.^{3,4)} 또한 이수 및 치수를 위한 용도로 만들어진 대부분의 인공 호소들은 하도를 차단하거나 변형해 조성되었으며, 호소의 표면적 대비 유역면적이 커서 부영양화가 쉽게 진행되며, 10 m 이하의 비교적 얇은 평균수심을 가지므로 체적 대비 표면적이 넓어 부영양화 현상이 가속화될 수 있는 가능성이 높아 여름철 부영양화로 인한 조류의 대발생이 빈번하게 일어나고 있다.⁵⁻⁹⁾

일반적으로 주요 오염원은 유역의 토지에서 강우 시 유출되는 비점오염원이 49% 이상으로 가장 높으며, 생활오염원이 27%, 축산오염원이 23%를 차지하며 비점오염원인 토지유래 오염원의 비율이 비교적 높다.^{10,11)} 우리나라의 호소는 강우에 의존해 수량을 확보하기 때문에 장마철 일부 기간을 제외하고는 호소유역의 상류지역에서 유입되는 물을 담수하

므로 호소 수질은 상류지역의 토지이용에 따라 많은 영향을 받으며 또한 시비가 이루어지는 농경지와 소와 돼지, 닭 등을 사육하는 축산지역이 많은 유역의 경우 질소(N)와 인(P), 유기물질(organic matter) 등이 토양에 축적되어 강우를 통해 수계로 유입되므로 유역 내 오염원을 고려한 수질평가 및 수질 관리가 이뤄져야 한다.

호소의 수질은 지역적인 기후 및 유역 내 오염원 현황, 내부 생산량을 비롯해 유입 수량이나 수체 흐름, 방류량 등과 관련된 수리·수문학적 특성뿐만 아니라 호소 규모 등과 같은 형태 학적인 특성 등 다양하고 수많은 요인들의 복합적인 상호작용으로 결정되므로 이들 요인들이 수질에 미치는 영향에 대한 연구가 국내외 다수의 하천과 호소를 대상으로 수행되었다.¹²⁻²³⁾ 유역 내 오염원이 수질에 미치는 영향을 파악한 국내 선행 연구는 다수 보고되었으며¹²⁻¹⁴⁾, 호소의 수문, 지형 및 형상 등 형태학적 요인이 호소 수질에 미치는 영향에 대한 연구도 보고되고 있다.^{15,16)} 국외에서 Simeonov 등은 2003년에 그리스의 Aliakmon, Axios, Loudias, Strymon, Gallikos 강들에 대해 유기물, 영양염류, 중금속 등을 포함한 수질항목에 대해 다변량 통계분석인 군집분석(cluster analysis, CA), 주성분분석(principle component analysis, PCA), 요인분석(factor analysis, FA), 다중회귀분석(multiple regression analysis)을 실시해 수질을 평가하였으며¹¹⁾, Palma 등은 포르투갈의 Alqueva 저수지에 대해 주성분분석/요인분석(PCA/FA), 군집분석(CA)을 통해 수질을 평가하였다.¹⁷⁾ 또한 Pejman 등도 이란의 Haraz 강에 대해 주성분분석/요인분석(PCA/FA), 군집분석(CA)을 통해 계절별로 수질을 평가하였다.¹⁸⁾ 오염원과 수질의 상관관계에 대해서는 Boyacioglu가 Buyuk Menderes 강에 대해 수질 인자와 유역 오염원의 요인분석(FA)을 실시하여 유량이 많으면 토지계 오염원인 대지(residential)의 영향을 많이 받고, 유량이 적으면 답(paddy)과 전(upland)의 영향을 많이 받는다고 주장하였다.¹⁹⁾

국내에서 Yoon 등은 농어촌공사가 관리하는 전국 48개의 저수지를 대상으로 수질과 토지이용 간의 상관분석을 실시하였으며²⁰⁾, Cho 등은 전국 73개 저수지를 대상으로 수문지형과 유역 토지피복이 수질에 미치는 영향을 분석한 결과, 우리나라의 저수지 부영양화는 유역의 토지이용, 수문, 지형적 특성에 영향을 받는다고 보고하였다.²¹⁾ 또한 Liu 등은 간월호의 다양한 공간에서 4년간 축적된 13개의 수질항목 자료를 군집 분석, 주성분분석, 요인분석, 다중회귀분석을 실시해 간월호의 지점별 수질 문제점을 도출해 맞춤형 수질관리기법을 제시하였다.²²⁾ 이렇듯 호소 수질에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 토지이용에 따른 오염원, 기상과 강수에 따른 수리·수문학적, 지형 및 형태학적 요인 등의 다양한 인자를 고려한 호소의 종합적인 수질평가 및 수질관리가 이뤄져야 한다.

따라서 본 연구는 금강 대권역 물환경관리계획과 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 등 관계 법령 및 지침에 따라

호소환경 조사 대상인 금강수계 내 14개 호소를 대상으로 종합적인 수질평가를 수행하기 위해 최근 5년(2014~2018)의 다양한 수질항목 자료를 활용해 동일 호소의 공간적 수질변화를 평가하고, 주성분/요인분석을 활용해 호소 수질의 대표적 인자를 도출하고, 호소의 수질 특성별 군집화를 위해 도출된 요인분석의 결과(factor 1 기반)를 활용해 호소를 군집 및 분류하고자 한다. 또한 오염원(토지계, 생활계, 축산계)과 수질인자 간 상관분석(correlation analysis)을 통해 오염원이 수질에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 이러한 결과들을 바탕으로 금강수계 내 14개 호소의 수질을 종합적으로 평가하고 다변량 통계분석 기법과 그룹화 기법을 활용한 호소 수질 특성별 맞춤형 수질관리의 타당성을 평가하고자 한다.

2. 연구자료 및 방법

2.1. 연구범위 및 대상지역 현황

금강은 전라북도 장수군에서 발원하여 대청댐을 거쳐 대전, 공주, 부여 등의 중소도시를 통과하여, 군산과 장항 사이에 위치한 하구를 통해 서해안으로 흐르는 유로 연장 395.9 km, 유역면적 9,810 km²에 이르는 우리나라 제3의 하천이다.²³⁾ 금강유역에는 총 14개의 호소가 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 등 관계 법령 및 지침에 따라 호소환경 조사 대상으로서 수질을 비롯한 수생태계와 호소일반현황, 오염원 등 호소 및 주변 환경에 대한 전반적인 조사가 실시되고 있다. 14개의 호소는 대청호, 초평지, 탐정지, 삼교호, 예당지, 간월호, 부남호, 석문호, 보령호, 금강호, 송악지, 대호, 청천지, 용담호이며(Fig. 1), 본 연구에서는 이들 14개의 호소를 대상으로 오염원은 2012년부터 2016년까지, 수질항목은 2014년부터 2018년까지 각 5년간 월별 데이터를 활용해 통계분석을 실시해 호소의 수질을 종합적으로 평가하였다.

Fig. 1. Location of 14 selected reservoirs in Geum river basin.

Table 1. 14 Reservoirs in Geum river basin and analyzed variables.

Reservoir (sites)		Variable	
		Water quality	Pollutant
DaeChung (6)	DC	Temp. (°C), pH, EC (μmhos/cm), DO (mg/L), BOD (mg/L), COD (mg/L), SS (mg/L), T-N (mg/L), NO ₃ -N (mg/L), NH ₄ -N (mg/L), T-P (mg/L), PO ₄ -P (mg/L), Coil (/100 mL), FColi (/100 mL), Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	<ul style="list-style-type: none"> Land (km²) - Residential, Paddy, Upland, Forest, Other Human Living - Population (person), Untreatment (%) Livestock (The number of animal) - Cattle, Dairy cattle, Pork, Chicken
TapJung (2)	TJ		
SapGyo (3)	SG		
YeDang (3)	YeD		
GanWol (3)	GW		
BuNam (3)	BN		
BoRyung (3)	BR		
GeumGang (3)	GG		
DeaHo (3)	DH		
YongDam (4)	YoD		
ChoPyung (1)	CP	Temp. (°C), pH, DO (mg/L), EC (μmhos/cm), BOD (mg/L), COD (mg/L), T-N (mg/L), T-P (mg/L), SS (mg/L), Chl- <i>a</i> (mg/m ³)	
SeokMun (1)	SM		
SongAk (1)	SA		
ChungChun (1)	CC		

2.2. 자료수집

본 연구에서는 금강수계 내 14개 호소의 수질오염특성을 조사하기 위해 오염원 및 유역현황자료는 ‘전국오염원조사자료’(12~16)’를 활용하였으며, 토지계, 생활계, 축산계를 연단위로 통계분석에 활용하였다. 토지계 오염원은 5개 지목으로 분류하여 해당 유역의 면적을 활용해 면적의 증감이 수질에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 또한 생활계 오염원은 유역면적에 해당하는 인구를 산정하고 하수미처리인구/하수처리인구를 산출해 하수미처리의 영향을 살펴보고자 하였다. 마지막으로 축산계는 한우와 젓소, 닭, 돼지의 사육두수를 통계분석에 활용해 수질에 대한 사육두수의 영향을 파악하고자 하였다.

수질자료는 환경부에서 운영하고 있는 ‘물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)’에서 제공하는 수질 측정망 자료를 활용하였으며, 2014년 1월부터 2018년 12월까지 5년간 60개월의 수질데이터를 수집하였다. 수질측정망이 구축된 10개 호소는 Temp., pH, EC, DO, BOD, COD, SS, T-N, NO₃-N, NH₄-N, T-P, PO₄-P, Coil, FColi, Chl-*a*의 15개 항목을 월별로 수집하였으며, 수질측정망이 없는 4개 호소(송악지, 석문호, 청천지, 초평지)는 Temp., pH, DO, EC, BOD, COD, T-N, T-P, SS, Chl-*a*의 10개 항목을 2014년 1월부터 2017년 12월까지 분기별 1회 측정하였으며, 2018년 1월부터 12월까지는 월 1회 측정하였다. 이들 분석항목과 연구에 활용한 각 호소의 측정지점 및 주요 오염원을 Table 1에 제시하였다.

2.3. 자료의 전처리 및 다변량 통계분석

자료의 통계분석을 위한 통계처리 프로그램은 SPSS (ver. 22)를 활용해 기본통계분석 및 상관분석, 요인분석 등 다변량 분석을 수행하였다. 기본통계분석으로 평균값, 중간값, 표준

편차, 사분위수 등 빈도분석과 산점도, 히스토그램, 박스도표 등의 그래프 분석으로 평가하였다. 표본개수가 30개 미만인 호소(SM, SA, CC, CP)의 수질데이터를 대상으로 표준화를 위해 로그변환 전후로 Shapiro-wilk 기준으로 정규성 검증을 실시하였으며, 유의확률(p) > 유의수준($\alpha = 0.05$)이면 정규성 분포로 판정하였다. 유의확률이 0.05 미만으로 조사된 수질 항목에 대해 로그변환을 실시하여 대부분 호소의 수질항목이 정규성분포를 나타내도록 변환하였다(Table 2 참조).

상관분석(correlation analysis)은 변수 간에 가지고 있는 선형 관계를 수치적으로 나타내기 위한 분석방법이며, 피어슨 상관계수(Pearson correlation coefficient: r)를 이용하였다. 상관계수(r)는 $-1 \leq r \leq 1$ 의 값을 가지는데, 그 값이 $-1 \leq r < 0$ 일 때는 음(-)의 상관관계를 가지고 $0 \leq r \leq 1$ 일 때는 양(+)의 상관관계를 갖는다. 또한 r 의 절대 값이 0에 가까울수록 상관성이 낮은 것으로 판단되며, 1에 가까울수록 상관성이 높게 평가된다.²⁴⁾

요인분석(FA)은 여러 변수 간의 상관행렬로부터 공통 요인을 도출하여 서로 상관이 있는 변수 간의 공통요인을 설명하고, 변수를 적은 수로 축소시켜 요인을 추출하여 전체 자료를 대변할 수 있는 동질적인 요인으로 묶어주는 방법이다.²⁵⁾ 요인을 추출하기 위한 방법으로는 주성분 분석을 활용하였다. 요인분석을 실행하기 전 자료에 대한 타당성을 알아보기 위해 표본적합도 검증(Kaiser Meyer Olkin test: KMO test)과 단위행렬 검증(Bartlett test)을 실행하였다. KMO test는 자료에 대한 변수의 값이 타당성을 나타내는 척도로 1에 가까운 값일수록 요인분석의 타당성이 높으며, 0.5 이하일 경우에는 타당성이 낮음으로 평가된다. Bartlett test는 변수 간 상관행렬이 단위행렬인지 아닌지 검증하는 것을 말한다. 변수 간의 상관성이 높을수록 유의적 관계라 하며 0에 가까운 값일수록

Table 2. Results of Shapiro-wilk test for normality.

SM		SA		CC		CP	
Variable	Significance level	Variable	Significance level	Variable	Significance level	Variable	Significance level
Temp.	0.435	Temp.	0.488	Temp.	0.516	Temp.	0.306
ln (pH)	0.041	ln (pH)	0	pH	0.353	ln (pH)	0.059
ln (DO)	0.001	DO	0.054	DO	0.764	DO	0.132
EC	0.124	EC	0.076	ln (EC)	0.153	EC	0.272
ln (BOD)	0.564	BOD	0.264	ln (BOD)	0.922	BOD	0.181
COD	0.573	ln (COD)	0.035	COD	0.062	ln (COD)	0.292
T-N	0.87	ln (T-N)	0.061	ln (T-N)	0.058	ln (T-N)	1
ln (T-P)	0.009	T-P	0.22	ln (T-P)	0.899	ln (T-P)	0.786
SS	0.856	SS	0.562	ln (SS)	0.185	SS	0.324
ln (Chl- <i>a</i>)	0.553	ln (Chl- <i>a</i>)	0.92	ln (Chl- <i>a</i>)	0.759	ln (Chl- <i>a</i>)	0.486

Table 3. Results from ANOVA test of water quality parameters from 14 reservoirs in Geum river basin.

Reservoir	GW	GG	DC	DH	BR	BN	SG	YoD	YeD	TJ
Temp.	0.993	0.964	0	0.902	0.602	1	0.506	0.776	0	0.669
pH	0.36	0.558	0	0.057	0.435	0.819	0.761	0.473	0	0.474
DO	0.001	0.713	0.001	0.731	0.703	0.5	0.923	0.962	0.867	0.551
EC	0	0.883	0	0.319	0.927	0	0.884	0.987	0.001	0.95
BOD	0.35	0.62	0	0.006	0.443	0.002	0.212	0.91	0	0.334
COD	0.033	0.727	0	0.102	0.175	0.229	0.149	0.857	0	0.359
T-N	0	0.965	0	0.078	0.868	0	0.748	0.772	0.011	0.957
T-P	0	0.94	0	0.027	0.627	0	0.04	0.969	0	0.479
NH ₄ -N	0	0.828	0	0.006	0.486	0.401	0.663	0.431	0.161	0.09
NO ₃ -N	0	0.953	0.005	0.968	0.89	0.001	0.879	0.877	0.832	0.839
PO ₄ -P	0	0.72	0.002	0.064	0.947	0.288	0.295	0.716	0.38	0.304
SS	0.667	0.716	0.101	0	0.524	0.002	0.075	0.735	0	0.136
Chl- <i>a</i>	0.023	0.766	0	0.004	0.416	0	0.101	0.901	0	0.189
FColi	0	0.776	0.01	0.764	0.178	0.409	0.854	0.837	0.329	0.874
Coli	0	0.975	0.345	0.22	0.002	0.414	0.685	0.795	0.668	0.63

유의성이 높다.^{22,26)} 또한 요인 패턴의 구조를 단순화시켜서 요인에 대한 해석을 보다 쉽게 하기 위해서 요인 축을 회전시키는데, 요인 축을 회전하는 방법에는 크게 직교회전(Orthogonal)과 사각회전(Oblique)이 있다.²⁷⁾ 직교회전은 회전 후 요인축이 직교하도록 하는 방법이고, 사각회전은 회전 후 요인축이 직교할 필요가 없는 회전방법이다. 본 연구에서는 직교회전방법으로 요인 적재 값이 가장 높은 변수의 수를 최소화하는 Varimax 회전방법을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰(Results and Discussion)

3.1. 호소 수질현황 및 공간적 수질 변화 평가

수질측정망이 있는 10개 호소는 유입, 호내, 유출로 선정된 3개 이상의 지점에서 이화학적 항목을 비롯한 각종 수질자료를 활용해 수질항목별 각 호소의 공간적(spatial) 수질 변화를

평가하기 위해 일원분산분석(ANOVA)을 실시하였으며, 일원분산분석(ANOVA)의 결과는 **Table 3**에 제시하였다. 간월호, 대청호, 부남호, 예당지를 제외한 6개 호소는 대부분의 수질 항목이 지점별로 다르지 않은 것으로 조사되어, 호소의 공간적 수질 변화가 통계학적으로 유의하지 않은 것으로 조사되었다($p > 0.05$). 조사 대상 호소의 지점별로 수질변화가 유의하지 않다는 가설이 기각된 4개 호소(간월호, 대청호, 부남호, 예당지)의 사후분석(Post-hoc: Scheffe) 결과, 간월호와 부남호, 예당지는 호내와 유출부의 수질은 서로 다르지 않지만 유입부의 경우 호내와 유출부와는 다른 경향을 나타내며 수질인자의 농도가 비교적 높은 것으로 조사되었다. 이는 간월호를 2014년부터 2016년까지 3년 동안의 수질항목을 대상으로 통계 분석한 연구 결과와 동일하였다.²²⁾

대청호는 사후분석(Post-hoc: Scheffe) 결과, 호내 지점인 ‘대청호-5’가 다른 지점들 대비 비교적 많은 지점들과 유사한 결과

를 나타내어 대청호 지점의 대표성을 갖는다고 판단하였다. 호소의 일부 지점에서 공간적 수질 변화가 통계학적으로 유의한 것으로 조사된 대청호의 경우, 호소의 면적이 넓고 여러 만곡부를 가진 형태학적 특성으로 인해 일부 다른 수질경향을 나타낸 것으로 판단된다. 앞선 결과를 바탕으로 본 연구에서는 호내지점을 각 호소의 대표지점으로 선정하여 통계분석을 실시하였다. 수질측정망이 없는 나머지 4개의 호소는 한 지점만 측정하였기

때문에 별도의 공간적 수질변화를 평가하지 않았다.

공간적 수질 변화 평가를 바탕으로 각 호소 별 호내 대표지점의 2014년부터 2018년까지 월별 수질데이터를 박스그래프(Box-and-Whisker plot)를 활용해 Fig.2와 같이 나타내었다. Fig.2에 제시된 박스그래프는 최솟값, 1사 분위(Q1), 2사 분위(Q2), 3사 분위(Q3), 최댓값, 평균값으로 표시되었으며 최솟값과 최댓값을 넘는 이상치(outlier)를 동시에 제시하였다.

Fig. 2. Comparison of water quality parameters from 14 reservoirs in Geum river basin (2014 ~ 2018).

Fig. 2. Comparison of water quality parameters from 14 reservoirs in Geum river basin (2014 ~ 2018). (Continued)

각 수질인자는 이화학적 인자인 Temp., pH, DO, EC로 구분되며, 유기오염물인 BOD와 COD, 영양염류인 T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, T-P, $\text{PO}_4\text{-P}$, 내부생산 및 기타오염물질인 SS와 Chl-a로 구분된다.

이화학적 인자인 수온(Temp.)은 14개의 호소 모두 비슷한 온도를 나타내지만, 댐형 호소인 대청호, 보령호, 용담호는 호소 내의 담수량이 많아 열용량이 큰 물의 특성에 따라 연간 수온변화가 작은 것으로 판단된다. pH도 마찬가지로 댐형 호소인 대청호, 보령호, 용담호가 낮게 조사되었다. 용존산소(DO)는 전체적으로 유사한 농도를 나타내는 것으로 조사되었다. 마지막으로 전기전도도(EC)는 하구에 위치한 호소인 간월호, 금강호, 대호, 부남호, 삼교호, 석문호가 높게 나타난 것으로 조사되었는데, 이는 해수 유통 및 염수유입에 의한 결과로 판단된다.²⁸⁾

유기오염물인 생물학적 산소요구량(BOD)과 화학적 산소요구량(COD)의 경우 하구에 위치한 호소인 간월호, 금강호,

대호, 부남호, 삼교호, 석문호가 BOD 대비 COD의 농도가 높게 조사되었는데, 이는 하구에 위치한 호소의 특성상 난분해성 유기물의 유입 및 축적이 높은 결과로 판단된다. 또한 상류에 위치한 댐형 호소인 대청호, 보령호, 용담호는 나머지 호소 대비 낮은 유기오염물 농도를 나타내 비교적 오염도가 낮은 것으로 판단된다.

영양염류인 질소(nitrogen)는 T-N, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 모두 하구형 호소가 비교적 높은 농도를 나타냈으며, 댐형 호소와 농업용 호소(예당지, 탑정지, 송악지, 초평지, 청천지)는 하구형 호소 대비 낮은 농도로 조사되어 질소의 존재 형태에 대한 차이는 통계학적으로 유의하지 않은 것으로 조사되었다($p > 0.05$). 특히 삼교호(SG)는 총질소(T-N)의 평균 농도가 약 5 mg/L로 타 호소대비 매우 높은 농도를 나타냈으며, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 모두 타 호소대비 높은 농도로 조사되어 오염이 심각한 수준인 것으로 판단된다. 인(Phosphorus)은 유기오염물(BOD, COD)과 유사하게 댐형 호소의 농도가 낮게 나타났으

Table 4. Results of principal component analysis for 14 reservoirs in Geum river basin.

	Reservoir	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4	Factor5	Factor6	KMO-Test	
GW	Variable	T-N, NO ₃ -N, NH ₄ -N, Temp., pH	BOD, Chl- <i>a</i> , T-P, SS, COD	FColi, Coli	PO ₄ -P, DO, EC			0.597	
	Cumulative rate	23.68	47.16	61.37	72.91				
GG	Variable	T-N, NO ₃ -N, Temp., EC, PO ₄ -P	Chl- <i>a</i> , pH, BOD, COD, DO	NH ₄ -N, T-P, SS	FColi, Coli			0.705	
	Cumulative rate	30.44	53.84	66.82	75.16				
DH	Variable	Chl- <i>a</i> , BOD, COD, EC, SS	DO, PO ₄ -P, Temp., T-P	T-N, NO ₃ -N, pH, NH ₄ -N	Coli, FColi			0.517	
	Cumulative rate	21.231	41.594	58.197	71.89				
BN	Variable	T-P, T-N, BOD, COD, Chl- <i>a</i> , SS	Temp., DO, Coli, NO ₃ -N	EC, pH, PO ₄ -P	FColi, NH ₄ -N			0.587	
	Cumulative rate	22.279	35.497	48.58	61.662				
SG	Variable	NO ₃ -N, Temp., DO, T-N, SS	BOD, COD, Chl- <i>a</i> , T-P	FColi, Coli, PO ₄ -P, EC, pH	NH ₄ -N			0.512	
	Cumulative rate	23.729	44.527	64.6	77.638				
SM	Variable	BOD, Chl- <i>a</i> , COD, SS	DO, TP, Temp., T-N	pH, EC					0.621
	Cumulative rate	26.446	51.243	70.654					
DC	Variable	T-P, PO ₄ -P, SS, EC	DO, Temp., Chl- <i>a</i> , COD	BOD, NH ₄ -N	Coli, FColi	pH, T-N	NO ₃ -N	0.655	
	Cumulative rate	18.10	35.16	46.54	56.75	66.34	75.31		
BR	Variable	Coli, FColi, BOD, COD	T-P, PO ₄ -P, NH ₄ -N	NO ₃ -N, T-N, SS	Temp., DO, Chl- <i>a</i>	pH, EC			0.677
	Cumulative rate	17.795	32.932	47.643	61.748	74.064			
YoD	Variable	COD, BOD, FColi, SS, Chl- <i>a</i>	DO, Coli, TP, Temp.	PO ₄ -P, pH, EC	NO ₃ -N, T-N	NH ₄ -N			0.543
	Cumulative rate	23.479	39.865	53.219	65.354	74.407			
YeD	Variable	Chl- <i>a</i> , BOD, COD, SS, T-P	T-N, NO ₃ -N, PO ₄ -P	pH, NH ₄ -N, EC, Temp.	Coli, FColi	DO			0.738
	Cumulative rate	32.178	47.601	59.852	71.034	81.558			
TJ	Variable	Temp., BOD, COD, DO, Chl- <i>a</i> , SS, pH	NO ₃ -N, T-N, EC	FColi, Coli	PO ₄ -P, T-P, NH ₄ -N			0.593	
	Cumulative rate	25.96	42.59	57.802	71.035				
SA	Variable	BOD, SS, COD, pH	Temp., EC	Chl- <i>a</i> , DO	T-N, T-P			0.401	
	Cumulative rate	24.211	44.828	62.654	77.558				
CC	Variable	COD, BOD, Chl- <i>a</i> , SS, T-P	DO, EC, Temp., pH	T-N					0.569
	Cumulative rate	32.101	61.724	76.159					
CP	Variable	Temp., EC, pH	DO, T-N, Chl- <i>a</i>	BOD, COD	SS, T-P			0.355	
	Cumulative rate	24.109	46.937	64.266	80.777				

며, 대체로 상류에 위치한 댐형 호소의 지리적 특성에 의한 결과로 판단된다. 질소와 마찬가지로 삼교호(SG)는 총인(T-P)의 평균농도가 0.18 mg/L로 타 호소가 0.02 ~ 0.12 mg/L의 범위인 반면 약 1.5배에서 9배로 높은 농도를 나타냈으며, PO₄-P의 농도도 0.05 mg/L로 타 호소 대비 높은 농도로 조사되어 삼교호의 영양염류 오염도가 심각한 것으로 조사되었다. 유사한 결과가 다른 연구에서 보고되고 있으며, 하구형 호소는 유역의 범위가 넓어 유입 및 생성되는 오염원 부하가 증대되어 영양염류 농도가 비교적 높은 것으로 보고되고 있다.^{29,30)}

SS와 Chl-*a*의 농도 또한 영양염류의 농도가 높은 삼교호가 가장 높게 나타났으며, SS와 Chl-*a*의 농도는 유사한 경향을

나타내 두 수질인자 간의 상관성이 높을 것으로 판단된다. 실제로 유사한 연구결과가 시화호 유역하천의 수질인자간 상관분석결과³¹⁾, 농업용 저수지인 화성호의 수질인자간 상관분석결과³²⁾, 농어촌 공사에서 관리하고 있는 825개 호소의 수질인자간 상관분석 결과³³⁾에서도 보고되었다.

3.2. 주성분 분석 및 요인분석에 따른 호소의 분류 및 수질평가

금강수계 14개 호소의 2014년부터 2018년까지의 수질항목을 대상으로 한 주성분분석 및 요인분석의 결과는 **Table 4**와 같다. Bartlett test 결과 모든 호소가 유의확률이 0으로 유의성이 높은 것으로 조사되었으며, 대부분 호소의 KMO-test 결과

Table 5. Classification of the 14 reservoirs based on major factors from factor analysis.

Variable	N & Seasonal			Organic matter & Algae				Organic matter & Algae & P			Etc.			
	GanWol	GeumGang	SabGyo	TabJung	GaeHo	SeokMun	YongDam	BuNam	YeDang	ChungChun	SongAk	BoRyung	DaeChung	ChoPyung
pH	-0.432			0.558							-0.572			0.759
DO			0.772	-0.741										
Chl- <i>a</i>			-0.666	0.669	0.854	0.8	0.552	0.706	0.953	0.751				
EC		0.726			0.628								-0.577	0.824
BOD				0.745	0.838	0.857	0.838	0.726	0.915	0.853	0.919	0.691		
COD				0.741	0.747	0.736	0.873	0.712	0.9	0.906	0.684	0.701		
Temp.	-0.722	-0.87	-0.81	0.852										0.896
SS				0.656	0.558	0.647	0.725	0.435	0.883	0.712	0.739		0.619	
T-P								0.894	0.861	0.631			0.918	
PO ₄ -P		-0.556											0.91	
T-N	0.921	0.939	0.702					0.884						
NH ₄ -N	0.763													
NO ₃ -N	0.855	0.931	0.924											
FColi							0.774					0.743		
Coli												0.799		

는 0.5 이상으로 요인분석의 타당성이 높게 평가되었으나, 송악지와 초평지의 경우 0.5 이하로 타당성이 낮아 요인분석 결과의 신뢰가 낮은 것으로 판단된다. 모든 호소는 3~6개의 요인(factor)으로 추출되었으며, 추출된 요인은 평균 74%의 설명력을 나타냈으며, 이 중 요인 1의 설명력은 17.8~32.2%로 평균 24.7%의 설명력, 요인 2는 평균 19.9%의 설명력, 요인 3은 15.2%의 설명력, 요인 4는 12.6%의 설명력을 나타내었다.

요인을 설명하기 위한 설명인자로써 선행연구^{26,34)}와 호소의 특성을 고려하여 유기오염요인(BOD, COD, EC), 인 요인(T-P, PO₄-P), 질소 요인(T-N, NH₄-N, NO₃-N), 세균오염요인(Coli, FColi), 계절적요인(Temp., SS, T-P), 호소 내부 생산요인(Chl-*a*, pH, DO, SS)으로 구분해 설명하고자 하였다. 하지만, Table 4의 요인 추출결과를 보면 다양한 요인들이 복잡하게 추출되어 명확히 구분해 설명하기 어렵기 때문에 통계학적 유의성이 가장 높은 요인 1에 추출된 주요 수질인자를 바탕으로 호소를 분류하여 호소의 수질을 평가하고자 하였다. 요인분석 결과는 Table 5에 나타내었으며, 질소 요인과 계절 요인, 유기오염요인과 내부생산요인 및 인 요인, 그리고 기타 분류의 4가지 형태로 분류되었다. 질소 요인과 계절 요인으로 분류된 호소는 간월호, 금강호, 삽교호로 이들 호소는 질소 오염원 유입관리와 계절적 영향을 감소시키기 위한 수량 확보 등이 필요할 것으로 판단된다. 유기오염요인과 내부생산요인으로 분류된 호소는 탐정지, 대호, 석문호, 용담호이며, 이들 호소는 호내로 유입되는 유기물의 관리와 더불어 내부생산으로 인한 SS의 증가, 내부생산 유기물의 처리를 위한 대책이 필요할 것으로 판단된다. 유기오염요인과 내부생산요인 그리고 인 요인으로 분류된 호소는 부남호, 예당지, 청천지로 유기오염요인과 내부생산요인으로 분류된 호소의 대책과

더불어 인 오염원 유입관리가 필요할 것으로 판단된다. 나머지 기타 호소로 분류된 보령호는 유기오염과 더불어 세균 오염관리가 필요할 것으로 판단되며, 대청호의 경우 퇴적물 혹은 외부로부터 유입되는 인 오염원의 관리가 필요할 것으로 판단된다. 초평지와 송악지는 요인분석 결과가 유의하지 않아 데이터의 추가확보가 필요하며, 추후 데이터가 확보된 뒤 정확한 분석이 필요하다.

3.3. 호소의 수질인자와 오염원과의 상관성 분석

금강권역에 포함되어 있는 14개 호소는 크게 하구형 호소와 농업용 호소, 댐형 호소로 구분되지만 댐형 호소의 경우 수질이 대체로 양호하기 때문에 농업용 저수지이며 비교적 호소 유역에 분포된 오염원이 높게 조사된 예당지와 하구에 위치하며 다양한 오염원 분포를 나타낸 삽교호로 선정하였다. 아래 Fig. 3(예당지), 4(삽교호)에 축산계(돼지, 닭, 한우; number of animal), 생활계(population), 산업계(배출량, m³/d)를 각각 나타냈다. 두 호소의 유역 오염원은 비교적 다양하게 분포함을 확인할 수 있었으며, 삽교호의 경우 유역면적이 넓어 다른 유역 대비 비교적 다양하고 높은 오염원 분포를 나타낸 것으로 판단된다.^{29,30)}

주성분분석 및 요인분석을 통해 분류된 호소와 실제 오염원과의 상관성을 알아보기 위해 각 호소의 2012년부터 2016년까지 유역 오염원과 호소의 수질인자 간의 상관분석을 실시하였다. 그 결과를 Table 6~9에 나타내었다. Table 6은 질소 요인과 계절 요인으로 분류된 간월호, 금강호, 삽교호의 수질 인자와 오염원의 Pearson correlation을 나타내었다. 주성분분석과 요인분석 결과로는 질소 오염원과 계절적 영향이 큰 것으로 판단되었으나, 수질 인자와 오염원의 상관관계가 유의하지 않기 때문에 금강호와 삽교호는 토지계, 생활계,

Fig. 3. Spatial distribution of discharged pollution load in YeDang reservoir watershed.

Fig. 4. Spatial distribution of discharged pollution load in SapGyo reservoir watershed.

Table 6. Pearson correlation between water quality parameters and pollutants in reservoirs with nitrogen & seasonal effects.

GW	Land pollutant					Human living		Livestock pollutant			
	Upland	Paddy	Forest	Residential	Other	Population	Un treatment	Cattle	Dairy cattle	Pork	Chicken
pH	-0.681	-0.65	-.962**	0.643	0.367	0.297	0.113	-0.565	0.446	0.279	-0.28
DO	-0.608	-0.639	-0.091	0.639	0.825	-.926*	-.933*	-0.142	0.287	0.219	-0.833
EC	-0.701	-0.724	-0.464	0.743	0.786	-0.542	-0.7	0.252	.937*	.960**	-0.775
BOD	-0.866	-.896*	-0.577	.910*	.962**	-0.706	-0.828	0.039	0.74	0.695	-0.859
COD	-.956*	-.958*	-0.679	.956*	.936*	-0.57	-0.745	-0.368	0.804	0.675	-.977**
T-N	-.955*	-.971**	-0.669	.976**	.987**	-0.654	-0.808	-0.193	0.788	0.692	-.949*
T-P	0.433	0.492	-0.025	-0.511	-0.75	.939*	.908*	-0.404	-0.301	-0.355	0.619
PO ₄ -P	0.789	0.828	0.4	-0.841	-.962**	0.851	.926*	-0.078	-0.603	-0.569	0.863
SS	-.965**	-.959**	-0.818	.959**	0.87	-0.379	-0.59	-0.35	.894*	0.769	-.892*
Chl- <i>a</i>	-.948*	-.938*	-0.798	.926*	0.83	-0.381	-0.535	-0.659	0.527	0.327	-0.817
FColi	.891*	0.873	0.755	-0.868	-0.762	0.283	0.502	0.452	-0.876	-0.74	0.864
Coli	0.673	0.641	.967**	-0.636	-0.355	-0.327	-0.125	0.499	-0.538	-0.389	0.285
GG											
COD	0.695	0.815	0.632	-0.725	-.891*	0.836	0.827	-0.43	0.651	0.14	0.256
T-N	-0.248	-0.528	-0.564	0.51	0.581	-0.672	-0.472	-0.257	-.935*	-0.769	-0.838
NO ₃ -N	-0.399	-0.616	-0.727	0.648	0.64	-0.758	-0.44	-0.267	-.977**	-0.622	-0.844
PO ₄ -P	-0.006	-0.208	-0.444	0.293	0.201	-0.372	-0.013	-0.61	-0.764	-0.706	-.881*
SS	0.441	0.505	0.066	-0.297	-0.59	0.396	0.814	-.885*	0.035	-0.167	-0.454
SG											
Temp.	-0.822	-0.718	-0.819	0.762	0.63	.947*	-0.247	0.843	0.625	0.788	0.264
pH	0.843	.890*	0.829	-0.87	-0.851	-0.535	.882*	-0.6	-0.21	-0.583	-0.534
T-P	-0.669	-0.758	-0.659	0.722	0.723	0.255	-.936*	0.396	0.125	0.323	0.408
SS	-0.664	-0.616	-0.611	0.621	0.488	0.55	-0.574	0.291	-0.179	0.511	.890*
FColi	-0.376	-0.369	-0.33	0.357	0.405	0.368	-0.265	0.139	-0.519	0.547	.892*

축산계 오염원의 영향이 미미한 것으로 판단된다. 간월호의 경우에는 유기오염요인(BOD, COD), 영양염류 요인(T-N, PO₄-P), 내부생산요인(Chl-*a*, SS, pH), 세균오염요인(FColi, Coli)과 토지계의 상관관계수가 약 0.9 이상으로 높은 양(+)의 상관성을 나타내 토지계로 인한 수질오염의 관리가 필요할 것으로 판단된다. 하지만 전(upland)과 답(paddy)에서는 수질 인자와 음(-)의 상관관계로 오히려 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 간월호의 수질 항목의 농도가 높아 답이 오염물질을 일부 저감해 수질을 정화한 것으로 판단된다.³⁵⁾

Table 7은 유기오염과 내부생산요인으로 구분된 탐정지, 대호, 석문호, 용담호의 수질 인자와 오염원의 Pearson correlation을 나타내었다. 대호와 석문호는 유기오염요인과 유의한 상관관계를 나타내지 않았으며, 내부생산요인인 pH와 대호는 임야(forest), 석문호는 축산계 오염원(cattle, pork, chicken)과 상관성이 있는 것으로 조사되었다. 대호는 질소요인(T-N, NH₄-N, NO₃-N)과 토지계 오염원(residential, other)의 상관성이 높게 나타난 것으로 조사되었으며, 축산계 오염원

과의 상관성은 유의하지 않아 축산계 오염원의 영향은 미미한 것으로 판단된다. 탐정지는 토지계 오염원 중 전(upland)을 제외한 모든 토지계 오염원과 유기오염요인(BOD), 영양염류 요인(T-P, PO₄-P, NH₄-N), 세균오염요인(Coli)과 양(+)의 상관성을 나타냈다. 따라서 비점오염원의 관리가 필요할 것으로 판단되지만, 탐정지와 대호는 간월호와 마찬가지로 답(paddy)과 전(upland)의 수질정화로 인해 음(-)의 상관성을 나타낸 것으로 판단된다. 용담호는 축산계 오염원과 유기오염요인(BOD, COD), 영양염류 요인(T-P), 내부생산요인(pH, SS), 세균오염요인(Coli)과 약 0.9 이상 높은 양(+)의 상관성을 나타내 축산계 오염원의 관리가 필요할 것으로 판단된다.

Table 8은 유기오염과 내부생산요인 그리고 인 요인으로 구분된 부남호, 예당지, 청천지의 수질 인자와 오염원의 Pearson correlation을 나타내었다. 부남호는 토지계 오염원(residential, other)과 인 요인(TP)의 높은 양(+)의 상관성을 나타냈으며, 질소요인(TN)과 유기오염요인(COD, EC)와도 높은 양(+)의 상관성을 나타냈다. 또한 생활계 오염원(population)과 유기

Table 7. Pearson correlation between water quality parameters and pollutants in reservoirs with organic matter & algae effects.

TJ	Land pollutant					Human living		Livestock pollutant			
	Upland	Paddy	Forest	Residential	Other	Population	Un treatment	Cattle	Dairy cattle	Pork	Chicken
BOD	-0.757	-.903*	-0.854	.887*	.881*	-0.81	-.988**	-.957*	-.916*	0.78	0.376
TP	-0.869	-.924*	-.989**	.903*	0.514	-0.87	-0.773	-.912*	-0.669	0.697	-0.011
NH ₄ -N	-0.581	-0.74	-0.614	0.725	.948*	-0.61	-.928*	-0.809	-.934*	0.738	0.596
NO ₃ -N	-0.567	-0.535	-0.602	0.6	0.076	-0.763	-0.499	-0.476	-0.231	-0.036	-0.563
PO ₄ -P	-0.79	-.921*	-0.845	.899*	.907*	-0.791	-.989**	-.959**	-.974**	0.844	0.461
SS	0.387	0.541	0.519	-0.444	-0.699	0.215	0.492	0.633	0.649	-.930*	-0.742
Coli	0.787	.896*	.970**	-0.87	-0.602	0.837	0.81	.933*	0.673	-0.714	-0.063
DH											
pH	0.859	0.85	.889*	-0.807	-.918*	-0.747	0.775	-0.737	-0.599	-0.618	0.618
TN	-.963**	-.993**	-.978**	.995**	.966**	0.824	-0.834	0.661	0.41	0.435	-0.435
NH ₄ -N	-.914*	-.921*	-.893*	.916*	0.874	0.72	-0.727	.884*	0.713	0.731	-0.731
NO ₃ -N	-.883*	-0.852	-0.866	0.808	.913*	0.675	-0.703	0.87	0.76	0.774	-0.774
SM											
pH (ln)	-.880*	-0.816	-0.794	0.647	0.559	0.827	-0.531	.981**	-.902*	.963**	.970**
YoD											
Temp.	0.835	-0.775	-0.782	0.779	0.686	-0.939*	-0.553	0.639	-0.668	0.344	.915*
pH	0.688	-0.675	-0.7	0.684	0.764	-0.7	-0.491	-0.169	-.911*	.902*	0.31
EC	.913*	-0.743	-0.765	0.749	0.754	-0.764	-0.479	0.339	-0.715	0.791	0.537
BOD	0.735	-0.876	-0.871	0.878	0.793	-.962**	-0.797	0.375	-0.772	0.181	.929*
COD	0.556	-0.718	-0.703	0.717	0.583	-0.831	-0.69	0.521	-0.519	-0.16	.956*
TP	0.361	-0.205	-0.196	0.201	0.024	-0.403	-0.048	.988**	0.123	-0.337	0.727
SS	0.547	-0.557	-0.564	0.564	0.462	-.899*	-0.345	0.578	-0.644	0.169	.909*
Coli	-0.769	0.716	0.741	-0.725	-0.787	0.745	0.506	0.038	.892*	-.899*	-0.386

오염요인(BOD), 영양염류 요인(T-P)과 높은 양(+)의 상관성을 나타내 하수처리수의 관리가 필요할 것으로 판단된다. 예당지도 인요인(PO₄-P)과 토지계 오염원(residential, other)이 높은 양(+)의 상관성을 나타냈으며, 부남호는 답(paddy)과 임야(forest), 예당지는 전(upland), 답(paddy)과 임야(forest)와 수질인자 간의 높은 음(-)의 상관성을 나타내 수질정화의 역할을 하는 것으로 조사되었다. 따라서 토지계 오염원에 따른 적절한 비점오염원 대책이 필요할 것으로 판단된다.

Table 9는 기타요인으로 구분된 송악지, 보령호, 대청호, 초평지의 수질 인자와 오염원의 Pearson correlation을 나타내었다. 송악지는 하수미처리 비율과 DO가 높은 양(+)의 상관성을 나타내 하수미처리지역의 관리가 필요할 것으로 판단되며, 임야(forest)에서 유입되는 유기오염요인(COD)의 관리도 필요할 것으로 판단된다. 보령호는 수질인자와 오염원 간의 상관성이 유의하지만, 경향성이 뚜렷하지 않기 때문에 토지계, 생활계, 축산계 오염원의 영향은 미미한 것으로 판단된다. 대청호는 질소 요인(T-N, NO₃-N), 내부생산요인(Chl-a), 세균

오염요인(FColi)과 토지계 오염원간의 높은 상관성을 나타내 호내로 유입되는 비점오염원의 관리가 필요할 것으로 판단된다. 또한 생활계 오염원과도 높은 양(+)의 상관성을 나타내 미처리 하수의 처리 및 유입 저감이 필요할 것으로 판단된다. 초평지는 일부 토지계 오염원(upland, forest)과 DO 간의 높은 상관성을 나타내지만 대체로 토지계, 생활계, 축산계 오염원이 수질 인자에 미치는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

3.4. 금강수계 14개 호소의 종합적 평가

앞선 결과들을 종합하여 금강수계 14개 호소의 종합적 평가를 수행하였다. 수질 및 오염원 현황, 호소의 분류, 상관된 오염원등을 양호(Good), 보통(Normal), 나쁨(Bad)으로 평가하여 다음 **Table 10**과 같이 나타내었다. 수질 및 오염원 현황은 각 수질 및 오염원 항목을 순위화하여 1~4는 양호(Good), 5~9는 보통(Normal), 10~14는 나쁨(Bad)으로 평가하였다.

양호로 평가된 호소는 보령호, 청천지, 초평지, 대청호, 탐정지, 송악지이며, 이들 호소는 수질과 오염원 모두 양호 혹은

Table 8. Pearson correlation between water quality parameters and pollutants in reservoirs with organic matter & algae & phosphorus effects.

BN	Land pollutant					Human living		Livestock pollutant			
	Upland	Paddy	Forest	Residential	Other	Population	Un treatment	Cattle	Dairy cattle	Pork	Chicken
EC	-0.559	-.920*	-.906*	.917*	.924*	0.857	-0.753	-0.87	-0.87	-.959**	-0.87
BOD	-0.219	-0.535	-0.712	0.583	0.845	0.489	-.973**	-0.426	-0.426	-0.748	-0.426
COD	-0.764	-.926*	-.995**	.962**	.987**	.912*	-0.688	-0.87	-0.87	-.943*	-0.87
T-N	-0.602	-0.76	-.939*	0.821	.981**	0.726	-0.807	-0.666	-0.666	-0.84	-0.666
T-P	-0.808	-.898*	-.999**	.945*	.977**	.889*	-0.632	-0.838	-0.838	-.894*	-0.838
PO ₄ -P	-0.512	-0.913*	-0.772	0.87	0.752	0.846	-0.551	-.905*	-.905*	-.891*	-.905*
YeD											
pH	0.111	0.132	0.178	-0.11	-0.372	-0.168	0.244	-0.014	0.568	-.923*	-0.39
DO	0.413	0.415	0.428	-0.421	-0.326	0.658	0.416	-0.43	-.903*	.924*	0.748
EC	-0.007	-0.064	-0.11	0.022	0.395	0.229	-0.145	-0.001	-0.51	.881*	0.422
NO ₃ -N	-0.638	-0.691	-0.681	0.669	0.626	-0.829	-0.575	0.766	.990**	-0.668	-.890*
PO ₄ -P	-.934*	-.957*	-.976**	.943*	.929*	-0.845	-.944*	0.877	0.508	0.124	-0.693
Coli	-0.519	-0.604	-0.669	0.555	.897*	-0.594	-0.672	0.582	0.653	-0.237	-0.51
CC											
DO	0.688	0.369	-0.025	-0.329	-0.608	-0.492	-0.093	-0.397	-.949*	-0.729	.b
T-N (ln)	-0.433	-.932*	-0.799	.960**	.902*	-0.171	-0.731	0.866	0.146	0.802	.b
T-P (ln)	0.806	-0.267	-0.628	0.302	0.103	-.889*	-0.708	0.299	-0.664	-0.016	.b

양호과 보통으로 평가되었으며, 수질의 오염도가 낮고 오염원이 비교적 적기 때문에 수질보전을 위한 지속가능한 수질관리 대책이 필요할 것으로 판단된다.

보통으로 분류된 호소는 부남호, 대호, 금강호, 예당지, 용담호로 하구형 호소와 일부 댐형, 농업용 호소가 포함되어 있는 것으로 조사되었다. 이들 호소는 수질과 오염원 모두 보통 혹은 나쁨과 보통으로 평가되었으며, 부남호는 토지계, 생활계, 축산계 오염원의 관리가 필요할 것으로 판단된다. 대호와 예당지는 토지계 오염원의 관리가 필요하며, 금강호, 예당지, 용담호는 축산계 오염원의 관리가 필요할 것으로 판단된다.

마지막으로 나쁨으로 분류된 간월호, 삽교호, 석문호는 하구에 위치한 호소로 수질과 오염원이 모두 나쁨으로 평가되었으며, 유입되는 오염원이 많기 때문에 간월호는 토지계 오염원 대책, 석문호는 축산계 오염원 대책이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 삽교호는 토지계 오염원과 축산계 오염원 대책이 병행될 필요가 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 금강수계 14개 호소를 대상으로 기본 통계분석을 통해 호소의 수질의 최근 5년(2014년~2018년)의 현황을 파악하고, 요인분석을 통해 호소 수질오염의 주요인

호소의 관리를 위한 수질특성별(factor 1기반) 분류를 통해 호소를 대표하는 수질인자를 도출하였다. 또한 각 호소의 수질인자와 해당 유역의 오염원간의 상관분석을 통해 실제 호소에 영향을 미치는 오염원을 분석하여 금강수계의 14개 호소의 수질관리 및 수질 개선 대책 수립의 기반이 되고자 하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

1) 호소 수질의 정량적 평가결과 수온(Temp.), 유기오염물(BOD, COD), 총질소(T-N), SS와 Chl-*a*는 댐형 호소인 대청호, 보령호, 용담호에서 비교적 오염도가 낮게 평가되었으며, pH와 DO는 14개 호소 모두 유사한 경향을 나타냈다. EC의 경우 하구형 호소인 간월호, 금강호, 대호, 부남호, 삽교호, 석문호에서 높은 농도를 나타냈으며, 특히 삽교호의 경우 영양염류의 오염도가 심각한 것으로 조사되어 SS와 Chl-*a*의 농도도 상당히 높게 조사되어 호소의 적극적인 수질관리가 필요할 것으로 판단된다.

2) 14개 호소의 요인분석 결과 3~6개의 요인이 추출되었으며 평균 74%의 설명력을 나타냈다. 요인 1에 추출된 수질인자를 바탕으로 호소를 분류한 결과, 질소 요인과 계절 요인으로 분류된 호소는 간월호, 금강호, 삽교호이며, 유기오염과 내부생산으로 분류된 호소는 탐정지, 대호, 석문호, 용담호이며, 유기오염과 내부생산 그리고 인 요인으로 분류된 호소는 부남호, 예당지, 청천지이다. 나머지 보령호, 대청호, 초평지, 송악지는 기타 호소로 분류되었다.

Table 9. Pearson correlation between water quality parameters and pollutants in reservoirs with mixed effects.

SA	Land pollutant					Human living		Livestock pollutant			
	Upland	Paddy	Forest	Residential	Other	Population	Untreated	Cattle	Dairy cattle	Pork	Chicken
DO	0.459	0.553	0.064	-0.515	-0.112	0.056	.920*	0.308	0.253	0.435	-0.308
COD (ln)	0.859	0.813	.894*	-0.851	-0.841	-0.839	0.484	-0.737	-0.826	0.691	0.737
BR											
pH	0.244	-0.72	-.978**	0.843	0.702	-.890*	-0.874	0.212	-0.473	-0.267	0.788
DO	0.798	0.752	0.368	-0.619	-0.834	-0.223	0.647	-0.789	-0.186	.928*	-0.55
NH ₄ -N	-0.689	-0.836	-0.646	0.841	0.787	-0.091	-0.755	.908*	0.289	-.899*	0.34
SS	0.661	0.074	-0.057	-0.115	-0.212	-0.34	0.003	-0.795	-.927*	0.599	0.294
Chl- <i>a</i>	0.778	0.876	0.585	-0.817	-.881*	-0.028	0.781	-.911*	-0.233	.977**	-0.487
FColi	-0.211	0.741	.980**	-0.865	-0.651	0.862	0.864	-0.221	0.472	0.264	-0.686
Coli	0.661	0.52	0.397	-0.574	-0.511	-0.035	0.443	-.890*	-0.602	0.76	0.013
DC											
DO	-0.119	-0.23	-0.139	0.239	-0.065	-0.169	.905*	-0.445	-0.625	-0.445	-0.074
T-N	-0.863	-.922*	-.935*	.926*	.960**	-0.727	0.151	0.533	-0.727	0.819	0.876
T-P	-0.48	-0.837	-0.807	0.824	0.59	-0.718	0.589	0.457	-.908*	0.334	0.867
NO ₃ -N	0.758	.986**	.990**	-.983**	-.908*	.950*	-0.214	-0.159	0.827	-0.775	-0.834
SS	0.038	-0.008	-0.028	-0.005	0.037	0.19	-0.046	.961**	0.034	0.055	0.427
Chl- <i>a</i>	0.646	.961**	.964**	-.952*	-0.831	.985**	-0.217	-0.096	0.819	-0.719	-0.828
FColi	0.528	.878*	.909*	-0.86	-0.799	.881*	0.01	-0.502	0.643	-0.794	-.978**
Coli	0.414	0.678	0.744	-0.659	-0.733	0.749	0.421	-0.48	0.292	-.905*	-0.836
CP											
pH (ln)	-0.067	-0.146	-0.386	-0.027	-0.546	0.127	-0.449	-0.477	-0.075	-0.152	.957*
DO	.953*	0.94	.962*	-0.804	-0.364	-0.923	0.651	0.147	0.118	0.129	-0.518
COD (ln)	0.073	0.018	-0.061	0.004	-0.05	0.032	0.211	-.911*	-0.876	-.888*	0.15
SS	0.509	0.539	0.337	-0.736	-.966**	-0.562	-0.676	0.362	0.559	0.552	0.323

Table 10. Comprehensive evaluation of 14 reservoirs in Geum river basin.

Reservoirs	Water quality	Pollutant	Classification	Spatial change	Correlated pollutants	Property	Evaluation
GW	●	●	N & Seasonal	Different	Land	Estuary	●
SG	●	●	N & Seasonal	Equivalence	-	Estuary	●
SM	●	●	Organic & Algae	-	Livestock	Estuary	●
BN	●	●	Organic & Algae & P	Different	Land, Human living, Livestock	Estuary	●
DH	●	●	Organic & Algae	Equivalence	Land	Estuary	●
GG	●	●	N & Seasonal	Equivalence	Livestock	Estuary	●
YeD	●	●	Organic & Algae & P	Different	Land, Livestock	Agriculture	●
YoD	○	●	Organic & Algae	Equivalence	Livestock	Dam	●
CC	●	○	Organic & Algae & P	-	-	Agriculture	○
CP	●	○	Other	-	-	Agriculture	○
TJ	○	●	Organic & Algae	Equivalence	Land, Human living, Livestock	Agriculture	○
SA	●	○	Other	-	-	Agriculture	○
DC	○	●	Other	Different	Land	Dam	○
BR	○	○	Other	Equivalence	Livestock	Dam	○

○ : Good, ● : Normal, ● : Bad

3) 요인분석을 통해 나온 결과를 바탕으로 실제 오염원과 상관성을 분석한 결과, 토지계, 생활계, 축산계 오염원과 높은 상관성을 나타낸 호소는 간월호, 탑정지, 대호, 부남호, 대청호이며 이들 호소는 특정(토지계, 생활계, 축산계) 오염원의 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단된다. 나머지 9개 호소의 경우 타 오염원 혹은 내부생산성을 검토해 심층적으로 연구가 되어야 할 것으로 판단된다.

4) 간월호, 삼교호, 석문호는 수질오염도와 오염원 유입이 가장 많게 조사되었으며, 모두 하구에 위치한 공통점을 갖는 것으로 확인되었다. 하지만, 간월호와 삼교호는 질소와 계절 영향으로, 석문호는 유기물과 조류로 분류되었다. 또한 삼교호는 지점에 따른 수질의 변화가 있었으며, 세 호소 모두 수질과 상관성이 높게 평가된 오염원이 상이하었다. 이러한 결과는 같은 특성을 갖는 호소일지라도 유입되는 오염원, 내부생산성, 형태학적 요소, 수문학적 요소 등이 다르기 때문으로 판단된다. 따라서, 금강수계 내 14개 호소의 수질을 효과적으로 관리하기 위해서는 각 호소의 수질오염 특성을 파악하여, 같은 수질오염 특성을 갖는 호소로 분류하고, 분류된 호소를 대상으로 맞춤형 수질개선대책이 수립되어야 할 것이다.

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Water Vision 2020 (2001 ~ 2020) : 3rd modified plans, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Korea(2016).
2. Korea Rural Community Corporation, Rural Agricultural Water Resource Information System, Korea Rural Community Corporation, Naju, Korea(2019).
3. Ministry of Environment, Study on Water Quality Management for Reservoir, Ministry of Environment, Sejong, Korea(2009).
4. S. H. Choi, H. D. Kim, D. W. Kim, The evaluation of water quality characteristics using a multivariate statistical analysis in the artificial lake, J. Korean irrigation and drainage, 21(2), 87-99(2014).
5. E. J. Fee, A relation between lake morphometry and primary productivity and its use in interpreting whole-lake eutrophication experiments, Limnol. Oceanogr., 24(3), 401-416(1979).
6. J. K. Kim, W. H. Hong, Studies on the physical environmental factor analysis for water quality management in man-made lake of Korea, J. Environ. Sci. Int., 1(2), 49-58(1992).
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, Korean J. Environ. Agric., 22(2), 166-171(2003).
8. Y. M. Park, E. H. Lee, S. J. Lee, K. G. An, Trophic state characteristics in Topjeong reservoir and their relations among major quality parameters, Korean J. Limnol., 42(3), 382-393(2009).
9. K. J. Kim, K. S. Yoon, J. W. Lee, Characteristics of the water quality of Wanggung agricultural reservoir, KCID J., 10(2), 24-35(2003).
10. K. S. Seymour, K. Christanis, A. Bouzinos, S. Papazisimou, G. Papatheodorou, E. Moran, G. Dénès, Tephrostratigraphy and tephrochronology in the Philippi peat vasin, Macedonia, Northern Hellas (Greece), Quart. Int., 121(1), 53-65(2004).
11. V. Simeonov, J. A. Stratis, C. Samara, G. Zachariadis, D. Voutsas, A. Anthemidis, M. Sofoniou, T. Kouimtzis, Assessment of the surface water quality in Northern Greece, Water Res., 37(17), 4119-4124(2003).
12. S. Yu, J. Shang, J. Zhao, H. Guo, Factor analysis and dynamics of water quality of the Songhua river, northeast China, Water, Air, Soil Pollut., 144, 159-167(2003).
13. Korea Rural Community Corporation, Statistical yearbook of land and water development for agriculture, Korea Rural Community Corporation, Naju, Korea(2017).
14. B. K. Kim, J. S. Park, H. J. Won, Y. Y. Kim, Long-term performance of secondary dam installed for water purification of reservoir, J. Korea Acad. Industr. Coop. Soc., 19(10), 668-676(2018).
15. H. S. Kim, E. M. Choi, J. H. Park, H. S. Hwang, B. Kim, D. S. Kong, S. J. Hwang, The relationships between empirical factors and water quality in agricultural reservoirs, J. Korean Soc. Water Qual., 24(3), 333-339(2008).
16. J. I. López-Moreno, J. Zabalza, S. M. Vicente-Serrano, J. Revuelto, M. Gilaberte, C. Azorin-Molina, E. Morán-Tejedab, J. M. García-Ruiza, C. Tague, Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees, Sci. Total Environ., 493(15), 1222-1231(2014).
17. P. Palma, P. Alvarenga, V. L. Palma, R. M. Fernandes, A. M. V. M. Soares, I. R. Barbosa, Assessment of anthropogenic sources of water pollution using multivariate statistical techniques: a case study of the Alqueva's reservoir, Portugal, Environ. Monit. Assess., 165, 539-552(2010).
18. A. H. Pejman, G. R. N. Bidhendi, A. R. Karbassi, N. Mehrdadi, M. E. Bidhendi, Evaluation of spatial and seasonal variations in surface water quality using multivariate statistical techniques, Int. J. Environ. Sci. Technol., 6(3), 467-476(2009).
19. H. Boyacioglu, Surface water quality assessment using factor analysis, Water SA, 32(3), 389-394(2006).
20. C. G. Yoon, S. B. Lee, K. W. Jung, J. Y. Han, Analysis of relationship between water quality parameters in agricultural irrigation reservoirs and land uses of associated watersheds, Korean J. Limnol., 40(1), 31-39(2007).
21. H. S. Cho, H. J. Cho, K. H. Cho, Effects of hydrogeomorphology and watershed land cover on water quality in Korea reservoirs, Ecol. Resil. Infrastruct., 6(2), 79-88(2019).
22. Z. 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, Int. J. River Basin Manag., 18(2), 217-230(2020).
23. J. G. Kim, Evaluation of water quality in the Keum River using statistics analysis, J. Environ. Sci. Int., 11(12), 1281-1289(2002).
24. H. J. Noh, Multivariate analysis theory and practice using

- SPSS & Excel, Jiphil media, Seoul, Korea, pp.187-469 (2016).
25. 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, *Korean. J. Limnol.*, 368-377(2012).
26. 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 Qual.*, 23(1), 161-168(2007).
27. 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.*, 178(3-4), 295-311(2004).
28. National Institute of Environmental Research(NIER), Survey and Assessment of Estuary Ecosystem Health (VIII), National Institute of Environmental Research(NIER)(2015).
29. S. J. Hwang, S. K. Kwun, C. G. Yoon, Water quality and limnology of Korean reservoirs, *Paddy Water Environ.*, 1, 43-52(2003).
30. J. Kalf, *Limnology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA, pp. 1-592(2001).
31. H. R. Jeong, K. T. Kim, E. S. Kim, S. Y. Lee, K. T. Ra, Regional variation and discharge characteristics of stream water quality and heavy metals around the Shihwa lake basin, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy.*, 20(2), 76-83(2017).
32. S. H. Choi, H. D. Kim, D. H. Kim, The evaluation of water quality characteristics using a multivariate statistical analysis in the artificial lake, *KCID*, 21(2), 87-100(2014).
33. S. H. Choi, H. D. Kim, T. H. Lee, W. I. Park, Study on main factors affecting water quality using a multivariate statistical analysis in the agricultural lakes, *KCID*, 22(2), 82-97(2015).
34. Y. Y. Kim, S. J. Lee, Evaluation of water quality for the Han River tributaries using multivariate analysis, *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 33(7), 501-510(2011).
35. H. S. Kim, J. S. Kim, Y. I. Kim, B. H. Cheong, Analysis of the characteristics of nutrients loading and the water purification function in the paddy-fields, *KCID J.*, 11(1), 36-44(2004).

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

Jin Ho Kim

Land & Housing Institute, Researcher, [ORCID](#) 0000-0003-1505-723X: Conceptualization, Methodology, Validation, Writing - original draft.

Jin Chul Joo

Department of Civil and Environmental Engineering, Hanbat National University, Professor, [ORCID](#) 0000-0001-8551-3945: Writing - review and editing.

Chae Min Ahn

Department of Environmental Engineering, Hanbat National University, Master Candidate, [ORCID](#) 0000-0003-1766-5474: Methodology, Visualization.

Dae Ho Hwang

Korea Water Policy Research Institute, Researcher Director, [ORCID](#) 0000-0002-2538-9249: Validation, Visualization.