

다변량 통계분석을 활용한 제4수원지 수질특성 평가

서희정^{1†} · 강인숙¹ · 은 양¹ · 손경록¹ · 정원삼¹ · 김성준²

¹광주광역시 수질연구소, ²전남대학교 환경에너지공학과

Evaluation of Water Quality Characteristics Using Multivariate Statistical Analysis in the Fourth Reservoir

Hee-Jeong Seo^{1†}, In-Sook Kang¹, Kyung-Rok Son¹, Yang Eun¹, Won-Sam Jeong¹,
and Seong-Jun Kim²

¹Water Quality Research Institute of Waterworks Gwangju, Gwangju, 61748, Korea

²Department of Environmental and Energy Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea

Received August 6, 2019, Revised September 4, 2019 / Accepted September 25, 2019

In this study, multivariate statistical analysis was applied to analyze the trend of water quality and water quality in the Fourth reservoir over the last 10 years. Correlation analysis between water quality variables showed that, the correlation coefficient between COD and TOC, which is an indirect indicator of organic matter, showed a high correlation of 0.608, while water temperature showed a positive correlation with pH of 0.515 and a negative correlation with DO of -0.716. Principal component and factor analyses showed that the four major components were extracted from the total water quality and contributed 72.9% of the total variance. When analyzed for cyanobacteria occurrence, three major components were extracted and contributed 67.2% of the total variance. Factor loadings analysis of water quality variables on the factors identified the first factors as COD and TOC. Water quality of the Fourth reservoir was found to be influenced by seasonal effects such as rainfall and organic matter, in addition to the effects of phytoplankton proliferation and nutrient influx.

Key words: multivariate statistical analysis, correlation, principal component, factor analysis

1. 서 론

우리나라에는 약 18,000개 이상의 저수지가 건설되어 유수생태계(lotic habitat)이던 하천생태계는 대부분 정수생태계(lentic habitat)인 호소생태계로 대체되었으므로 생태계의 다양성뿐 아니라 수자원의 관리에 있어서도 호소의 중요성이 매우 커지고 있다¹⁾. 하천에서는 외부 유입 BOD를 제거하는 것이 주요 수질관리의 목표이지만 호소에서는 외부기원유기물 뿐 아니라 호소내 조류의 일차생산을 증가시키는 인을 감소시키는 것이 수질관리의 주요 목표가 된다. 국내의 크고 작은 많은 호소에서 1990년대 이후 부영양화로 인한 조류, 특히 식물플랑크톤의 다량 발생현상이 담수적조나 녹조현상 등

으로 가지화되고 있으며²⁾, 기후변화에 따른 가뭄과 물 수요 급증으로 미래의 물 부족이 증가함에 따라 수질관리 정책을 수립하기 위해서 현재의 수질을 진단하고, 과거 정책효과의 여부를 잘 파악하여 향후 정책 보완 및 수정을 하기 위해 수질변화에 따른 경향분석의 지속적인 요구가 필요시 되고 있다³⁾.

호소 수질은 자연현상에서 오염물질의 희석과 확산, 오염물질 배출정도, 미생물의 분해와 조류의 광합성 등 다양하고 수많은 요인들의 복합적인 상호작용에 의하여 발생하기 때문에 호소의 수질특성을 정확하게 평가하기 위해서는 단순한 모니터링 자료만 가지고는 종합적인 평가가 어렵다⁴⁾. 객관적이고 종합적인 수질평가를 위해서는 대상 자료의 통계적 특성을 파악하여 신뢰할

[†]To whom correspondence should be addressed.

수 있는 장기간의 데이터를 수집하는 것이 중요하며, 관측된 수질자료는 계절별로 심한 변이가 존재하기에 적절한 통계 기법을 활용하여 수질에 미치는 영향 인자들을 도출하고, 이들 사이의 상호 영향 평가가 우선되어야 한다^{3,5)}. 최근까지 상관분석, 요인분석, 회귀분석 등 여러 가지 통계분석방법을 이용하여 하천 및 호소의 수질 특성을 평가한 연구가 국내외적으로 활발히 수행되고 있으며, 수질 정책을 위한 방법으로 많이 활용되고 있다⁶⁻¹²⁾.

광주광역시 수원지인 제4수원지는 상수원 수질관리 및 수질 변화 추이를 분석하기 위해 매일 정기적으로 수질조사를 실시하고 있다. 현재 제4수원지 수질조사 데이터는 단기적인 수질 현황 분석 자료로만 활용되고 있고 수질 추세 파악을 위한 장기간의 데이터 분석 자료로 활용은 미미한 실정이다. 또한, 최근 5년간 남조류 발생 빈도가 증가되어 정수장 수질관리에 어려움을 겪고 있어 통계분석법을 이용하여 주된 오염 인자를 합리적으로 산출하고 수질관리를 수행할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 제4수원지의 장기간 수질데이터를 바탕으로 다양한 통계분석기법을 통해 수질인자들의 상관성 해석 및 수질변동의 영향인자를 파악하여 향후 수질개선 대책을 위한 계획수립 및 상수원의 효율적인 수질관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 연구대상 현황

제4수원지는 광주광역시 북구 화암동(N35°9'54.17", E126°57'37.23")에 위치하며, 유역면적이 1,340 ha의 소규모 수원지로 광주광역시 주요 상수원인 동북호에 비해 연구자료가 부족한 실정이며, 최근 수질관리에 어려움을 겪게 되어 전반적인 수질 현황을 파악하기 위해 연구대상으로 선정하였다. (Fig. 1). 광주광역시 주요 상수원인 동북호 대비 저수용량은 약 1.9%, 유역면적은 약 7%로 규모가 매우 작다. 광주광역시 북구 일원의 생활용수를 해결하고자 1967년 4월에 준공되어 저수용량 190만 m³, 유효저수량 184만 m³, 만수면적 25 ha 규모로 하루 2만 m³을 공급할 수 있는 취수시설을 갖추고 있다¹³⁾. 제4수원지 상수원보호구역은 유역면적의 72.4%에 해당되는 9.7 km²로 약 55가구 96명의 주민이 거주하고 있으며, 6개의 무허가 음식점이 위치해 있다. 신고 대상인 축산시설은 없으나 일부 음식점에서 닭 등 가금류를 방사하여 기르는 것으로 조사되었다. 농경지

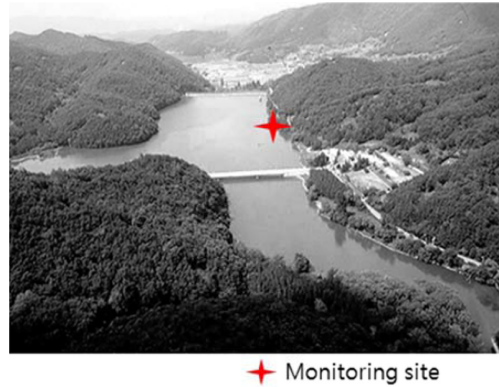


Fig. 1. Location of the study and monitoring site.

는 40 km²로 유역면적의 약 3%로 매우 적은 면적을 차지하고 있어 농경지에서 유입될 수 있는 비점오염원의 영향은 적을 것으로 판단된다. 또한 생활하수 및 음식점에서 발생하는 하수는 1일 60 m³ 규모의 마을하수 처리시설에서 대부분 처리되고 있으며 처리수는 제4수원지 댐 아래로 방류하고 있어 제4수원지에 영향을 미치지 않는 것으로 조사되었다.

연구대상 유역의 강수 현황을 알아보기 위해 2008년부터 2017년까지 10년간의 강수량과 저수율을 조사하였으며 Fig. 2에 나타내었다. 제4수원지의 10년간 연평균 강수량은 약 1,458 mm로 나타났으며, 2008년에 756 mm로 강수량이 가장 낮았으며 2012년에 1,888 mm로 가장 높은 강수량을 보였다. 또한 집중강우기인 여름철(6월~8월)에 전체 강수량의 약 51%를 차지하는 것으로 나타났다. 특히 2009년에는 약 71%가 여름철에 집중적으로 내린 것으로 나타났다. 4수원지의 10년간 연평균 저수율은 약 55%로 나타났으며, 2015년 42%로 저수율이 가장 낮은 것으로 조사되었다. 계절별로는 여름철과 가을철에 저수율이 높았으며, 겨울철에 전체적으로 강수량이 적어 저수율이 낮게 나타났다.

2.2. 분석 항목

본 연구는 광주광역시 제4수원지 취수탑에서 시료 채취하였으며 2008년부터 2017년까지 10년 동안 월 1회 수질 모니터링을 실시하여 총 120회 측정 분석한 자료를 사용하였다. 분석 항목은 현장 수질 측정 항목인 수온, pH, 전기전도도, 용존산소(DO)와 일반 수질 항목인 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC), 용존성유기탄소(Dissolved Organic Carbon, DOC), 화학적산소요구량(COD), 총질소(T-N), 총인(T-P), 부유물질(SS), 클로

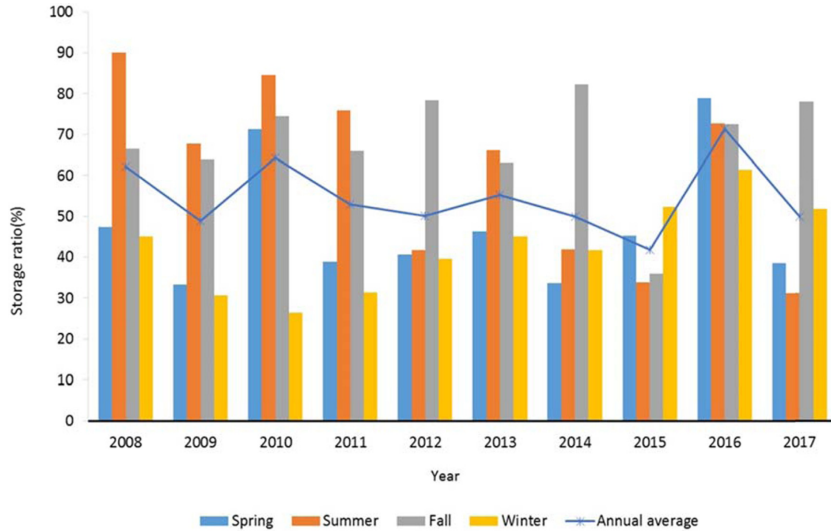


Fig. 2. Intensive precipitation ratio in the Fourth Reservoir.

로필-a, 2-MIB를 수질오염공정시험기준¹⁴⁾에 준하여 분석하였다. 조류 분석은 1% 루골용액으로 고정하여 냉장 보관 후 검경하였으며, 남조류, 녹조류, 규조류, 기타조류 등으로 구분하였다.

2.3 통계 분석 방법

본 연구에서는 제4수원지의 수질특성을 평가하기 위해 수질자료에 대해 다변량 분석을 하였으며, 통계프로그램인 SPSS(ver. 24.0)를 사용하였다. 다변량 분석은 여러개의 독립변수에 대한 여러개의 종속변수를 동시에 분석해 보는 통계적인 기법을 말하며, 본 연구에서는 상관분석과 주성분분석 및 요인분석을 주로 실시하여 수질특성을 파악하고자 하였다. 상관분석은 두개의 변수에 대해 서로 상관되는 인자항목들이 어떤 관련성이 있고, 그 관련성이 어느 정도인지를 수치적으로 분석하는 것을 말한다. 주성분 분석(principle component analysis)은 변수 간에 상관성을 갖는 여러 종류의 특성치들의 변화 양상으로부터 이들 속에 내재하고 있는 상호 독립적인 고유의 패턴을 도출할 수 있다. 또한 다변량으로 구성되는 데이터로부터 소수의 특징적인 변량을 합성하여 주성분을 산출하고, 차원이 축소되어 데이터 분석이 용이해진 주성분을 사용하여 전체 다변량 데이터의 경향을 분석하게 된다⁶⁾. 요인분석은 특정 변수들 간의 상호 연관성을 보다 간결하게 분석해서 공통적으로 내재된 인자를 추출하여 전체 자료를 대변할 수 있는 변수의 수를 줄이는 기법으로 변수들간 상관관계

가 높은 것끼리 하나의 요인으로 간결하게 묶어주는 역할을 한다⁹⁾. 요인 적재치의 단순화를 위하여 직교회전 방식(varimax)을 채택하였다. 본 연구에서의 요인의 선택기준은 고유값(eigen value) 1.0 이상, 요인적재치 0.40 이상을 기준으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 호소 수질특성

제4수원지의 수질특성을 알아보기 위하여 10년간 수질조사 결과를 Table 1에 나타내었으며, Table 2에 계절별 수질 조사결과를 나타내었다. 또한 호소수 수질 주요항목인 TOC와 T-N, T-P, 클로로필-a에 대해서는

Table 1. Fourth Reservoir water quality during 2008-2017

	Mean	Max.	Min.	SD*	CV**
WT	16.5	31.3	1.8	8.8	53.4
pH	7.8	9.5	6.7	0.6	7.9
EC	83	136	39	11	13.3
DO	10.6	14.5	6.2	1.8	17.6
TOC	2.476	6.839	1.148	0.763	30.8
COD	3.9	6.9	2.3	0.8	22.3
T-N	0.857	1.990	0.101	0.328	38.3
T-P	0.018	0.094	0.001	0.011	64.7
SS	3.2	12.3	0.7	1.5	47.4
Chl-a	11.8	37.4	1.1	6.2	52.8

*SD : standard deviation

**CV : coefficient of variation, CV = SD / Mean × 100

Table 2. Fourth Reservoir seasonal water quality during 2008-2017

		WT	pH	EC	DO	TOC	COD	T-N	T-P	SS	Chl-a
Spring	Mean	12.7	7.7	87.6	11.6	2.0	3.6	1.072	0.018	3.2	10.2
	SD	5.4	0.5	7.9	1.0	0.6	0.5	0.327	0.010	0.8	5.5
	CV	42.5	6.5	9.0	8.6	30.0	13.9	30.5	55.6	25.0	53.9
Summer	Mean	26.3	8.4	82.9	9.7	2.8	4.4	0.832	0.022	3.3	11.0
	SD	3.2	0.6	11.4	1.2	0.6	0.9	0.284	0.010	1.6	6.6
	CV	12.2	7.1	13.8	12.4	21.4	20.5	34.1	45.5	48.5	60.0
Fall	Mean	21.4	7.8	75.8	8.9	2.9	4.4	0.748	0.019	3.4	14.7
	SD	4.1	0.6	6.2	1.2	0.5	0.9	0.330	0.016	1.2	6.7
	CV	19.2	7.7	8.2	13.5	17.2	20.5	44.1	84.2	35.3	45.6
Winter	Mean	5.9	7.5	86.7	12.4	2.2	3.5	0.779	0.013	3.0	11.3
	SD	3.0	0.4	13.5	1.5	0.9	0.8	0.281	0.006	2.2	5.4
	CV	50.8	5.3	15.6	12.1	40.9	22.9	36.1	46.2	73.3	47.8

Box plot을 이용하여 연도별 수질결과를 Fig. 3에 나타내었다. pH의 경우는 6.7~9.5의 범위로 평균 7.8로 나타났다으며, 여름철 조류발생이 빈번한 시기에 평균 8.4로 높게 나타났다. 전기전도도는 39~136 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 범위로

평균 83 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 을 나타냈다. 용존산소량은 6.2~14.5 mg/L의 범위로 평균 10.6 mg/L로 나타났다. TOC의 평균 농도는 2.3 mg/L, 농도범위는 1.1~6.8 mg/L로 호소 생활환경기준 I b 등급(좋음)으로 조사되었으며, 계절별 농

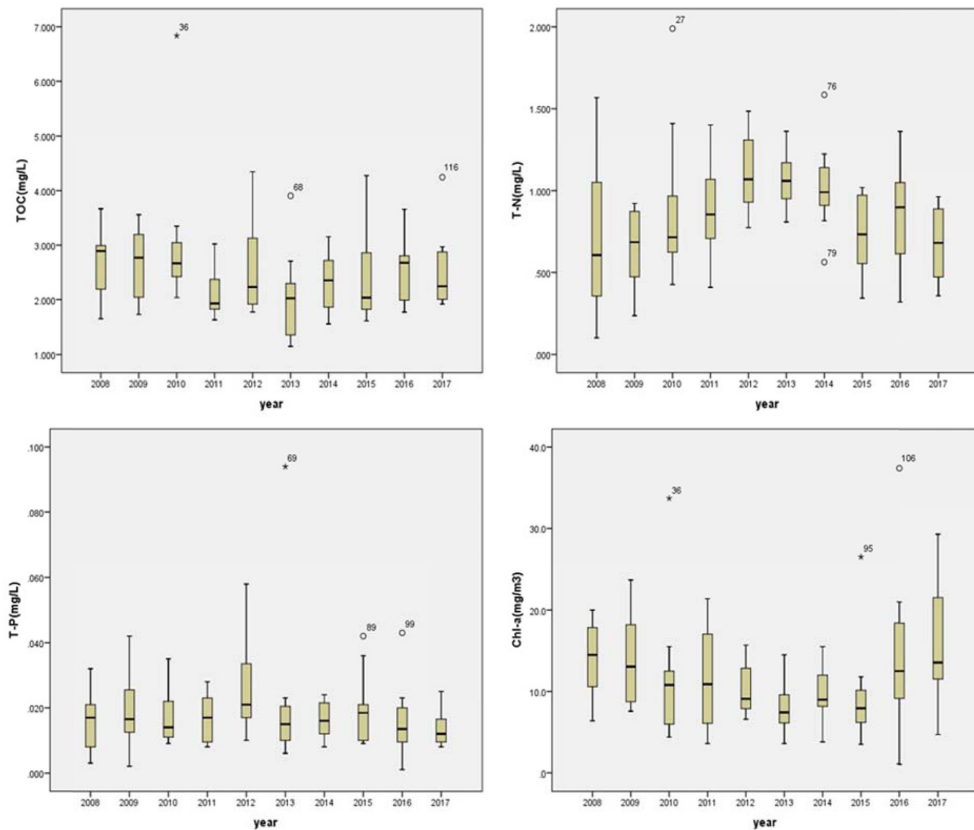


Fig. 3. Box plot showing the major water quality parameters of the Fourth Reservoir.

도 변화는 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($F=11.475, p=0.000$). 계절별 농도 변화는 집중 강우 시 비점오염원의 유입에 따른 TOC 증가 및 상수원의 저수율의 영향에 따라 차이가 있는 것으로 판단된다. DOC 농도는 평균 1.8mg/L로 TOC 농도의 약 70%를 차지하는 것으로 나타나 대부분 DOC 형태로 존재하는 것으로 나타났다. TOC는 일반적으로 DOC와 입자성유기탄소(Particulate Organic Carbon, POC)의 합을 말한다. Thurman¹⁵⁾에 따르면 하천과 호소의 POC는 총유기물의 10~17% 정도이고, 대부분은 DOC 형태로 존재한다고 한다. 하천과 호소에서 TOC는 정수장에서 염소요구량을 증대시키고 전처리제나 소독제로 사용되는 염소와 결합하여 맛냄새를 유발하며 수돗물의 수질을 좌우하는 염소소독부산물(Disinfection Byproducts, DBPs)의 지표로서 활용 가능하다.¹⁶⁾

UV₂₅₄/DOC(Specific Ultraviolet Absorbance, SUVA)는 NOM(Natural Organic Matter)의 방향족 화합물을 나타내는 대표적인 지표이다. SUVA값은 용존유기물의 분광학적 특성과 용존유기탄소 농도를 이용하여 물속에 용해되어 있는 용존유기물 가운데 자외선흡광도를 가지는 유기물이 차지하는 비율을 추정할 수 있어 외부기원 난분해성 유기물의 특성을 알아보는데 유용하다. 즉, UV₂₅₄/DOC 비율이 높으면 전체 용존유기물에 대한 외부기원 용존유기물의 비율이 높다는 것을 의미한다.¹⁷⁾ 제4수원지의 평균 SUVA 값은 2.9 m⁻¹·L/mg로 나타났으며, SUVA 값이 4미만이므로 방향족 화합물의 구성비가 낮고 분자량이 작은 친수성물질로 구성되어 있음을 추정할 수 있다.

제4수원지 SS의 농도범위는 0.7~12.3 mg/L, 평균 3.2 mg/L로 강우에 영향을 받아 편차가 크게 나타난 것으로 판단된다. 반면 계절별 결과는 통계적으로 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다($F=1.277, p=0.842$). T-N의 농도범위는 0.101~1.990 mg/L, 평균 0.857 mg/L로 조사되었으며, T-P는 0.001~0.094 mg/L, 평균 0.018 mg/L로 호소 생활환경기준 I b 등급(중음)으로 조사되었다. 특히, T-P는 변동계수(CV)가 64.7을 나타내어 조사항목 중 가장 높은 값을 나타냈으며, 이는 월별, 계절별로 호소에 유입되는 영양염류의 영향이 가장 크게 미친 것으로 판단된다. 클로로필-a의 농도범위는 1.1~37.4 mg/L, 평균 11.8 mg/L로 나타났으며, 특히 녹조류 개체수가 증가할 때 높은 농도를 보였다.

제4수원지의 최근 10년간 월별 조류 분포 현황을 Fig. 4에 나타내었다. 제4수원지의 발생 조류는 규조류가 약 53%로 가장 높은 비중을 차지하고 있으며, 계절에 상관없이 규조류는 연중 분포하고 있다. 특히, 수온이 낮은 봄과 겨울철에 높은 비중을 차지하고 있다. 일사량이 높고 수온이 높아지는 여름철과 초가을에는 녹조류와 남조류의 개체수가 증가하는 것으로 조사되었다. 제4수원지는 남조류 발생 현황을 살펴보면, *Chroococcus*, *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis* 등 1,000 cells/mL 이하로 발생하였으나, 2011년 5월에 *Oscillatoria*가 19,310 cells/mL까지 개체수가 증가하여 가장 높은 수치를 보였다. 그 후 매년 7월~9월 사이에 *Microcystis*가 주로 발생하였는데 2015년 11월부터 *Oscillatoria*가 주요 종으로 발생하게 되었다. 제4수원지를 원수로 사용하는 각화정수장에서는 최근 5년간 *Oscillatoria* 및 냄새물질

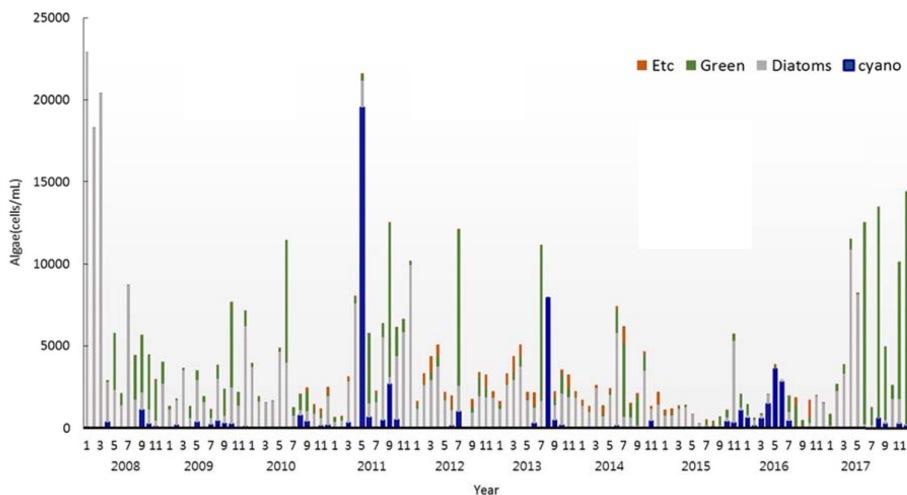


Fig. 4. Seasonal variation of algae occurrence.

인 2-MIB 농도 증가로 인해 약 361일 동안 정수장 운영을 중지하였다. *Oscillatoria*는 대량발생시 심한 이취미를 유발하며, 곰팡이 냄새물질인 지오스민이나 2-MIB를 생산하는 조류경보제 발령 대상 남조류이다. 제4수원지는 2015년부터 남조류의 발생 주종이 변화하는 현상이 나타난 것으로 판단된다.

3.2. 수질항목별 상관성 분석결과

제4수원지의 2008년부터 2017년까지 10년간의 수질 자료를 이용하여 수질항목별 상관분석 결과를 Table 3에 나타내었다. 수온과 용존산소의 상관계수가 -0.716 ($p < 0.01$)로서 높은 음의 상관성을 보였는데, 이는 온도가 높을수록 산소의 용해도가 낮아지는 이론적인 경향을 보인 것으로 나타났다. 유기오염 지표인 TOC는 COD ($r = 0.608$, $p < 0.01$)와 높은 양의 상관성을 보였으며, pH ($r = 0.443$, $p < 0.01$) 및 SS ($r = 0.485$, $p < 0.01$)와는 보통의 양의 상관성을 보였다. 유기물질과 영양염류간의 상관성 분석 결과 항목간의 상관성은 낮은 것으로 나타났으며, 특히 TOC와 T-P는 유의적인 상관관계가 없는 것으로 나타났다. T-N과 클로로필-a의 상관계수는 -0.438

($p < 0.01$)로 보통의 음의 상관성을 나타내었다. 또한 클로로필-a와 SS에 대한 상관계수는 0.439 ($p < 0.05$)로 보통의 양의 상관성을 보였으며, 이는 조류 번식으로 인한 클로로필-a 농도 증가로 SS농도 증가에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

제4수원지의 2008년부터 2017년까지 10년간의 조류 모니터링 자료를 이용하여 조류 관련 항목별 상관분석 결과를 Table 4에 나타내었다. 총인에 대한 총질소의 농도 비율인 N/P ratio는 평균 60, 최대 162, 최소 12로 조사되었으며, N/P ratio와 클로로필-a의 상관계수는 -0.288 ($p < 0.01$)로서 약한 음의 상관성을 보였다. Smith 등¹⁸⁾은 N/P ratio에 따라 남조류의 우점이 결정된다는 선행 연구결과를 보고하였으며, N/P ratio가 29 이상으로 증가할 때 남조류의 개체수가 감소한다는 국내 연구 결과⁷⁾가 있다. 반면, 본 연구에서는 N/P ratio가 50을 기준으로 N/P ratio가 증가할수록 남조류와 규조류의 개체수가 감소하는 경향을 보였다. T-P는 규조류, 남조류 등 조류항목과는 유의적인 상관관계가 없는 것으로 나타났으나, T-N과 녹조류의 상관관계는 상대적으로 유의하게 나타났다.

Table 3. Pearson correlation coefficient of the water quality parameters

	WT	pH	EC	DO	TOC	COD	T-N	T-P	SS	Chl-a
WT	1									
pH	0.515**	1								
EC	-0.291**	0.118	1							
DO	-0.716**	-0.170	0.335**	1						
TOC	0.500**	0.443**	-0.068	-0.398**	1					
COD	0.496**	0.412**	-0.080	-0.308**	0.608**	1				
T-N	-0.035	-0.154	-0.078	0.102	-0.216*	-0.076	1			
T-P	0.298**	0.137	-0.001	-0.129	0.176	0.202*	0.269**	1		
SS	0.107	0.062	0.097	-0.152	0.485**	0.224*	-0.112	0.014	1	
Chl-a	0.020	0.034	-0.016	-0.063	0.309**	0.228*	-0.438**	-0.060	0.439**	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

Table 4. Pearson correlation coefficient between the water quality parameters and algae

	N/P ratio	T-N	T-P	Chl-a	Cyano	Diatoms	Green
N/P ratio	1						
T-N	0.435**	1					
T-P	-0.541**	0.269**	1				
Chl-a	-0.288**	-0.438**	-0.060	1			
Cyano	-0.076	0.090	0.078	0.131	1		
Diatoms	-0.014	0.035	-0.028	0.110	-0.074	1	
Green	-0.166	-0.207*	-0.019	0.052	-0.011	-0.137	1

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

3.3. 주성분 및 요인 분석결과

제4수원지에서 10년간 총 10개의 수질항목을 대상으로 조사된 자료를 이용하여 전체 수질(2008~2017년)과 계절별 수질(봄 3~5월, 여름 6~8월, 가을 9~11월, 겨울 12월~2월), 남조류 발생시기(100 cells/mL)로 구분하여 주성분과 요인분석을 수행하였다. 전체 수질의 주성분 분석 결과는 Table 5에 나타내었으며, 요인분석 결과는 요인과 변량과의 상관관계수에 따른 요인 구조를 명확하게 하여 각 요인의 특성을 알고자 Varimax 직각 회전 방식을 적용하여 Table 6에 나타내었다. 그 결과 4개의 요인으로 추출되었고 지정한 고유치 1이상인 요인만 추출되었으며, 초기고유치(eigenvalue)는 3.192, 1.778, 1.261, 1.060로 나타났다. 고유치는 그 요인이 설명하는 분산의 양을 나타내는 것이므로 이 값이 큰 요인이 상대적으로 중요한 요인이라는 것을 의미한다. 제1요인의 분산은 31.9%로 전체에서 제1요인이 약 32% 설명하고 있으며, 제2요인은 17.8%, 제3요인은 12.6%, 제4요인은 10.6%로서 4개의 요인 누적기여율은 72.9%로 전체 수질특성의 72.9%를 설명해 주고 있는 것으로 나타났다. 제1요인은 pH, 수온, COD, TOC로 분류되었고, 제2요인은 SS, 클로로필-a, 제3요인은 전기전도도와 DO, 제4요인은 T-N과 T-P로 분류되었다. 제1요인의 경우 유기물질과 관련 있는 항목으로 호내 외부 난분해성 유기물의 유입에 의한 영향으로 판단된다. 제2요인과 제3요인의 경우는 조류 발생과 밀접한 관련이 있는 항목으로, 이는 호내 조류발생에 의해 클로로필-a가 증가하고 SS와 DO가 상승하게 된 것으로 판단된다. 제4요인은 질소와 인계열 오염물질의 유입과 관련이 있는 항목으로 나타내었다.

계절별 수질의 주성분 분석 실행 후 요인분석결과를

Table 6. Rotated component matrix using factor analysis

	Component			
	1	2	3	4
pH	0.868	-0.104	0.157	-0.087
WT	0.731	0.003	-0.548	0.128
COD	0.672	0.318	-0.143	0.115
TOC	0.654	0.398	-0.164	0.030
SS	0.087	0.857	0.033	0.084
Chl-a	0.031	0.758	-0.025	-0.356
EC	0.137	0.041	0.854	-0.009
DO	-0.416	-0.099	0.732	0.000
T-N	-0.217	-0.233	-0.029	0.811
T-P	0.279	0.081	-0.011	0.738

Rotation Method : Varimax with Kaiser Normalization

Table 7에 나타내었다. 봄, 여름, 가을은 4개의 주성분이 추출되었으며 봄의 누적기여율은 72.6%, 여름은 73.9%, 가을은 72.9%를 나타냈고, 겨울은 3개의 주성분이 추출되었으며 누적기여율은 74.6%를 나타냈다. 봄과 여름에는 공통적으로 제1요인이 클로로필-a와 DO로 분류되었으며, 이는 조류의 영향이 수질 특성에 가장 중요한 요인이 됨을 보여 주었다. 가을철에는 요인분석 결과가 전체 수질의 결과와 유사한 경향을 보였으며, 겨울철에는 제1요인이 COD, TOC, 클로로필-a, SS로 분류되었다. 이는 겨울철에 제4수원지의 저수율 감소로 인한 수질 악화와 낮은 수온으로 인한 규조류 개체수 증가가 주요 영향으로 설명할 수 있다.

제4수원지에서 남조류가 주로 발생하는 시기의 주요 영향 요인을 분석하기 위해 2008년부터 2017년까지 10년간의 수질자료 중 남조류가 100 cells/mL 이상 발생한 시기의 수질자료를 선별하여 주성분 및 요인분석을

Table 5. Eigen values and the cumulative percentage of factors.

Component	Initial eigenvalues			Rotation sums of squared loadings		
	Total	Variance(%)	Cumulative(%)	Total	Variance(%)	Cumulative(%)
1	3.192	31.925	31.925	2.491	24.914	24.914
2	1.778	17.781	49.705	1.785	17.848	42.761
3	1.261	12.605	62.311	1.640	16.402	59.163
4	1.060	10.600	72.911	1.375	13.748	72.911
5	0.714	7.138	80.049			
6	0.668	6.678	86.727			
7	0.490	4.898	91.624			
8	0.407	4.065	95.690			
9	0.265	2.647	98.337			
10	0.166	1.663	100.000			

Table 7. Rotated component matrix using factor analysis

Component	WT	pH	EC	DO	COD	TOC	Chl-a	SS	T-N	T-P	
Spring	1	-0.596	0.021	0.708	0.771	0.405	-0.204	0.729	0.087	-0.227	0.123
	2	0.385	0.060	0.059	-0.075	0.696	0.775	0.206	0.830	0.176	-0.256
	3	0.527	0.808	0.189	-0.316	0.303	0.283	0.086	-0.337	-0.261	0.398
	4	-0.072	0.002	0.134	-0.117	-0.017	-0.097	-0.325	0.072	0.820	0.715
Summer	1	-0.848	0.037	-0.095	0.779	0.059	-0.048	0.781	0.117	-0.239	-0.025
	2	0.314	0.852	0.070	0.180	0.383	0.788	0.179	0.197	-0.500	0.130
	3	0.097	0.041	0.131	0.152	0.766	0.379	-0.223	-0.152	0.723	0.541
	4	-0.010	0.137	0.826	-0.244	0.135	0.149	0.315	0.855	-0.104	-0.045
Fall	1	0.815	0.746	0.197	0.430	0.346	0.855	-0.101	-0.079	-0.078	0.135
	2	-0.001	-0.084	0.118	0.396	-0.286	-0.087	0.822	0.645	-0.594	0.017
	3	0.189	0.238	-0.752	0.578	0.655	-0.238	0.062	-0.367	0.206	0.078
	4	0.273	-0.258	-0.299	0.256	-0.140	0.099	-0.193	0.183	0.656	0.873
Winter	1	0.444	0.275	0.199	-0.381	0.836	0.936	0.887	0.875	-0.333	0.258
	2	-0.748	0.697	0.753	0.694	0.134	0.074	-0.065	-0.161	-0.238	0.251
	3	-0.176	-0.291	-0.041	0.259	-0.189	-0.014	-0.132	0.276	0.717	0.779

Rotation Method : Varimax with Kaiser Normalization

Table 8. Eigen values and cumulative percentage of factors(Cyanobacteria>100 cells/mL)

Component	Initial eigen values			Rotation sums of squared loadings		
	Total	Variance(%)	Cumulative(%)	Total	Variance(%)	Cumulative(%)
1	2.925	29.249	29.249	2.692	26.917	26.917
2	2.418	24.178	53.427	2.372	23.725	50.642
3	1.377	13.770	67.197	1.656	16.556	67.197
4	0.980	9.803	77.000			
5	0.689	6.891	83.891			
6	0.613	6.129	90.020			
7	0.472	4.718	94.737			
8	0.233	2.331	97.069			
9	0.162	1.621	98.689			
10	0.166	1.663	100.000			

실시하였으며 Table 8과 9에 나타내었다. 그 결과 총 3개의 주성분이 추출되었으며, 고유치는 각각 2.925, 2.418, 1.377로 나타났다. 제1요인의 분산은 29.2%, 제2요인은 24.2%, 제3요인은 13.8%로 3개의 요인이 전체 분산의 67.2%를 설명해 주고 있다. 제1요인은 SS, TOC, COD, 클로로필-a로 분류되었으며, 제2요인은 수온, DO, 전기전도도, pH, 제3요인은 T-N과 T-P로 분류되었다. 연구대상 호소에서 남조류 발생 시기에 수질에 미치는 영향이 약 30%를 차지하는 제1요인의 경우 비점오염원에 의한 유기물질의 유입과 밀접한 영향이 있음을 보였으며, 제2요인의 경우는 기후의 영향에 의한 것으로 설명할 수 있다. 그리고 제3요인의 경우 영양염류의 유입과 관련이 있음을 보였으며 전반적으로 겨울철 수질의 요인분석 결과와 유사한 경향을 보였다.

Table 9. Rotated component matrix using factor analysis (Cyanobacteria > 100 cells/ml)

	Component		
	1	2	3
SS	0.881	-0.123	-0.176
TOC	0.856	0.252	-0.049
Chl-a	0.718	-0.255	-0.319
COD	0.674	0.396	0.314
WT	0.024	0.890	0.290
DO	0.102	-0.681	0.225
EC	0.032	-0.661	0.076
pH	0.283	0.609	0.064
T-N	-0.346	-0.020	0.811
T-P	0.030	-0.034	0.788

*Rotation Method : Varimax with Kaiser Normalization

4. 결 론

본 연구에서는 제4수원지를 대상으로 최근 10년간 호소의 수질변화 추이와 수질특성을 분석하기 위해서 다변량 통계분석을 적용하여 수질 항목간 상관분석과 주성분 및 요인분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다. 수질항목간의 상관성 분석 결과 유기물 간접지표인 COD와 TOC의 상관계수가 0.608로 높은 양의 상관성을 보였으며, 수온은 pH와 0.515로 양의 상관성을 DO와는 -0.716으로 높은 음의 상관성을 보였다. 조류 항목간의 상관성 분석결과에서는 N/P ratio와 Chl-a는 -0.454로 음의 상관성을 보였으나, 조류 종별 상관성은 미미한 것으로 나타났다. 주성분 및 요인분석 결과에서는 전체 수질을 대상으로 4개의 주성분이 추출되었으며, 전체 분산의 72.9% 기여하였고, 제1요인은 COD, TOC, pH, 수온으로 주로 유기물과 관련된 항목으로 전체 수질의 약 32%를 설명해 주는 것으로 나타났다. 계절별 수질의 분석결과에서는 봄과 여름에는 공통적으로 제1요인이 클로로필-a와 DO로 분류되었으며, 겨울철에는 COD, TOC, 클로로필-a, SS로 분류되었고 가을철은 전체 수질의 결과와 유사한 경향을 보였다. 가을철을 제외한 계절에 조류 발생으로 인한 수질에 미치는 영향이 크며, 이는 유기물질의 유입이 주요 원인으로 판단된다. 남조류 발생시기를 대상으로 분석한 경우에는 3개의 주성분이 추출되었으며, 전체 분산의 67.2% 기여하였으며 전반적으로 겨울철 수질의 요인분석 결과와 유사한 경향을 보였다. 제4수원지의 수질은 강우기 등 계절적 영향에 의한 유기물 유입이 가장 큰 영향을 미치고 호내 조류 증식과 영양염류 유입에 의한 영향을 받고 있는 것으로 나타났다. 따라서 제4수원지의 수질을 효과적으로 관리하기 위해서는 유역 내 외부 오염원에 대한 유입 차단이 선행되어 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 강원대학교, “한국의 호수 환경생태”, 2013.
2. I. D. Jones, T. Page, J. A. Elliott, S. J. Thackeray, and A. L. Heathwaite, “Increases in lake phytoplankton biomass caused by future climate-driven changes to seasonal river flow”, *Global Change Biology*, **2011**, 17, 1809-1820.

3. 최길용, 임태효, 이재운, 천세억, “통계분석을 이용한 낙동강유역의 수질변화 특성 조사”, *한국수자원학회*, **2012**, 45(11), 1157-1168.
4. 최선화, 김해도, 김동환, “다변량 통계분석을 이용한 인공호수의 수질 특성 평가”, *한국관계배수논문집*, **2014**, 21(2), 87-100.
5. 박지형, 손수민, 류덕희, “경험식과 요인분석을 통한 오염물질 유출 특성 연구-남한강 상·하류 수계 주요 하천을 중심으로”, *한국물환경학회*, **2011**, 27(6), 905-913.
6. 박진환, 문명진, 이형진, 김갑순, “다변량 분석법을 이용한 섬진강 수계의 수질 특성 연구”, *한국물환경학회*, **2014**, 30(2), 119-127.
7. 광보라, 김일규, “통계분석을 이용한 낙동강 창녕함안보 구간의 수질특성 연구”, *한국물환경학회*, **2016**, 38(2), 71-78.
8. 송은숙, 전송미, 이어진, 박도진, 신용식, “통계적 경향 분석을 통한 영산강의 클로로필 a와 수질 변동 해석”, *한국하천호수학회*, **2012**, 45(3), 302-313.
9. 정수정, 이동진, 황경섭, 이경희, 최경숙, 임상순, 이윤희, 이재영, 임병진, “영산강 수계 오염특성 파악을 위한 다변량 통계분석법의 적용”, *한국하천호수학회*, **2012**, 45(4), 368-377.
10. B. Karim and F. M. Taha, “Using principal component analysis to monitor spatial and temporal changes in water quality”, *Journal of Hazardous Materials*, **2003**, 100(1-3), 179-195.
11. C. A. Shah, Z. A. Ahmad, K. Y. Mohd, F. R. Mohammad, and J. Hafizan, “Classification of river water quality using multivariate analysis”, *Procedia Environmental Sciences*, **2015**, 30, 79-84.
12. B. Ahmed, E. B. Mohamed, R. Jamila, A. Brahim, and S. Mohamed, “Assessment of spatial and seasonal water quality variation of Oum Er Rbia River(Morocco) using multivariate statistical techniques”, *International Soil and Water conservation Research*, **2016**, 4, 284-292.
13. 광주광역시상수도사업본부, “2018 상수도 현황”, **2018**.
14. 환경부, “수질오염공정시험기준”, **2018**.
15. E. M. Thurman, “Organic geochemistry of natural water, Kluwer Academic Publisher”, **1985**.
16. 김재구, 신명선, 장창원, 정성민, 김범철, “한강수계 주요하천과 호수내 TOC와 DOC분포 및BOD와 COD의 산화를 비교”, *한국물환경학회*, **2007**, 23(1), 72-80.
17. 한강수질검사소, “한강수계 용존유기물 특성에 관한 연구”, **2000**.
18. Y. H. Smith, “Predictive models for the biomass of blue green algae in lakes”, *Journal of the American Water Resources Association*, **1985**, 21(3), 433-439.