

낙동강 주요 지류의 오염특성 분석을 위한 다변량 통계기법의 적용

박재범·갈병석[†]·김성민^{*}

(주)다온솔루션

*국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Application of Multivariate Statistical Techniques to Analyze the Pollution Characteristics of Major Tributaries of the Nakdong River

Jaebeom Park·Byungseok Kal[†]·Seongmin Kim^{*}

Daon Solution co., Ltd.

^{*}Nakdong River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research

(Received : 24 June 2019, Revised: 10 July 2019, Accepted: 10 July 2019)

요약

본 연구에서는 낙동강 주요 지류를 대상으로 상관분석, 주성분 및 요인분석, 군집분석과 같은 통계분석을 통해 수질 특성을 분석하였다. 유기물질과 영양물질은 높은 상관관계를 가지고 있으며 봄철 및 가을철에 높게 나와 해당 계절에 대한 집중적인 수질 관리가 필요한 것으로 나타났다. 주성분 및 요인분석 결과 전체 분산의 82%를 유기물질, 영양물질, 자연, 기상 등 4개의 주성분으로 설명할 수 있으며 BOD, COD, TOC, TP 항목이 주요 영향요인으로 분석되었다. 군집분석 결과 계절별 유기물, 영양물질의 오염도를 고려하여 4개의 군집으로 분류하였으며 금호강 유역은 사계절 높은 오염특성을 나타내고 있었다. 따라서 지류 하천의 효과적인 수질 관리를 위해서는 시공간적 특성을 고려한 대책이 필요하며 다변량 통계기법은 수질 관리 및 정책 수립에서 유용하게 활용 가능할 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 지류, 상관분석, 주성분분석, 군집분석

Abstract

In this study, we analyzed the water quality characteristics of major tributaries of Nakdong River through statistical analysis such as correlation analysis, principal component and factor analysis, and cluster analysis. Organic matter and nutrients are highly correlated, and are high in spring and autumn, and seasonal water quality management is required. Principal component and factor analysis showed that 82% of total variance could be explained by 4 principal components such as organic matter, nutrients, nature, and weather. BOD, COD, TOC, and TP items were analyzed as major influencing factors. As a result of the cluster analysis, the four clusters were classified according to seasonal organic matter and nutrient pollution. Kumho River watershed showed high pollution characteristics in all seasons. Therefore, effective management of water quality in tributary streams requires measures in consideration of spatio-temporal characteristics and multivariate statistical techniques may be useful in water quality management and policy formulation.

Key words : Tributary, Correlation Analysis, Principal Component Analysis, Cluster Analysis

1. 서론

유역 내 인간 활동, 농약사용, 토지이용변화 등으로 인해 점 및 비점 형태의 각종 오염원이 지류로 유입되고 있으며 이로 인해 하천의 수질이 오염되고 있다. 최근 대규모 환경변화와 기후변화로 인해 하천으로 유입되는 오염물의 형태와 유형은 더욱 다양화되고 있으며 하천환경과 수중 생태계에 대한 오염을 가속화 하고 있다. 이러한 다양한 하천 수질 상태의 악화

및 개선 등에 관한 판단과 하천 내 오염현황을 진단하고 제어하여 효과적으로 하천의 수질 관리를 수행하기 위해서는 수질 모니터링 사업을 통한 자료의 축적이 중요하다. 그러나 조사대상 하천의 장기적이고 체계적인 조사를 통해 대규모의 수질 자료를 확보하더라도 수질에 영향을 미치는 다양한 변수를 도출하고 분석하여 수질변동의 특성에 대한 신뢰할 수 있는 해석과 예측을 수행하지 않는다면 수계의 효율적이고 체계적인 수질 관리에 어려움이 발생한다.

다변량 통계기법을 적용한 수질변동에 관한 연구가 국내외적으로 수행되고 있다. 국내 적용 사례로는 영산강, 한강 및 금강을 대상으로 지역과 계절에 따른 수질 특성 차이를 다변량 통계기법을 이용하여 평가한 연구가 있었다(Kim et al.,

[†] To whom correspondence should be addressed.
Daon Solution co., Ltd.
E-mail: kalbs9801@gmail.com

2007; Kim and Lee, 2011; Jung et al., 2012; Lee et al., 2017). 다목적 저수지와 농업용 호소에서 수질 특성과 조류 발생 영향 인자분석을 위해 주성분 분석과 군집 분석 등의 다변량 통계기법을 적용한 연구가 있었다(Yeon et al., 2011; Choi et al., 2015). 또한, 하천생활환경기준의 BOD, TP의 2가지 항목으로 수질을 평가하지 않고 수질지수를 이용하여 종합적으로 평가하고 경향성을 파악하기 위한 연구가 낙동강 지류를 대상으로 적용한 사례가 있었다(Kal et al., 2017; Kim et al., 2018; Park et al., 2018). 국외적용 사례로는 New Jersey Passic River에서의 주성분 분석을 이용한 시공간 변화분석과 Gomti River에서의 수질 변화를 평가한 선행연구가 있었다(Bengraine et al., 2003; Singh et al., 2004). 또한, Liun et al(2003)은 대만 지역의 28개 지하수 관측망 지점을 대상으로 요인분석을 수행하고 요인별 변수의 기여율을 요인부하량의 크기에 따라 강(>0.75), 중(0.75~0.5) 및 약(0.5~0.3)으로 나누어 요인부하의 요인을 해석하였다.

본 연구에서는 낙동강 유역의 중점관리 34개 지류 수질 측정망 자료를 대상으로 지점별 수질 특성을 파악하기 위해 다변량 통계기법을 적용하였다. 수질 인자 사이의 상관관계를 분석하였으며, 주성분 및 요인분석을 이용하여 수질에 영향을 미치는 주요 요인을 분석하였다. 군집분석을 수행하여 시공간적인 수질 유사성에 따른 그룹별 및 계절별 특성을 파악하였다. 이를 통하여 다변량 통계기법을 이용한 지류의 수질해석을 위한 방법론을 제시하였으며 낙동강 유역의 34개 중점관리 지점에 대한 시공간적 수질 특성을 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 대상자료

낙동강물환경연구소에서 모니터링을 수행하고 있는 195개 지류 중 오염도가 높은 중점관리 34개 지류 지점을 대상으로 8년간(2011~2018년) 조사한 유량 및 수질 자료를 이용하여 시공간적 수질 특성을 분석하였다. 수온(Temp), 수소이온농도(pH), 전기전도도(EC), 용존산소(DO) 및 유량(Flow)은 현장 측정하였으며 생물화학적산소요구량(BOD), 화학적산소요구량(COD), 부유물질(SS), 총질소(TN), 총인(TP), 총유기탄소(TOC), 클로로필a(Chl-a) 등 7개 항목은 측정지점에서 시료를 채수하여 실험실에서 분석하였다. 낙동강 유역의 지류 모니터링을 수행하고 있는 지점 현황은 Fig. 1과 같다.

2.2 분석 방법

2.2.1 주성분 및 요인분석

주성분 분석은 다변량 변수들 사이의 상관관계를 이용하여 변수들의 선형결합으로 표시되는 새로운 변수인 주성분(Principal component)을 찾는 다변량 통계분석기법이다. 고유치(Eigenvalue)는 주성분이 설명할 수 있는 분산의 크기를 나타내며 고유치가 1보다 크면 하나의 주성분이 변수 1개 이상을 설명할 수 있다는 의미가 있다. 따라서 고유치가 1 이상인

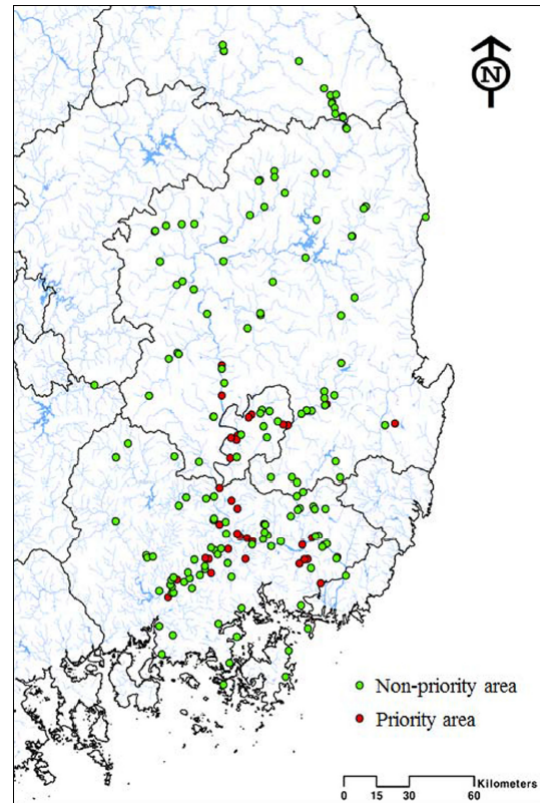


Fig. 1. The study area and location of monitoring sites in Nakdong river

것을 기준으로 주성분을 추출한다. 주성분 분석은 자체가 목적이라기보다는 2차원 이상의 고차원 데이터의 차원을 축소하여 다른 통계분석을 수행하기 위한 사전분석으로 적용한다.

요인분석은 변수들 사이의 상호 연관성을 분석하여 공통으로 포함된 내재요인(Common factor)을 추출하고 차원을 축소하는 기법으로 상관관계가 높은 변수들이 가지고 있는 공통성을 중심으로 하나의 동질적인 요인으로 묶어주는 통계분석 방법이다. 요인분석을 실행하기 전 자료에 타당성을 알아보기 위해 표본적합도 검증(KMO test, Kaiser Meyer Okkin)과 단위행렬 검증(Bartlett test)을 실행한다. KMO Test는 자료에 대한 변수의 값이 타당성을 나타내는 척도로 1에 가까운 값일수록 요인분석의 타당성이 높고 0.5 이하일 경우에는 타당성이 낮다. Bartlett test는 변수 사이의 상관행렬이 단위행렬인지 아닌지 검정하는 것을 말한다. 변수 사이의 상관성이 높을수록 유의적 관계라 하며 0에 가까운 값일수록 유의성이 높다(Cho et al., 2017).

요인패턴의 구조를 단순화하여 요인에 대한 해석을 쉽게 하기 위해 요인 축을 회전하며, 요인 축을 회전하는 방법에는 크게 직교(Orthogonal) 회전과 사각(Oblique) 회전이 있다. 사각 회전은 회전 후 요인들 사이의 상관성을 허용하는 회전이므로 요인들의 의미 파악 및 해석이 쉬운 직교 회전을 일반적으로 적용한다. 직교 회전 방식으로는 Varimax, Quartimax, Equimax, Parsimax과 Orthomax이 있으며 본 연구에서는 분산의 합계를 최대한 높게 하여 변수의 수를 줄

여주어 결과해석을 단순하게 하는 Varimax 회전법을 적용하여 분석하였다.

2.2.2 군집분석

수질 조사지점 사이의 시공간적 요인변화에 따른 유사성 및 상이성을 파악하기 위하여 군집분석(Cluster analysis)을 수행한다. 군집분석은 모집단에 대한 사전정보 없이 관측값들 사이의 거리나 유사성을 이용하여 자료 전체를 몇 개의 군집(Cluster)으로 나누는 다변량 분석법으로 군집을 나누는 방법에 따라 계층적 방법과 비계층적 방법으로 구분할 수 있다. 이 중 계층적 군집분석은 기준이 되는 대상들로부터 시작하여 개별대상 간의 거리를 기준으로 나무 모양의 계층구조(Dendrogram)를 상향식으로 형성해 가는 방법이다. 본 연구에서는 군집 대상 사이의 거리 측정은 모든 변수의 차이를 제곱하여 합산해서 결정하는 유클리디안 제곱거리(Squared euclidean distance) 방법을 적용하였고 군집

결합방법은 집단 사이의 평균결합을 나타내는 Between-groups link age를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수질 자료의 지역적 및 계절별 특성

낙동강 유역 내 34개 지류 지점의 11개 수질에 대한 8년 평균값을 계산하여 지역적 수질 변동특성을 분석하였으며 그 결과는 Table 1과 같다. 유기물 지표인 BOD, COD, TOC의 경우 1.9~5.6mg/L, 4.8~15.6mg/L, 2.8~11.7mg/L로 오염원 분포와 기후적 영향에 따라 지역적인 변동성을 나타내고 있다. 관곡천 BOD 4.9mg/L, COD 11.7mg/L, TOC 8.8mg/L, 용하천 BOD 5.6mg/L, COD 11.8mg/L, TOC 9.2mg/L, 퇴래천 BOD 4.6mg/L, COD 9.5 mg/L, TOC

Table 1. Analysis of regional water quality characteristics

Site	Flow (m ³ /s)	Temp (°C)	EC (μS/cm)	DO (mg/L)	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	SS (mg/L)	TOC (mg/L)	Chl-a (mg/L)
Gajoa	0.84	17.7	396	10.1	7.8	3.9	6.8	3.942	0.240	12.8	4.7	14.9
Kyunggho	1.10	17.6	599	10.1	7.5	2.0	8.4	5.609	0.156	10.9	5.7	12.8
Gyesung	0.55	18.7	348	8.0	7.5	2.1	7.7	2.126	0.156	8.6	5.1	14.2
Gwangok	0.01	19.4	420	9.3	7.8	4.9	11.7	3.334	0.179	15.9	8.8	47.1
Gumi	1.75	19.4	433	9.1	7.4	4.4	8.8	4.703	0.151	18.3	6.0	15.0
Kisegok	0.18	17.3	1011	7.8	7.6	4.2	8.2	5.723	0.415	10.3	5.8	9.3
Nam	2.67	19.0	628	9.4	7.5	3.8	8.1	8.855	0.100	7.9	5.3	7.9
Dalseo	3.62	21.7	1805	9.9	7.5	2.6	8.9	7.781	0.183	8.6	7.0	6.2
Daesa	0.96	17.7	303	8.9	7.4	2.8	8.2	1.965	0.130	24.9	5.5	22.3
Daesan2	0.50	17.5	294	8.0	7.3	2.5	7.6	1.930	0.133	19.2	5.0	21.7
Dongjung	0.91	16.5	386	10.3	7.8	2.1	7.5	3.265	0.186	12.6	5.2	11.1
Migeon2	0.14	18.7	289	8.4	7.5	2.6	7.2	1.133	0.079	17.0	4.4	17.5
Bonri	0.16	16.5	435	9.6	7.5	3.2	6.5	3.303	0.208	14.9	4.3	10.2
Bukan	1.22	18.2	475	11.7	8.2	1.9	7.6	2.673	0.097	8.7	5.1	8.9
Sangnam	1.11	19.9	546	9.5	7.7	3.1	8.2	2.169	0.142	18.3	5.2	29.1
Seokyo1	1.69	18.5	366	9.2	7.6	2.1	6.5	2.204	0.133	25.2	4.3	11.2
Seokyo2	1.39	18.2	303	9.5	7.7	2.1	5.8	1.855	0.100	17.6	3.6	7.1
Youngsan	0.38	18.6	323	10.8	8.0	3.4	8.1	2.908	0.141	15.8	5.0	40.3
Omok	3.14	18.3	506	10.6	7.9	2.2	7.1	3.446	0.118	7.7	4.8	12.8
Oho	0.07	17.9	400	10.0	7.7	2.3	7.3	4.945	0.149	24.3	5.0	14.6
Yongdeok	0.18	17.2	458	9.6	7.5	2.9	6.5	4.365	0.176	17.1	4.4	14.2
Yongha	0.26	19.5	1063	7.9	7.5	5.6	11.8	6.951	0.312	9.1	9.2	7.5
Yongho	0.24	17.5	539	9.6	7.8	3.7	8.8	3.372	0.146	17.6	6.1	29.3
Euiryung1	2.33	17.9	416	9.8	7.5	2.1	6.7	3.052	0.100	16.2	4.4	11.6
Changyeong1	0.33	19.4	425	10.5	8.1	3.3	7.2	5.192	0.206	14.5	4.6	22.1
Chennae	0.19	16.0	450	9.0	7.4	2.3	5.3	2.901	0.128	13.7	3.6	16.3
Chodong	0.28	18.3	302	10.0	7.9	2.7	8.5	2.734	0.165	16.4	5.7	21.0
Chilwon	0.30	18.8	430	10.9	8.1	1.9	4.8	2.938	0.174	6.7	2.8	9.2
Topyeong	1.38	17.5	450	9.5	7.8	2.8	7.9	5.039	0.170	21.3	5.3	26.5
Toirae	0.10	17.6	444	7.6	7.4	4.6	9.5	3.088	0.178	28.7	6.5	28.0
Palgeo	1.43	17.7	409	12.0	8.4	2.7	6.7	2.286	0.093	12.2	4.5	12.9
Hyunji	0.18	19.0	399	11.2	8.3	2.8	7.4	7.533	0.217	19.2	4.9	15.2
Hogye	0.05	17.7	779	8.3	7.5	5.3	15.6	1.865	0.473	24.3	11.7	43.6
Hwapo	1.00	18.3	461	8.4	7.4	3.7	7.7	2.982	0.187	27.4	5.2	13.6

Table 2. Analysis of seasonal water quality characteristics

SEASON	TYPE	Flow (m ³ /s)	Temp (°C)	EC (μ S/cm)	DO (mg/L)	pH	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	SS (mg/L)	TOC (mg/L)	Chl-a (mg/m ³)
SPRING	MEAN	0.66	16.4	511	10.4	7.8	3.9	8.3	4.291	0.171	18.3	5.6	20.5
	MEDIAN	0.24	16.3	413	10.4	7.7	3.3	7.8	3.505	0.124	13.0	5.1	14.0
	SD	1.35	5.2	412	2.4	0.6	2.2	3.1	3.028	0.171	19.8	2.6	20.9
	MAX	19.18	28.8	3777	16.9	10.1	15.6	30.4	22.334	1.629	201.0	25.2	202.6
	MIN	0.00	4.3	73	3.9	6.9	0.8	0.7	0.385	0.022	0.2	1.6	1.0
SUMMER	MEAN	1.41	26.2	464	7.8	7.6	3.0	8.7	3.035	0.201	20.1	6.0	18.8
	MEDIAN	0.26	26.0	383	7.6	7.5	2.4	8.0	2.364	0.161	12.5	5.6	11.2
	SD	4.92	3.1	333	2.0	0.5	1.9	3.2	2.089	0.144	28.8	2.6	23.5
	MAX	62.78	35.3	2953	15.5	9.5	16.4	26.7	12.805	1.257	340.0	20.2	252.2
	MIN	0.00	19.0	75	3.2	5.9	0.4	2.9	0.146	0.027	1.6	0.8	0.6
FALL	MEAN	0.89	18.7	519	9.0	7.6	2.3	7.0	3.583	0.163	12.8	4.7	13.5
	MEDIAN	0.25	19.0	418	8.7	7.5	1.7	6.4	2.911	0.120	7.8	4.0	6.5
	SD	2.57	4.8	523	2.4	0.4	1.9	3.1	2.435	0.182	16.8	2.6	20.1
	MAX	35.79	28.9	7090	17.6	9.3	19.9	44.2	13.879	2.022	174.0	29.4	193.9
	MIN	0.00	6.2	79	3.9	6.1	0.3	2.9	0.280	0.017	0.4	0.9	0.3
WINTER	MEAN	0.39	6.6	618	11.9	7.7	3.5	7.6	5.051	0.167	10.8	5.1	16.6
	MEDIAN	0.14	6.2	511	12.1	7.6	2.8	6.9	3.858	0.112	7.9	4.4	9.5
	SD	0.69	2.9	385	2.4	0.5	2.3	3.4	3.530	0.211	12.2	2.9	22.1
	MAX	5.71	21.2	3453	18.7	11.9	14.2	26.3	25.322	2.649	127.5	22.1	255.9
	MIN	0.00	-0.1	155	3.4	5.3	0.3	2.7	0.359	0.012	0.3	1.3	0.1

6.5mg/L, 호계천 BOD 5.3mg/L, COD 15.6mg/L, TOC 11.7mg/L의 4개 하천은 높은 유기물농도를 나타내고 있다. 영양염류 지표인 TN, TP의 경우 1.133~8.855mg/L, 0.079~0.473mg/L로 토양특성과 오염원 분포에 따른 지역적인 변동성을 나타내고 있다. 대부분의 지천에서 TN과 TP는 동일 경향을 나타내고 있으며 기세곡천 TN 5.723mg/L, TP 0.415mg/L, 용하천 TN 6.951mg/L, TP 0.312mg/L의 2개 하천은 높은 영양물질 농도를 나타내고 있다. 남천과 현지천의 경우 TN 8.855mg/L, 7.533mg/L로 TP에 비해 큰 값을, 호계천의 경우 TP 0.473mg/L로 TN에 비해 높은 TP 농도를 나타내고 있다. 기세곡천, 호계천, 용하천 등은 유지유량이 적고 오염도 높은 하천으로 영양물질 저감을 위한 중점관리 하천으로 관심이 필요한 것으로 분석되었다. 북안천, 오목천, 남천, 팔거천, 달서천 등의 금호강 지역은 대구염색공단과 북부하수처리장의 방류수, 중소축사의 폐수, 소규모 공장 지역의 오·폐수 유입으로 오염도가 높은 것으로 분석되었다. 낙동강 지류의 경우 대부분 지점이 BOD보다 COD의 농도가 높았으며 산림들에 의한 비점오염원의 영향을 받는 지역으로 분석되었다.

계절적 수질 변동특성을 분석하기 위해 11개 수질 항목에 대하여 봄(3월~5월), 여름(6월~8월), 가을(9월~11월), 겨울(12월~2월)의 기간으로 구분하여 계절적 변동특성을 분석하였으며 그 결과는 Table 2와 같다. 유기물질인 BOD, COD, TOC 농도는 봄철 및 가을철이 여름철, 겨울철에 비해 높게 분석되었다. 봄철의 경우 인구밀도가 높은 도심지역에서 하수처리장의 방류수가 일정하게 하천으로 유입되어 높은 기여율을 나타내고 있으며 여름철의 경우 토지계 중 대지와 농지에서 유입되는 비점오염원의 영향 때문으로 분석되었다. 영양물질인 TN과 TP의 평균, 최대, 최소 등의 농도는 여름철이나 가

을철보다 봄철과 겨울철에 높게 분석되었다. 농경 활동과 산림 표면에 축적된 영양염류 물질이 포함된 부유물질이 강우 시 지류로 유입되어 저수기 및 갈수기 수질에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 여름철의 경우 강우로 인한 유량 증가로 SS의 평균, 최대, 최소 등의 농도가 높게 나타났으며 일부 하천의 경우 유기물 및 영양염류 농도가 유량에 의해 다소 희석되는 것으로 분석되었다. Chl-a 농도는 봄철 20.5mg/m³, 여름철 18.8mg/m³, 가을철 13.5mg/m³, 겨울철 16.6mg/m³로 봄철과 여름철이 조류의 생장에 적정 수온으로 인해 큰 값을 나타내고 있다. Chl-a 농도는 계절별 조류의 우점종의 차이뿐만 아니라 수질, 수리 및 기상 인자 등 인자들의 복합적인 영향으로 차이를 나타내고 있다.

3.2 수질 자료의 상관특성

수질변수 사이의 상관성 분석을 수행하였으며 그 결과는 Table 3 및 Fig 2와 같다. 유량과 수질변수 사이의 상관관계는 전체적으로 음의 상관관계를 보이며 낮은 상관성을 나타내고 있다. 수온은 TP 및 SS와 음의 상관관계를 보이고 다른 항목들과는 양의 상관성을 나타내고 있다. pH는 DO와 높은 양의 상관관계(0.85)를 나타냈지만 다른 항목과는 음의 상관관계를 나타내고 있다. EC는 DO, pH, SS와 음의 상관관계를 보이고 다른 항목들과 양의 상관성을 나타내고 있다. 일반적으로 수온, pH, EC는 물리학적, 화학적 및 생화학적 환경에 영향을 주는 수질변수로 유기물, 영양염류 관련 수질변수의 직접적 및 간접적 영향요인으로 판단할 수 있다. 유기물질인 BOD는 COD(0.751), TP(0.635), TOC(0.748)와 높은 상관관계를 COD는 TP(0.619), TOC(0.988)와 높은 상관관계를 TOC는 TP(0.646)와 높은 상관관계를 나타내고 있어 영양염류는 유기물

Table 3. Correlation coefficient matrix of water quality data

Variable	FLOW	Temp	EC	DO	pH	BOD	COD	TN	TP	SS	TOC	Chl-a
FLOW	1.000											
Temp	0.396**	1.000										
EC	0.376**	0.479*	1.000									
DO	0.237	0.079	-0.152	1.000								
pH	-0.063	0.108	-0.215	0.850*	1.000							
BOD	-0.292	0.162	0.290	-0.461*	-0.221	1.000						
COD	-0.159	0.233	0.376**	-0.383*	-0.233	0.751*	1.000					
TN	0.284	0.362**	0.581*	0.092	0.023	0.238	0.109	1.000				
TP	-0.362**	-0.052	0.444**	-0.359**	-0.122	0.635*	0.619*	0.223	1.000			
SS	-0.290	-0.189	-0.334	-0.352**	-0.289	0.204	0.205*	-0.331	0.050	1.000		
TOC	-0.125	0.245	0.469**	-0.376	-0.242	0.748*	0.988*	0.168	0.646*	0.147**	1.000	
Chl-a	-0.410*	0.004	-0.209	-0.142	0.048	0.453**	0.581**	-0.321	0.208	0.431	0.502*	1.000

*Correlation is significant at the 0.05 level(2-tailed)
 **Correlation is significant at the 0.01 level(2-tailed)

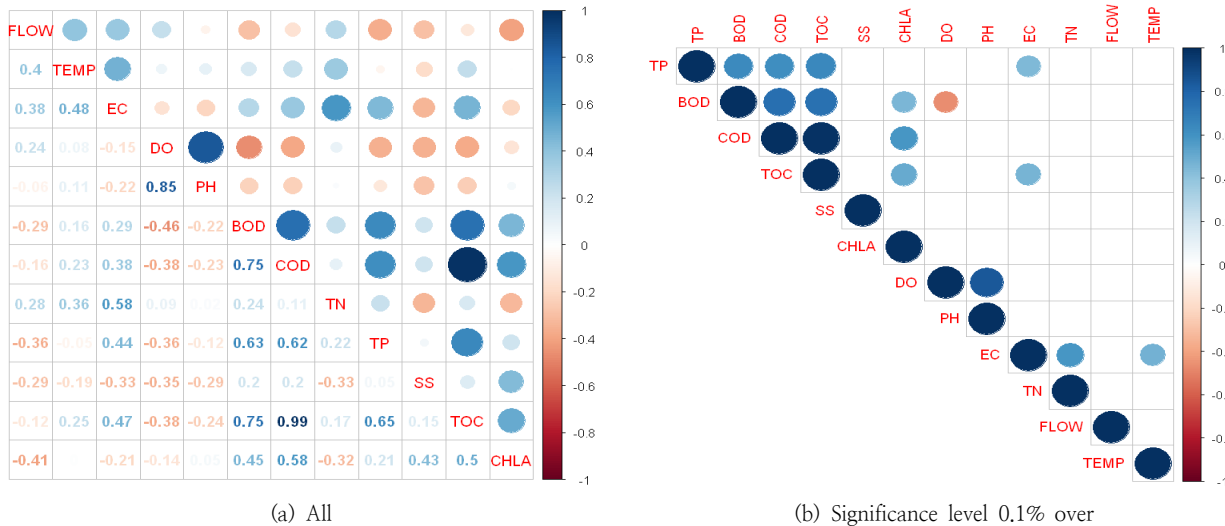


Fig. 2. Correlation matrix plot using water quality correlogram

질과 함께 유입된 것으로 분석되었다. Chl-a는 BOD(0.453), COD(0.581), TOC(0.502)와 상대적으로 높은 상관성을 나타내며 외부기원 유기물로 인한 영향을 받으며 처리되지 않은 하수와 산림이나 농경지의 부식질이 많이 유입되었을 때의 수질 특성을 나타내고 있다. 모니터링 간격과 시기에 따라 다소 차이가 있지만, 기존 낙동강 지류에 대한 수질 사이의 상관특성과 유사한 결과를 나타내고 있다(Na et al., 2016). 낙동강 지류의 경우 비료와 축산오수, 생활오수를 통해 유입되는 유기물질 및 영양염류 유입이 수질에 미치는 영향이 큰 것으로 분석되었다.

3.3 수질변수 주성분 및 요인분석

수질오염 물질 사이의 오염원 배출원인 관계를 파악하기 위해 34개 조사지점의 11개 수질 항목에 대한 주성분 분석을 수행하였다. 주성분 분석을 수행하기 전에 자료에 타당성을 검토를 위해 표본적합도(Kaiser Meyer Olkin, KMO test)와 단위

행렬 검증(Bartlett test)을 실행하였다. KMO test는 자료에 대한 변수의 타당성을 나타내는 척도로 1에 가까운 값일수록 타당성이 높고 0.5 이하일 경우에는 타당성이 낮은 것으로 평가하며 본 연구는 0.61로 산정되었다. Bartlett test는 변수 사이의 상관행렬이 단위행렬인지 아닌지를 검증한다. 변수 사이의 상관행렬이 높을수록 관계가 유의하며 0에 가까운 값일수록 유의성이 낮은 것으로 해석하며 귀무가설을 지각할 수 있는 0으로 산정되었다.

주성분 분석에 따른 11개 수질 항목의 고유치와 주성분 요소별 분산을 산정하였으며 그 결과는 Table 4와 같다. 고유치가 1 이상이고 누적분산비율 80% 이상을 나타내는 주성분을 오염변동 특성을 설명하기 위한 대상 요인으로 선정하였다. 낙동강 지류의 경우 4개의 수질변동 요인이 추출되었으며 요인1은 35%, 요인2는 22%, 요인3은 13%, 요인4는 9%의 기여율을 나타내고 있다. 4개의 요인은 전체 수질변동 특성의 82%를 설명할 수 있는 것으로 분석되었다.

Table 4. Initial eigenvalue and variance for principal component

Component	eigenvalue	% of Variance	Cumulative %
PC1	4.247	35.392	35.392
PC2	2.742	22.849	58.241
PC3	1.667	13.889	72.129
PC4	1.130	9.415	81.544
PC5	0.612	5.104	86.648
PC6	0.505	4.208	90.856
PC7	0.404	3.370	94.226
PC8	0.271	2.258	96.484
PC9	0.212	1.766	98.250
PC10	0.145	1.206	99.456
PC11	0.061	0.506	99.962
PC12	0.005	0.038	100.000

Table 5. Rotated factor matrix extracted from principal component analysis

Variable	FLOW	Temp	EC	DO	pH	BOD	COD	TN	TP	SS	TOC	Chl-a
PC1	-0.14	0.08	0.21	-0.30	-0.20	0.42	0.45	0.08	0.36	0.14	0.45	0.26
PC2	0.39	0.38	0.47	0.15	0.06	0.01	0.03	0.46	0.05	-0.38	0.08	-0.29
PC3	-0.19	0.13	-0.12	0.53	0.67	0.10	0.16	0.00	0.09	-0.12	0.14	0.36
PC4	0.44	0.51	-0.06	0.01	-0.10	-0.07	0.15	-0.23	-0.48	0.32	0.10	0.33

수질변수들이 대상 요인에 명확히 할당되도록 요인 사이의 상관관계를 허용하여 요인들의 의미 파악 및 해석이 비교적 쉬운 직교 회전 중 분산의 합계를 최대한 높게 하여 변수의 개수를 줄여주어 결과해석을 단순하게 하는 Varimax 회전법을 수행하였으며 그 결과는 Table 5와 같다. 본 연구에서 BOD, COD 및 TOC는 유기오염물질 요인, 전기전도도, TN 및 TP 등은 영양염류 요인, 유량, 수온, pH, DO, SS 등은 자연적인 요인으로 구분하여 해석하였다. 또한, 요인부하량의 크기에 따라 강(strong)(>0.75), 중(moderate)($0.75\sim0.5$) 및 약(weak)($0.5\sim0.3$)으로 나누어 요인부하 해석을 수행하였다(Liu et al, 2003).

요인1은 유기오염물질 요인으로 BOD, COD, TOC 및 TP는 약한 정도의 양의 요인부하량, DO는 약한 정도의 음의 부하량을 나타내고 있다. 요인2는 영양염류 요인으로 EC, TN, FLOW와 수온은 약한 정도의 양의 요인부하량, SS는 약한 정도의 음의 부하량을 나타내고 있다. 요인3은 자연적인 요인으로 DO, pH는 중간 정도의 양의 요인부하량, Chl-a는 약한 정도의 양의 부하량을 나타내고 있다. 요인4는 기상요인으로 수온은 중간 정도의 양의 요인부하량, Chl-a와 FLOW, SS는 약한 정도의 양의 부하량, TP는 약한 정도의 음의 요인부하량을 나타내고 있다. 낙동강 지류의 경우 인구밀도가 비교적 높은 중소도시의 하수처리장 방류수, 중소규모 공장 폐수, 축산 폐수가 하천 수질에 주로 영향을 미치며, 강우시 대지 또는 농경지 등으로부터 발생하는 비점오염의 영향 등이 하천 수질에 추가적인 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한, 비점오염이 하천으로 유입 후 갈수기 수온의 상승으로 녹조 발생 가능성이 큰 것으로 분석되었다.

3.4 수질변수 군집분석

수질오염 요인과 지역 요인의 유사성을 파악하기 위해 계절에 따른 계층적 군집분석(Hierarchical cluster analysis)을 수행하였으며 그 결과는 Fig 3과 같다. 계절별 군집분석의 결과는 유기물, 영양물질 등의 오염도를 고려하여 Height 10을 기준으로 4개 군집으로 분석되었다. 봄철의 경우 가좌천, 경호강, 관곡천, 구미천 등 19개 지점은 양호한 수질, 관곡천, 구미천 등 6개 지점은 나쁜 수질을 나타내고 있다. 여름의 경우 계성천, 관곡천 등 12개 지점은 양호한 수질, 가좌천, 경호천 등 18개 지점은 나쁜 수질을 나타내고 있다. 가을의 경우 기세곡천, 남천 등 4개 지점은 양호한 수질, 관곡천, 대사천 등 11개 지점은 나쁜 수질을 나타내고 있다. 겨울의 경우 관곡천, 영산천 등 4개 지점은 양호한 수질, 기세곡천, 용화천, 호계천 등 3개 지점은 나쁜 수질을 나타내고 있다. 낙동강 지류의 경우 주택과 골프장의 잔디, 농경지, 도시 노면 및 하수도에서 유출되는 영양물질, 발, 논, 산림, 주거지역 등에서 발생하는 유기물질 등의 비점오염원의 영향으로 여름철 및 가을철에 수질이 악화하는 경향을 나타내고 있다.

계절에 따른 군집의 수질 분석 결과는 Fig 4와 같다. 오염도가 높은 군집의 경우 BOD($5.0\sim6.7\text{mg/L}$), COD($8.8\sim15.2\text{mg/L}$), TOC($6.1\sim11.4\text{mg/L}$), TN($2.147\sim7.353\text{mg/L}$), TP($0.145\sim0.456\text{mg/L}$)로 높은 수질을 나타내고 있다. 유역 내 생활계, 산업계, 축산계, 토지계 등의 오염원이 있는 지점들이 수질, 수리 및 기상 인자 등 인자들의 복합적인 영향으로 나쁜 수질을 나타내고 있다. 남천, 팔거천, 달서천 등은 인구가 상대적으로 상당히 높은 특성을 가지며 주변에 있는 하수처리장 방류수가 하천 수질에 영향을 미치는 지역이다. 오목천, 남천,

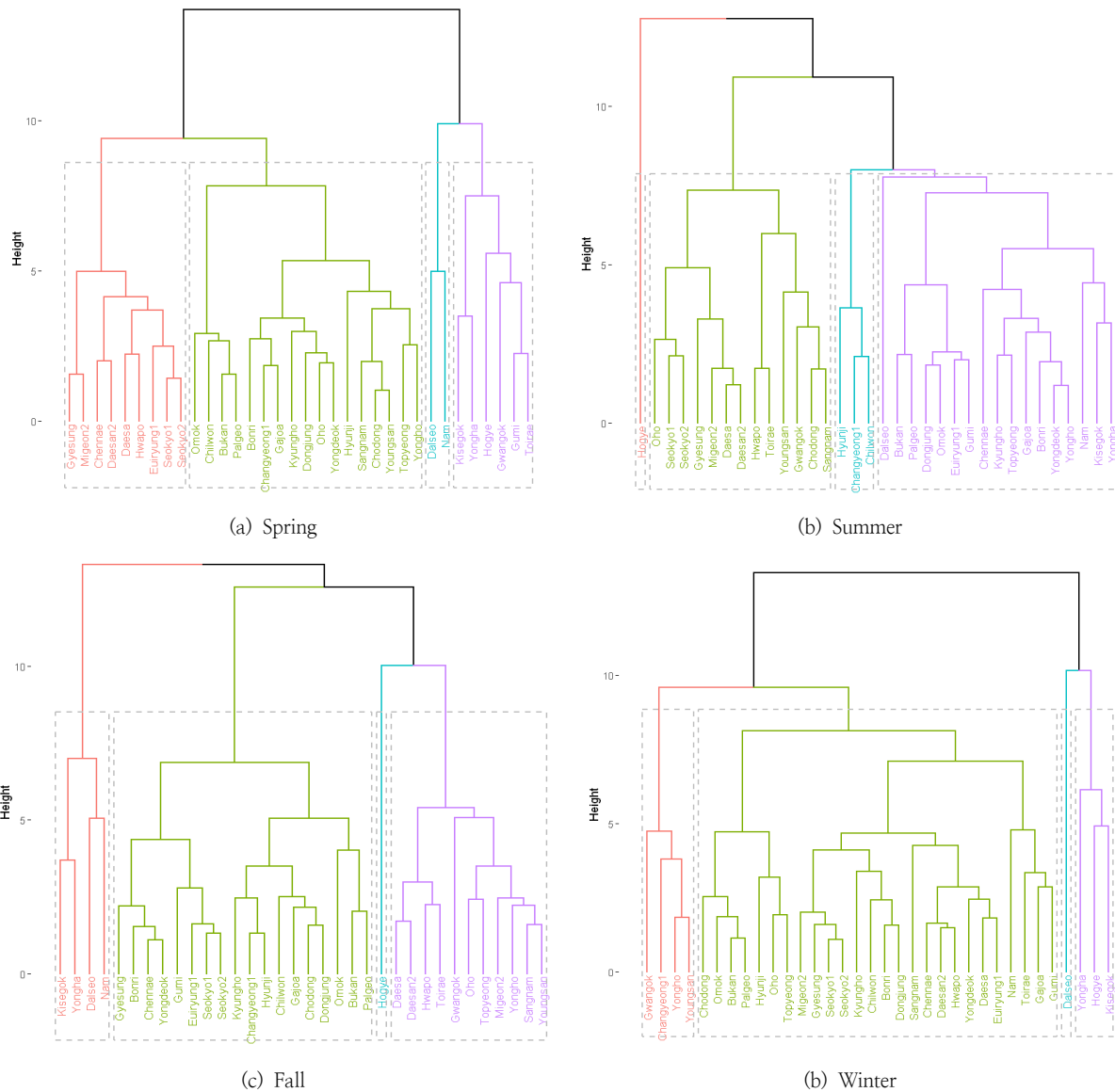


Fig. 3. Results of hierarchical cluster analysis

관곡천은 소규모 축사와 농업 활동 등의 영향을 받는 지역이다. 달서천, 용하천, 오목천, 구미천 등은 인구밀도가 상당히 높고 소규모 공장이 자리 잡은 특성을 나타내고 있다. 북안천, 오목천, 남천, 팔거천, 달서천 등의 금호강 지역은 대구염색공단과 북부 하수처리장의 방류수 유입, 중소축사의 가축폐수, 소규모 공장 지역의 오·폐수 유입으로 사계절 오염도가 높은 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 낙동강 유역의 34개 중점관리 지점을 대상으로 수질의 특성 변화를 분석하고 상관분석, 주성분 및 요인분석, 군집분석과 같은 다변량 통계해석기법을 통해 시공간적 수질변동에 영향을 주는 주요 요인을 검토하였다.

본연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 수질의 계절적 변화의 경우 유기물질인 BOD, COD, TOC 농도는 봄철 및 가을철이 여름철, 겨울철에 비해 높게 분석되었으며 영양물질인 TN과 TP의 평균, 최대, 최소 등의 농도는 여름철이나 가을철보다 봄철과 겨울철에 높게 분석되었다. 봄철의 경우 인구밀도가 높은 도심지역에서 하수처리장의 방류수가 일정하게 하천으로 유입되고 여름철의 경우 토지계 중 대지와 농지에서 유입되는 비점오염원 때문으로 분석되었다.

(2) 유기물질인 BOD는 COD(0.751), TP(0.635), TOC(0.748)와 높은 상관관계를 COD는 TP(0.619), TOC(0.988)와 높은 상관관계를 TOC는 TP(0.646)와 높은 상관관계를 나타내고 있어 영양염류는 유기물질과 함께 유입된 것으로 분석되었다. Chl-a는 BOD(0.453), COD(0.581), TOC(0.502)와 상대적으로 높은 상관성을 나타내며 외부기원 유기물로 인한 영향을 받으며 처리되지 않은 하수와 산림이나 농경지의 부식질이 많이 유입되었을 때의 수질 특성을 나타내고 있다.

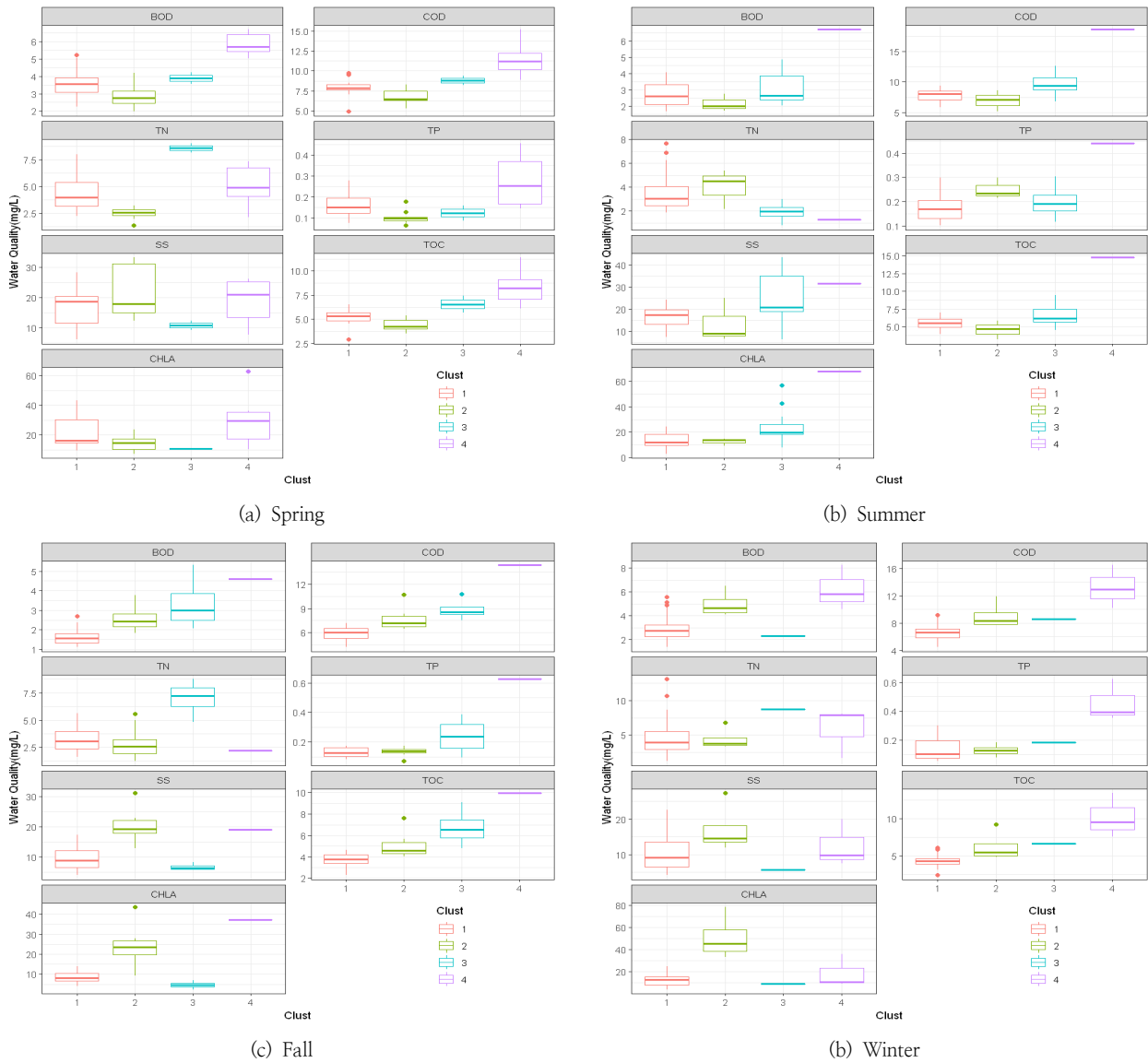


Fig. 4. Boxplot of water quality by cluster

(3) 요인1은 유기오염물 요인으로 BOD, COD, TOC 및 TP는 약한 정도의 양의 요인부하량, DO는 약한 정도의 음의 부하량을 나타내고 있다. 요인2는 영양물질 요인으로 EC, TN, FLOW와 TEMP는 약한 정도의 양의 요인부하량, SS는 약한 정도의 음의 부하량을 나타내고 있다. 요인3은 자연 요인으로 DO, pH는 중간 정도의 양의 요인부하량, Chl-a는 약한 정도의 양의 부하량을 나타내고 있다. 요인4는 기상 요인으로 수온은 중간 정도의 양의 요인부하량, Chl-a와 FLOW, SS, Chl-a는 약한 정도의 양의 부하량, TP는 약한 정도의 음의 요인부하량을 나타내고 있다. 따라서 낙동강 지류의 주요 오염요인은 유지유량 부족, 하수처리장의 방류수, 중소축사의 가축폐수, 소규모 공장의 오·폐수 유입이며 수량과 수질에 대한 통합 관리가 필요한 것으로 분석되었다.

(4) 계절별 군집분석 결과는 유기물, 영양물질 등의 오염도를 고려하여 Height 10을 기준으로 4개 군집으로 분석되었다.

오염도가 높은 군집의 경우 유역 내 생활계, 산업계, 축산계, 토지계 등의 오염원이 있는 지점들로 수질, 수리 및 기상 등 복합적인 인자들의 영향으로 나쁜 수질을 나타내고 있다. 대규모 염색공단과 북부하수처리장의 방류수, 중소축사의 가축폐수, 소규모 공장 지역의 오·폐수 유입으로 오염도가 높은 금호강 유역은 집중적인 관리가 필요한 것으로 분석되었다.

(5) 따라서 지류 하천의 효과적인 수질 관리를 위해서는 시공간적 특성을 고려한 대책이 필요하며 상관분석, 주성분 및 요인분석, 군집분석과 같은 다변량 통계기법은 수질 관리 및 정책 수립에서 유용하게 활용 가능할 것이다.

사 사

본 연구는 낙동강수계관리위원회에서 시행한 “낙동강수계 지류지천 장기 모니터링 및 목표수질 달성도 평가”의 결과입니다.

References

- Bengraïne, K. and Marhaba, T. F(2003), Using principal component analysis to monitor spatial and temporal changes in water quality, *J. Hazard. Mater.*, 100, pp.179–195 [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(03\)00104-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(03)00104-3)
- Cho YC, Lee SW, Ryu IG, Yu SJ(2017), Assessment of Spatiotemporal Water Quality Variation Using Multivariate Statistical Techniques: A Case Study of the Imjin Rivr Basin, Korea, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 39(11), pp.641–649[Korean Literature] <https://doi.org/10.4491/KSEE.2017.39.11.641>
- Choi SH, Kim HD, Lee TH, Park WI(2015), Study on Main Factors Affecting Water Quality using a Multivariate Statistical Analysis in the Agricultural Lakes, *Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, 22(2), [Korean Literature] <http://www.ekcid.org/new/sub04>
- Jung SJ, Lee D, Hwang K, Lee K, Choi K, Im S, Lee Y, Lee J, Lim B(2012), Evaluation of Pollutant Characteristics in Yeongsan River Using Multivariate Analysis. *Korean Journal of Limnology*. 45(4): pp.368–377. [Korean Literature] <http://dx.doi.org/10.11614/KSL.2012.45.4.368>
- Kal BS, Park JB, Kim SH, Im TH(2017), Assessment of Tributary Water Quality Using Integrated Water Qaulity Index, *J. of Wetlands Research*, 19(3), pp.311–317.[Korean Literature] <https://doi.org/10.17663/JWR.2017.19.3.311>
- Kim MA, Lee JK, Zoh KD(2007), Evaluation of the Geum River by Multivariate Analysis: Principal Component Analysis and Factor Analysis, *J. of Korean Society on Water Quality*. 23(1), pp.161–168.[Korean Literature]
- Kim YJ, Kal BS, Park JB, Kim SH, Im TH(2018), Classification of Nakdong River Tributaries under Priority Management based on their Characteristics and Water Qaulity Index, *J. of Korean Society of Environmental Engineers*, 40(2), pp.73–81[Korean Literature] <https://doi.org/10.4491/KSEE.2018.40.2.73>
- Kim YY, Lee S(2011). Evaluation of Water Quality for the Han River Tributaries Using Multivariate Analysis, *Korean Society of Environmental Engineers*, 33(7), pp.501–510 [Korean Literature] <http://www.riss.kr/link?id=A102152369>
- Lee YJ, Park MJ, Son JY, Park JR, Kim GD, Hong CS, Gu DH, Lee JG, Noh CW, Shin KY, Yu SJ(2017), Spatial and Seasonal Water Quality Variations of Han River Tributries, *J. Environ. Impact Assess*, 26(6), pp.418–430 [Korean Literature] <https://doi.org/10.14249/eia.2017.26.6.418>
- Liun CW, Linn KH, Kuon YM.(2003), Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a black foot disease area in Taiwan, *Science of The Total Environment*. 313(1–3), pp.77–89 [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00683-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00683-6)
- Na, S., Kwon, H., Shin, K. S., Son, Y., Shin, D., and Im, S, T.(2016). A Study on Seasonal Pollutant Distribution Characteristics of Contaminated Tributaries in Nakdong River Basin, *J. of Wetlands Research*, 18(3), 301–312. [Korean Literature] <http://dx.doi.org/10.17663/JWR.2016.18.3.301>
- Park JB, Kal BS, Kim SH(2018), Long-term Trend Analysis of Major Tributaries of Nakdong River Using Water Quality Index, *J. of Wetlands Research*, 20(3), pp.201–209.[Korean Literature] <https://doi.org/10.17663/JWR.2018.20.3.201>
- Singh, K. P., Malik, A., Mohan, D. and Sinha, S.(2004), Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti River(India), *Water Res.*, 38, pp.3980–3992 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.06.011>
- Yeon IS, Hong JY, Hong EY, Mun HS, Kim KH(2011), Principal Component Analysis of Algal Bloom in Daecheong Reservoir, *Proceedings of Spring Conference of the Society of Korean Water Environment*, pp.429–430[Korean Literature] <http://www.riss.kr/link?id=A60057531>