J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 57, No. 10 (2024), pp. 699-709
doi: 10.3741/JKWRA.2024.57.10.699
pISSN 2799-8746
eISSN 2799-8754

Evaluation of environmental drought index applicability for watershed-specific drought management

Lim, Jaeyeon[a] · Lee, Sangung[b] · Jo, Bugeon[c] · Kim, Young Do[d]* · Lee, Joo-Heon[e]

[a]Master's Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea
[b]Ph.D Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea
[c]Research Professor, Institute for Construction and Environment Engineering, Myongji University, Yongin, Korea
[d]Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea
[e]Professor, Department of Civil Engineering, Joongbu University, Goyang, Korea

Paper number: 24-051
Received: 6 August 2024; Revised: 30 September 2024; Accepted: 2 October 2024

Abstract

This study comprehensively evaluates the environmental impacts of droughts caused by abnormal climate change. Specifically, to quantitatively analyze the impact of droughts on the water environment of river basins, an Environmental Drought Index (EDI) was developed using meteorological, hydrological, and water quality parameters. The study focuses on the Han River basin, categorizing the watersheds into urban, agricultural, and forest types to develop region-specific EDIs. Various data analysis techniques, such as multiple linear regression, principal component and random forest analysis, were employed to determine the weights of different parameters to assess the impact of droughts. The primary water quality parameter used in the assessment was BOD (Biochemical Oxygen Demand). The results showed that in urban areas, TOC (Total Organic Carbon) and flow were the primary parameters, with significant deterioration in water quality during droughts. In agricultural areas, TOC and EC (Electrical Conductivity) were the primary parameters driving changes in water quality during droughts. In forest areas, TOC, flow and cumulative precipitation were identified as the primary parameters, with relatively less impact compared to other regions.

Keywords: Drought, Climate change, Water quality managment, Data anlysis

유역 맞춤형 가뭄 관리를 위한 환경가뭄지수 적용성 평가

임재연[a] · 이상웅[b] · 조부건[c] · 김영도[d]* · 이주헌[e]

[a]명지대학교 토목환경공학과 석사과정, [b]명지대학교 토목환경공학과 박사과정, [c]명지대학교 건설환경연구소 연구교수,
[d]명지대학교 토목환경공학과 교수, [e]중부대학교 토목공학과 교수

요 지

본 연구는 이상기후변화로 발생하는 가뭄의 환경적 영향을 종합적으로 평가하였다. 특히 가뭄이 하천 유역의 물환경에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해 기상, 수문, 수질 항목을 활용하여 환경가뭄지수를 개발하였다. 한강수계를 대상으로 유역 특성에 따라 도시 유형, 농업 유형, 산림 유형으로 구분하여 각 지역별 환경가뭄지수를 산정하였다. 가뭄의 영향을 평가하기 위해 다중선형회귀, 주성분분석, 랜덤포레스트 등의 다양한 데이터 분석 기법을 사용하여 가중치를 산정하였다. 주요 수질 항목으로는 BOD를 활용하여 평가를 진행하였다. 연구 결과, 도시 유형에서는 TOC와 유량이 주요 항목으로 나타나며, 가뭄 시 수질 악화가 두드러지게 나타났다. 농업 유형에서는 TOC와 EC가 주요 항목으로 작용하여 가뭄에 따른 수질 변화가 뚜렷하게 나타났고, 산림 유형에서는 TOC, 유량 및 누적강수량이 주요 항목으로 나타났으며, 다른 지역에 비해 가뭄의 영향이 상대적으로 적게 나타났다.

핵심용어: 가뭄, 기후변화, 수질 관리, 데이터 분석

***Corresponding Author.** Tel: +82-31-330-6407
E-mail: ydkim@mju.ac.kr (Kim, Young Do)

© 2024 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

최근 도시화, 산업화 등 인간활동으로 인한 이산화탄소 발생의 증가로 이상기후변화가 발생하고 있다. 이상기후변화로 나타나는 가뭄이나 홍수로 인해 하천의 유역 환경이 변화하고 있다. 특히 가뭄이 발생함에 따라 강수량 감소, 증발산량 증가, 토양함수량 감소, 저수지 유입량 감소 등 수문학적 변동성이 증가하고 있으며, 이는 다시 하천 수온 증가, 물고기 떼죽음, 녹조 발생, 퇴적물 재부유 발생 등의 문제로 이어진다. 일반적으로 가뭄은 시공간적으로 영향이 확장되며 이는 농업적 피해와 수문학적 피해를 순차적으로 발생시키며 가뭄의 장기화에 따라 수질 악화, 서식처 파괴 등 환경학적 피해 또한 발생하고 있어 가뭄의 확대에 따라 시기적절한 대응이 필요하다 (Yoo *et al*., 2020).

극심한 가뭄은 다양한 분야에 경제적, 사회적, 환경적으로 지속적인 영향을 미친다. 강수량 감소에 따른 작물 수확의 감소, 산불 위험의 증가, 어류 서식처 피해 및 유량 감소로 인한 수생생물 손실, 생물종의 서식처 감소 및 다양성 손실, 유량 감소에 따른 수질악화, 토양질 저하 및 지하수 고갈 등 직접적인 영향이 나타나며 이로 인해 관개비용 증가, 어업 생산 손실 등으로 인한 소득 감소, 농산물 가격 상승, 물 공급자 부담 증대, 물 사용자 간 충돌 등의 간접적인 영향으로 이어진다. 또한, 가뭄은 다른 자연재해와는 달리 영향을 주는 범위가 다양하기 때문에 가뭄에 영향을 주는 인자에 따라 가뭄을 판단하는 방법이 다르다. 국내에서는 가뭄을 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회적 가뭄으로 분류하여 서로 다른 기관에서 관리하고 있다. 기상학적 가뭄은 기상청에서 관리하며 강수량 감소, 증발산량 증가 등 기상현상의 영향을 직접적으로 표현한다. 농업적 가뭄은 농림축산식품부에서 관리하며 토양 함수량 감소, 작물 생산량 감소 등 농업에 영향을 주는 가뭄으로 농작물 생육에 직접 관계되는 토양 수분으로 판단한다. 수문학적 가뭄은 물 공급에 초점을 맞춰 하천 유량, 저수지, 지하수 등 가용 수자원의 양으로 정의하며 환경부에서 관리하고, 사회경제적 가뭄은 물의 수요와 공급을 기상학적, 수문학적, 농업적 가뭄의 요소와 관련시켜 지역의 환경 및 경제적 영향에 따라 표시한다.

가뭄을 모니터링하기 위한 방법으로 가뭄지수를 활용하여 가뭄을 정량적으로 평가하는 방법으로 SPI (Standardized Precipitation Index; McKee *et al*., 1993)는 계산 과정이 쉽고, 강수의 부족만으로 가뭄을 직관적으로 판단할 수 있어 가장 활발하게 이용되고 있으며, 최근에는 강수량과 증발산량을 함께 고려하여 비교적 가뭄을 효과적으로 평가할 수 있는 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; Vicente-Serrano *et al*., 2010)가 주목을 받고 있다. 가뭄 정량화에 효과적인 방법으로 알려져 있는 PDSI (Palmer Drought Severity Index)는 다양한 분야의 가뭄 평가를 위해 사용되고 있으며, Nalbantis (2008)는 하천수 가뭄지수인 SDI (Streamflow Drought Index)를 제안하여 월 유량으로 가뭄의 심도와 지속기간을 구분해 내는 방법을 제안하는 등 국내 가뭄관리를 위해 기상학적, 농업적, 수문학적 가뭄 모니터링이 가능한 가뭄지수들이 활용되고 있다. 가뭄의 환경학적 영향을 평가하기 위해서 Seo *et al*. (2023)은 기상학적 가뭄과 BOD 수질의 상관관계를 copula기반의 확률결합분포 모델을 통해 살펴보았으며 Lee *et al*. (2018)은 충주댐 하류 남한강 주요 유입하천을 대상으로 유량, 수질, 전국오염원 조사 자료를 바탕으로 갈수기 오염부하 특성 및 남한강 본류 기여율을 분석했다. 현재 국내 가뭄 모니터링은 기상학적, 농업적, 수문학적 가뭄을 대상으로 개발된 가뭄지수를 활용하여 가뭄의 환경학적 영향을 평가하고 있으나 환경 분야에서의 가뭄에 대한 정의나 가뭄으로 인한 환경학적 피해와 영향에 대한 대처는 미흡하고 정량적으로 평가할 수 있는 가뭄지수는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 국내에서 발생하는 가뭄의 환경학적 영향을 평가하기 위해 기상, 수문 및 수질을 고려한 환경가뭄지수를 개발하였다. 국내 유역은 토지피복상태에 따라 유역 현황이 다르게 나타나며, 타 수계 적용성을 고려하기 위해 유역 특성을 반영한 가중치를 적용하였다. 물환경 분야에서 수질관리는 대표적으로 BOD, T-P를 중점적으로 관리하고 있으나, T-P는 비점오염영향이 크므로 BOD를 중점으로한 환경가뭄지수를 개발하여 기상가뭄지수인 SPI와 비교를 통해 검증하였다.

2. 연구방법

2.1 대상 유역 및 기초자료

본 연구에서는 토지피복의 특성이 다양하게 나타나고 지점별 위치한 관측소의 주기적으로 측정 및 관측된 데이터 활용이 가능한 남한강, 북한강 및 한강 수계를 연구 대상으로 선정하였다(Fig. 1). 환경공간정보서비스에 공개된 토지피복도는 위성자료를 기반으로 생성되나 DMZ, 군사경계선 등 위성자료를 확보할 수 없고 관측소의 유무에 따라 금강산댐, 평화의댐, 팔당댐, 고미탄천, 임진강상류, 임진강하류 및 한강하류 중권역을 제외한 총 16개 중권역을 대상 유역으로 선정하였다. 본 연구에서 유역 특성을 고려하기 위해 16개 중권역을 토지 피복도에 따라 도시, 농업, 산림유형으로 구분하였다. 시

가화 · 건조지역이 10% 이상인 중권역을 도시유형으로 분류하였고 시가화 · 건조지역이 10% 이하면서 농업지역의 비율이 10% 이상인 지역을 농업유형, 시가화 · 건조지역이 10% 이하면서 농업지역의 비율이 10% 이하인 지역을 산림유형으로 분류하였다(Table 1). 분석에 활용한 수질 및 수문 자료는 2014년부터 2023년까지 물환경정보시스템에서 제공하는 총량측정망 자료를 활용하였다. 기상자료는 기상자료개방포털에서 제공하는 강수량 자료를 활용하였다.

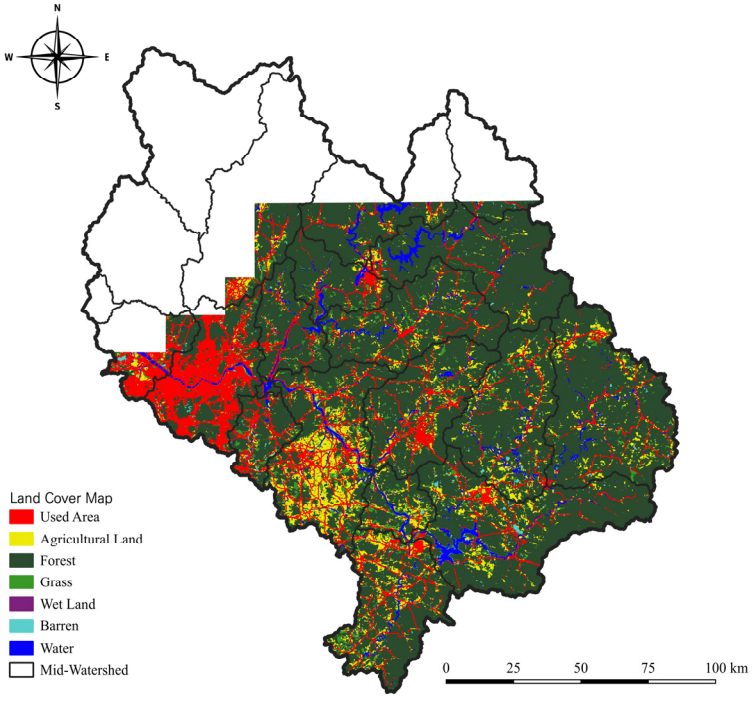

Fig. 1. Study area

Table 1. Land cover status in watersheds

Category	Watershed	Used Area (%)	Agricultural Land (%)	Forest (%)
Urban	Hangang-Seoul (HS)	34.1	6.1	42.5
	Hangang-Goyang (HG)	26.3	14.6	34.9
	Gyeongancheon (GC)	10.9	11.1	60.1
Rural	Downstream of the Namhangang (DN)	4.8	31.1	47.6
	Dalcheon (DC)	2.7	19.0	64.6
	Seomgang (SG)	3.1	13.7	71.2
	Chungju Dam (CJD)	1.5	10.2	75.6
	Downstream of the Chungju Dam (DCD)	1.5	22.5	58.8
	Pyeongchanggang (PC)	1.1	11.5	76.5
Forest	Upstream of the Namhangang (UN)	1.0	8.8	81.3
	Soyanggang (SYG)	0.7	4.5	86.8
	Uiam Dam (UD)	3.3	7.4	76.3
	Inbukcheon (IC)	0.9	3.9	87.3
	Cheongpyeong Dam (CPD)	2.8	6.5	75.5
	Chuncheon Dam (CCD)	1.0	8.4	79.0
	Hongcheongang (HC)	1.0	9.6	79.2

2.2 환경가뭄지수 산정식

환경가뭄지수는 유역 내 유량이 감소하고, 일정기간 이상 평균 유량이 적어 수질이 악화되는 상태를 판단하는 지수로 수질지수를 기반으로 개발하였다. 수질지수는 수질 정보의 복잡함을 하천에서 수질을 구성하고 있는 주요 변수의 차원을 축소하고 산술 및 기하평균으로 계산하는 종합적인 평가 방법으로 경향 및 지역별로 시공간 변화에 따른 직관적인 비교가 가능하다(Lee *et al*., 2022). 다양한 연구에서 활용되는 대표적인 수질지수로 CCMEWQI (Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index), RTWQI (Real Time Water Quality Index), NSFWQI (National Sanitation Foundation Water Quality Index), WAWQI (Weighted Arithmetic Water Quality Index) 등이 있다.

CCMEWQI는 Canadian Council of Ministers of the Environment에서 개발된 수질지수로 수질 초과의 범위, 빈도 및 편차를 평가에 포함하는 방법론이다(Bilgin, 2018). RTWQI는 CCME WQI 산정식의 일부 및 선택된 변수 등 국내 실정을 고려하여 개선되었다(Shin *et al*., 2022). NSFWQI는 다양한 변수를 포함하여 수질을 종합적으로 평가할 수 있는 수질지수로써 각 변수에 대한 가중치를 적용하여 수질지수를 계산하는 방법이다. CCMEWQI 및 RTWQI는 가중치를 적용하지 않고 동일한 범주에서 각 수질을 평가하기 위해 유역 특성을 반영하기 어렵다. 또한, WAWQI는 지점별 가중치의 재산정이 필요하다. 따라서, NSFWQI의 범용성이 본 연구의 목적에 적합한 것으로 판단하여 NSFWQI 방법론을 기반으로 환경가뭄지수(Environment Drought Index, EDI)를 개발하였다(Eq. (1)). Q_i는 항목 평가 값이고 W_i는 항목별 가중치 값이다. 지수산정에 활용되는 항목은 유량(Flow), 28일 누적강수량(Prec.), 무강우일수(R-days), pH, EC, DO, TOC이다. 유량과 28일 누적강수량 및 DO는 Eq. (2), 무강우일수, EC, TOC는 Eq. (3), pH는 범위에 따라 구분하여 Q_i를 계산한다. C_i는 측정 값이고 S_i는 기준값이다. 항목별 기준값으로 유량은 중권역별 갈수기 평균 유량, EC는 환경부에서 개발한 실시간수질지수(Real Time Water Quality Index, RTWQI) 기준, pH, DO, TOC는 하천생활환경기준의 Ib (좋음) 등급으로 설정하였다(Table 2). 환경가뭄지수는 점수에 따라 5개 단계로 평가하였다(Table 3).

$$EDI = \sum_{i=1}^{n} Q_i W_i \tag{1}$$

$$Q_i = \frac{C_i}{S_i} \tag{2}$$

Table 2. Standard values for parameters in EDI calculation

Parameter	Standard Value
Flow	Average Low Flow Rate
Prec.	30.0 mm
R-days	28 Days
pH	6.5 ~ 8.5
EC	200
DO	5.0
TOC	3.0

Table 3. EDI grade range

Level	EDI
Normal	< 0.7
Concern	0.7 - 1
Attention	1 - 1.2
Warning	1.2 - 1.5
Critical	1.5 <

$$Q_i = \frac{S_i}{C_i} \tag{3}$$

2.3 환경가뭄지수 가중치

연구 대상 지점을 도시, 농업, 산림의 세 가지 유형으로 분류하고 각 유형별 가뭄지수를 산정하고자 가중치 산정 방법들을 적용하였다. BOD를 종속변수로, 유량, 28일 누적강수량, 무강우일수, pH, EC, DO, TOC를 독립변수로 사용하고 다중선형회귀, 주성분분석, 랜덤포레스트를 이용하여 항목들의 BOD와의 관계성으로 가중치를 산정하였다. 활용된 항목들이 각기 다른 단위를 가지고 있어 특정 항목의 가중치가 높게 나타나는 현상을 방지하기 위해 전체 데이터의 표준화를 통해 단위를 무차원으로 변형시켜 분석하였다. 방법론별 가중치 산정시 회귀계수 및 변수의 기여율은 양(+)과 음(-)의 수치로 계산되어 양(+)의 값으로 변환하기 위해 지수 함수로 변환하였다(Eq. (4)). 여기서, w_i'는 BOD와의 관계성을 산정한 값이고, w_i는 지수함수로 변환된 값이다. 산정된 w_i는 항목들의 비율 관계를 유지하기 위해서 가중치의 합이 1이 되도록 상대 가중치 W_i로 재산정하였다(Eq. (5)). 여기서 W_i는 정규화된 값이다.

$$w_i = e^{w_i'} \tag{4}$$

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \tag{5}$$

2.3.1 다중선형회귀(Multiple Linear Regression, MLR)

다중선형회귀는 하나의 종속변수와 여러 개의 독립변수 간의 관계를 분석하는 통계 기법이다. 이는 종속변수에 대한 독립변수들의 상대적 영향력을 평가하고, 각 독립변수가 종속변수에 미치는 영향을 추정하는 데 사용된다. 다중선형회귀는 (Eq. (6))와 같이 산정되며 여기서 Y는 종속변수, X_1, X_2, …, X_k는 독립변수, β_0는 절편, β_1, β_2, …, β_k는 각 독립변수의 회귀 계수이고, ϵ은 오차항으로 설명되지 않은 변동을 나타낸다(Cha *et al*., 2015). 다중선형회귀에서 각 변수들의 회귀 계수를 가중치로 적용하였다.

$$Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_kX_k+\epsilon \tag{6}$$

2.3.2 주성분분석(Principal Component Analysis, PCA)

주성분분석이란 여러 개의 변수들 사이의 분산과 공분산의 관계를 이용하여 변수들의 선형 결합으로 나타나는 주성분을 찾고, 이를 통해 총 변동의 대부분을 설명하는 중요한 몇 개의 주성분을 선택하는 다변량 통계분석법으로 보통 2개에서 3개의 주성분으로 전체 변동의 대부분을 설명할 수 있다(Ko *et al*., 2005). 즉, 데이터를 줄여가면서 주축이 되는 성분이 있는지에 대해 살펴보고 또 어떻게 압축이 되는지 파악하는 방법이다. 이때 분산이 사용되며 변수가 합쳐지면서 생기는 새로운 변수들에 관하여 분산의 크기가 전과 비슷하게 되도록 하여 각 성분의 분산을 통해 가중치를 부여하게 된다. 요인의 수를 최소한으로 산출하고 최초 변인들이 지닌 정보를 극대화하고자 할 때 사용하는 분석법이다. 주성분 산출 과정을 식으로 표현하면 (Eq. (7))와 같다.

$$\begin{aligned} z_1 &= a_{11}x_1+a_{12}x_2+a_{13}x_3+\cdots+a_{1n}x_n \\ z_2 &= a_{21}x_1+a_{22}x_2+a_{23}x_3+\cdots+a_{2n}x_n \\ &\vdots \\ z_m &= a_{m1}x_1+a_{m2}x_2+a_{m3}x_3+\cdots+a_{mn}x_n \end{aligned} \tag{7}$$

여기서 z_1부터 z_m은 주성분, x_n은 표준화된 관측치, a_{mn}은 가중치를 나타내며, 각 주성분의 고유치(Eigenvalue)가 1보다 크거나 누적 설명력이 80%(Cumulative Proportion)를 초과하는 것을 기준으로 주성분을 선정한다(Abdel-Aty and Pemmanaboina, 2006). 또한, 주성분 산출식에 x_1부터 x_n값과 a_{mn}값을 대입함으로써 관측 대상에 대한 주성분 점수를 산출할 수 있으며 이는 영향요인을 분석할 때 독립변수로 활용 가능하다(Park *et al*., 2022). 주성분의 분산설명력(Explained Variance Ratio, EVR)의 누적값이 80% 이상이 되는 구간을 기점으로 주성분의 개수를 결정하였다. 각 항목의 가중치는 각 주성분에서 해당 변수의 기여율(loading)과 해당 주성분의 설명력을 곱한 값을 바탕으로 산정되었다(Eq. (8)). 여기서 e_j는 주성분 j의 설명력을 의미하고, l은 주성분 j에서 매개변수 i의 기여율을 의미한다.

$$w=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}(e_j\times l_{ij}) \tag{8}$$

2.3.3 랜덤포레스트(Random Forest, RF)

분류, 회귀 분석 등에 사용되는 앙상블 학습 방법의 일종으로, 훈련 과정에서 형성한 다수의 의사결정 나무로부터 각각의 결과를 투표로 결정하는 분석기법이다. 의사결정 나무는 과적합(Overfitting)될 가능성이 있어 이를 해결하고자 여러 개의 의사결정 나무를 만들어 다수결로 결과물을 종합하는 방식이다(Park *et al*., 2022). 랜덤 포레스트는 분류와 회귀 분석에 모두 사용 가능하며 분류의 방법은 각 의사결정나무의 결과로 투표하고, 회귀의 방법은 예측값의 평균값을 계산한다. 랜덤포레스트는 선택된 변수의 빈도수와 각 의사결정 나무의 예측 성능을 이용해 변수의 중요도를 계산해 낼 수 있다. 이러한 방법으로 모델링에 사용할 항목을 선택하는 데 사용할 수 있다.

3. 연구결과

3.1 기초현황 분석

부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)은 하천의 전체 유량 조건에서 실측수질과 목표수질과의 관계를 나타내는 곡선이며 수질 기준의 만족 여부를 판단하는 데 있어 유용한 방법으로 수질 총량관리에서 주로 활용된다(Jo *et al*., 2023; U.S. EPA, 2007). LDC에 해당 기간의 관측수질과 유량을 도식하여 전체 유량 규모에 대한 관측치의 분포를 확인할 수 있다. 유황 구분은 초과유량확률이 10%~40%는 풍수기, 40%~60%는 평수기, 60%~90%는 저수기, 90%~100% 갈수기로 나타냈다(Jang *et al*., 2018). 부하지속곡선의 작성을 위해서 해당 유역에 대한 일 유량자료를 높은 값에서 낮은 값으로 내림차순으로 정렬하고 각 유량 값에 대해 이 값을 초과하는 일수를 백분율(초과유량백분율)로 계산했다. 초과유량백분율에 대응하는 초과 부하량 백분율을 x축, 해당 BOD 부하량 값을 y축으로 하여 부하지속곡선을 작성하고 유량값에 대한 초과유량백분율을(Table 4)에 나타냈다.

도시유형은 한강서울을 제외하고 갈수기에서 초과율이 저수기의 약 2배로 증가하여 비교적 높게 나타났으나 한강서울

Table 4. Exceedance rates of BOD by flow conditions in watersheds

	Watershed	Moist Conditions	Mid-range Conditions	Dry Conditions	Low Flows
Urban	HS	50.43%	53.85%	43.59%	62.50%
	HG	12.07%	12.82%	15.52%	30.77%
	GC	8.76%	17.58%	32.12%	62.22%
Rural	DN	22.96%	24.44%	32.59%	51.11%
	DC	14.78%	30.26%	25.22%	35.90%
	SG	9.92%	13.64%	28.24%	45.45%
	CJD	0.85%	2.56%	0.00%	0.00%
	DCD	17.95%	27.85%	21.37%	17.50%
	PC	7.76%	25.32%	27.12%	16.67%
Forest	UN	13.64%	6.67%	0.00%	12.50%
	SYG	0.00%	0.00%	0.00%	2.22%
	UD	38.46%	43.59%	38.46%	61.54%
	IC	5.36%	13.33%	18.75%	47.37%
	CPD	13.93%	30.59%	48.75%	76.97%
	CCD	0.00%	1.37%	1.52%	0.00%
	HC	7.14%	6.94%	19.82%	43.24%

은 전체시기에서 높은 초과율을 보였다. 농업유형은 갈수기에 높은 초과율을 보이며, 남한강하류, 달천 및 충주댐하류에서는 고유량시기인 풍수기, 평수기에도 높은 초과율을 보였다. 충주댐은 전체적으로 초과율이 미비했으며 달천과 충주댐하류는 평수기에 비교적 높게 나타났다. 남한강하류와 섬강은 도시유형인 한강고양과 경안천처럼 유량이 감소함에 따라 초과율이 증가하는 경향이 보이는데 농업유형 중 비교적 시가화·건조지역의 비율이 높게 나타났다. 산림유형 중 남한강상류는 고유량시기가 저유량시기에 비해 초과율이 높게 나타났다. 소양강과 춘천댐은 전체적으로 목표수질 초과율이 미비했다. 의암댐은 산림유형 중 갈수기에 높은 초과율을 보였으며 전체적으로 초과율이 높게 나타났다. 인북천과 홍천강은 갈수기에 높은 초과율을 보이지만 전반적으로 초과율이 낮게 나타났다. 의암댐과 청평댐은 산림유형 중 높은 초과율이 나타났는데 산림유형 중 비교적 시가화·건조지역의 비율이 높게 나타났다.

각 항목별 기준값 초과율을 산정하였다(Table 5). 도시유형에서 기준값을 초과한 항목은 공통적으로 EC와 TOC로 나타났다. 한강서울에서 EC (82.1%), TOC (48.6%), 한강고양에서 EC (93.8%), TOC (75.5%), 경안천 EC (97.1%), TOC (53.0%) 순으로 나타났다. 도시유형의 랜덤포레스트를 활용하여 분석한 가중치는 TOC가 0.22으로 가장 높았으며 EC가 0.15로 세번째로 높았다. 이는 지수 값이 TOC와 EC의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. 농업유형은 공통적으로 EC와 누적강수량이 기준값을 초과하는 항목으로 나타났으며 농업유형 중 섬강은 TOC, 평창강은 pH도 추가적으로 기준값을 초과하는 항목으로 나타났다. 농업유형의 다중선형회귀를 활용하여 분석한 가중치에서 EC는 0.14, 누적강수량은 0.11로 낮은 편에 속했으나 TOC가 0.30로 지수 값에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 산림유형은 남한강 상류와 의암댐에서 EC가 비교적 높은 초과율을 보였으며 소양강, 인북천, 청평댐, 춘천댐과 홍천강은 누적강수량이 기준값을 초과하는 것으로 나타났다. 또한 pH, TOC, 무강우일수 등 다양한 항목이 가뭄단계 격상에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 산림유형의 주성분분석을 활용하여 분석한 가중치에서 EC는 0.12 누적강수량은 0.18로 나타났으며 유량(0.23)과 누적강수량(0.18)을 제외한 항목들에서 가중치의 편차가 비교적 크지 않은 것으로 나타나 지수 값이 누적강수량의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다.

3.2 데이터 분석 기법을 통한 가중치 산정

환경가뭄지수는 BOD를 대상으로 개발된 지수이며, 유량, 28일 누적강수량, 무강우일수, pH, EC, DO, TOC를 통해 산정된다. 가중치는 다중선형회귀의 회귀계수, 주성분분석의 분산설명력과 기여율을 곱한 결과, 랜덤포레스트의 변수중요도를 통해 산정된다(Table 6). 다중선형회귀에서 도시유형, 농업유형 및 산림유형의 R^2는 0.51, 0.76, 0.70로 산정되었다. 주성분분석은 모든 유역 유형에서 다섯 번째 주성분부터

Table 5. Exeedance rates of parameters in watersheds

	Watershed	Flow	Prec.	R-days	pH	EC	DO	TOC
Urban	HS	5.88%	25.32%	15.35%	3.84%	82.10%	1.28%	48.59%
	HG	5.68%	25.32%	15.50%	1.81%	93.80%	0.00%	75.45%
	GC	3.96%	30.77%	21.54%	10.33%	97.14%	0.00%	52.97%
Rural	DN	4.67%	30.22%	22.00%	19.33%	98.44%	0.00%	20.00%
	DC	3.92%	27.42%	15.14%	26.11%	77.81%	0.00%	22.45%
	SG	3.89%	31.58%	19.22%	25.63%	84.44%	0.00%	35.24%
	CJD	3.82%	28.24%	16.03%	8.91%	80.92%	1.02%	0.25%
	DCD	4.34%	29.34%	18.62%	27.81%	80.36%	0.00%	3.57%
	PC	3.62%	28.17%	16.54%	29.72%	90.18%	0.00%	3.62%
Forest	UN	6.85%	23.29%	16.44%	69.86%	97.26%	0.00%	0.00%
	SYG	7.71%	32.98%	23.55%	5.57%	0.00%	0.00%	0.21%
	UD	0.00%	25.38%	15.38%	3.85%	82.05%	1.28%	48.72%
	IC	2.94%	26.47%	17.65%	19.52%	0.27%	0.00%	2.14%
	CPD	4.11%	27.51%	17.99%	9.00%	0.00%	0.00%	2.83%
	CCD	5.61%	29.34%	20.41%	0.26%	0.00%	0.00%	0.26%
	HC	4.89%	27.17%	16.03%	12.23%	19.02%	0.00%	2.45%

Table 6. Results of weight calculation methods

			Flow	Prec.	R-days	pH	EC	DO	TOC
Urban	MLR	Result	-0.0003	-0.1383	-0.0244	-0.0391	0.0499	0.0293	0.9702
		Weight	0.12	0.10	0.12	0.11	0.12	0.12	0.31
	PCA	Result	0.6189	0.4253	-0.2400	-0.0055	0.1551	-0.0949	0.1412
		Weight	0.22	0.18	0.09	0.12	0.14	0.11	0.14
	RF	Result	0.1528	0.1378	0.1040	0.1029	0.1520	0.1323	0.2182
		Weight	0.16	0.14	0.10	0.10	0.15	0.13	0.22
Rural	MLR	Result	0.0168	-0.0427	-0.0185	0.0681	0.1955	0.0078	1.0003
		Weight	0.11	0.11	0.11	0.12	0.14	0.11	0.30
	PCA	Result	0.7303	0.3749	-0.0314	-0.0587	0.0092	-0.0439	0.0197
		Weight	0.25	0.17	0.12	0.11	0.12	0.11	0.12
	RF	Result	0.1630	0.0819	0.0674	0.0570	0.2164	0.0778	0.3365
		Weight	0.16	0.08	0.07	0.06	0.22	0.08	0.33
Forest	MLR	Result	-0.0458	-0.0611	-0.0459	0.0745	0.1199	0.1075	1.0765
		Weight	0.10	0.11	0.11	0.12	0.12	0.12	0.32
	PCA	Result	0.6599	0.3788	0.0840	-0.1033	0.0285	-0.0881	0.0402
		Weight	0.23	0.18	0.13	0.11	0.12	0.11	0.12
	RF	Result	0.1486	0.1095	0.0895	0.0843	0.1498	0.1113	0.3070
		Weight	0.15	0.11	0.09	0.08	0.15	0.11	0.31

누적 설명력이 80% 이상으로 나타나, 각 주성분에서 해당 변수의 기여율과 설명력을 곱한 값을 적용하였다. 랜덤포레스트를 활용한 유역 유형별 변수 중요도 분석 결과는 도시유형의 RMSE와 예측정확도는 0.845와 0.548로, 농업유형의 RMSE와 예측정확도는 0.550과 0.786으로, 산림유형의 RMSE와 예측정확도는 0.731과 0.658로 나타났다. 다중선형회귀 및 랜덤포레스트는 수질항목인 TOC의 영향이 크게 나타나고 주성분분석은 TOC와 수질항목들의 가중치는 유

Table 7. Comparison of environmental drought index results based on SPI1

	Watershed	Method	Wet	Normal	Moderate drought	Severe drought	Extreme drought
Urban	HS	MLR	Concern	Concern	Warning	Warning	Warning
		PCA	Concern	Concern	Warning	Critical	Critical
		RF	Concern	Concern	Warning	Critical	Warning
	HG	MLR	Concern	Attention	Warning	Critical	Critical
		PCA	Concern	Concern	Warning	Critical	Critical
		RF	Concern	Concern	Warning	Critical	Critical
	GC	MLR	Concern	Concern	Critical	Critical	Critical
		PCA	Concern	Concern	Critical	Critical	Critical
		RF	Concern	Concern	Critical	Critical	Critical
Rural	DN	MLR	Concern	Concern	Warning	Critical	Warning
		PCA	Normal	Concern	Warning	Critical	Warning
		RF	Concern	Concern	Warning	Critical	Warning
	DC	MLR	Normal	Concern	Attention	Critical	Attention
		PCA	Normal	Normal	Warning	Critical	Warning
		RF	Normal	Concern	Attention	Critical	Attention
	SG	MLR	Normal	Concern	Attention	Critical	Critical
		PCA	Normal	Concern	Attention	Critical	Critical
		RF	Concern	Concern	Attention	Critical	Critical
	CJD	MLR	Normal	Normal	Concern	Critical	Concern
		PCA	Normal	Normal	Attention	Critical	Attention
		RF	Normal	Normal	Concern	Critical	Concern
	DCD	MLR	Normal	Concern	Concern	Critical	Critical
		PCA	Normal	Normal	Attention	Critical	Critical
		RF	Normal	Concern	Normal	Warning	Critical
	PC	MLR	Normal	Concern	Warning	Warning	Attention
		PCA	Normal	Normal	Warning	Critical	Warning
		RF	Normal	Concern	Attention	Warning	Attention
Forest	UN	MLR	-	Normal	Concern	Attention	Critical
		PCA	-	Normal	Concern	Warning	Critical
		RF	-	Normal	Concern	Attention	Critical
	SYG	MLR	Normal	Normal	Attention	Critical	Critical
		PCA	Normal	Normal	Warning	Critical	Critical
		RF	Normal	Normal	Attention	Critical	Critical
	UD	MLR	Concern	Concern	Warning	Attention	Warning
		PCA	Normal	Concern	Warning	Attention	Warning
		RF	Concern	Concern	Warning	Attention	Warning
	IC	MLR	Normal	Normal	Critical	Critical	Warning
		PCA	Normal	Normal	Critical	Critical	Critical
		RF	Normal	Normal	Critical	Critical	Warning
	CPD	MLR	Normal	Normal	Attention	Critical	Attention
		PCA	Normal	Normal	Warning	Critical	Warning
		RF	Normal	Normal	Attention	Critical	Attention
	CCD	MLR	Normal	Normal	Attention	Warning	Critical
		PCA	Normal	Normal	Warning	Critical	Critical
		RF	Normal	Normal	Attention	Warning	Critical
	HC	MLR	Normal	Normal	Warning	Warning	Concern
		PCA	Normal	Normal	Warning	Critical	Concern
		RF	Normal	Normal	Attention	Warning	Concern

사하고 유량 및 누적강수량의 가중치가 비교적 높게 나타났다. 다중선형회귀와 랜덤포레스트는 BOD와 항목들의 선형 및 비선형관계로 가중치를 적용하였으나 주성분분석은 항목들의 상관관계를 평가할 수 있는 기여율을 가중치로 환산하여 결과 차이가 발생한 것으로 판단된다. 가중치 산정 방법론에 따라 유역 유형별 가중치는 유사한 경향이 나타났다.

3.3 환경가뭄지수 산정

3.3.1 유역 유형별 가중치 적용

각 유형의 특성에 맞는 가중치 산정 방법을 채택하기 위해 기상가뭄을 판단하는 지표인 SPI와 비교를 통해 검증하였다. 다중선형회귀, 주성분분석, 랜덤포레스트 방법론의 가중치를 적용하여 산정한 환경가뭄지수와 1개월 기상가뭄을 판단하는 SPI1을 이용해 방법론끼리 비교하였다. SPI는 습함, 정상, 약한 가뭄(관심), 보통 가뭄(주의), 심한 가뭄(경계), 극심한 가뭄(심각) 5단계로 나뉘며 각 단계에서 산정된 환경가뭄지수의 평균 점수로 단계를 구분하였다(Table 7). 도시유형은 다중선형회귀를 이용한 결과 전반적으로 안정적인 예측이 나타났다. 특히 SPI가 습함 및 정상일 때 환경가뭄지수는 전반적으로 관심단계로 나타났으며 정상에서 약한 가뭄으로 격상할 때 관심 및 주의에서 경계 및 심각으로 단계가 격상하는 것으로 나타났다. SPI가 보통 가뭄 및 심한 가뭄에서도 주성분분석과 랜덤포레스트와 달리 가뭄을 과대하게 산정하지 않으며 특히 심한 가뭄 단계에서 균형을 유지하여 다중선형회귀 방법론을 채택하였다. 농업유형은 랜덤포레스트를 이용했을 때 SPI가 습함 및 정상일 때 환경가뭄지수는 정상 및 관심단계로 안정적인 결과가 나타났다. 또한 보통 가뭄 및 심한 가뭄에서도 과도한 심각 단계의 발생 없이 주로 경계 및 주의 단계로 나타나 과대하게 산정하는 경우가 미비하였다. 반면에 다중선형회귀와 주성분분석은 보통 가뭄 이상에서 과대 산정하는 경향이 있어 안정성이 낮게 나타났다. 랜덤포레스트 방법론이 다른 방법론에 비해 더 안정적이고 과소 평가가 없어 가장 적합한 것으로 판단된다. 산림유형은 랜덤포레스트를 이용했을 때 습함과 정상에서 거의 유사한 결과가 나타났으며 보

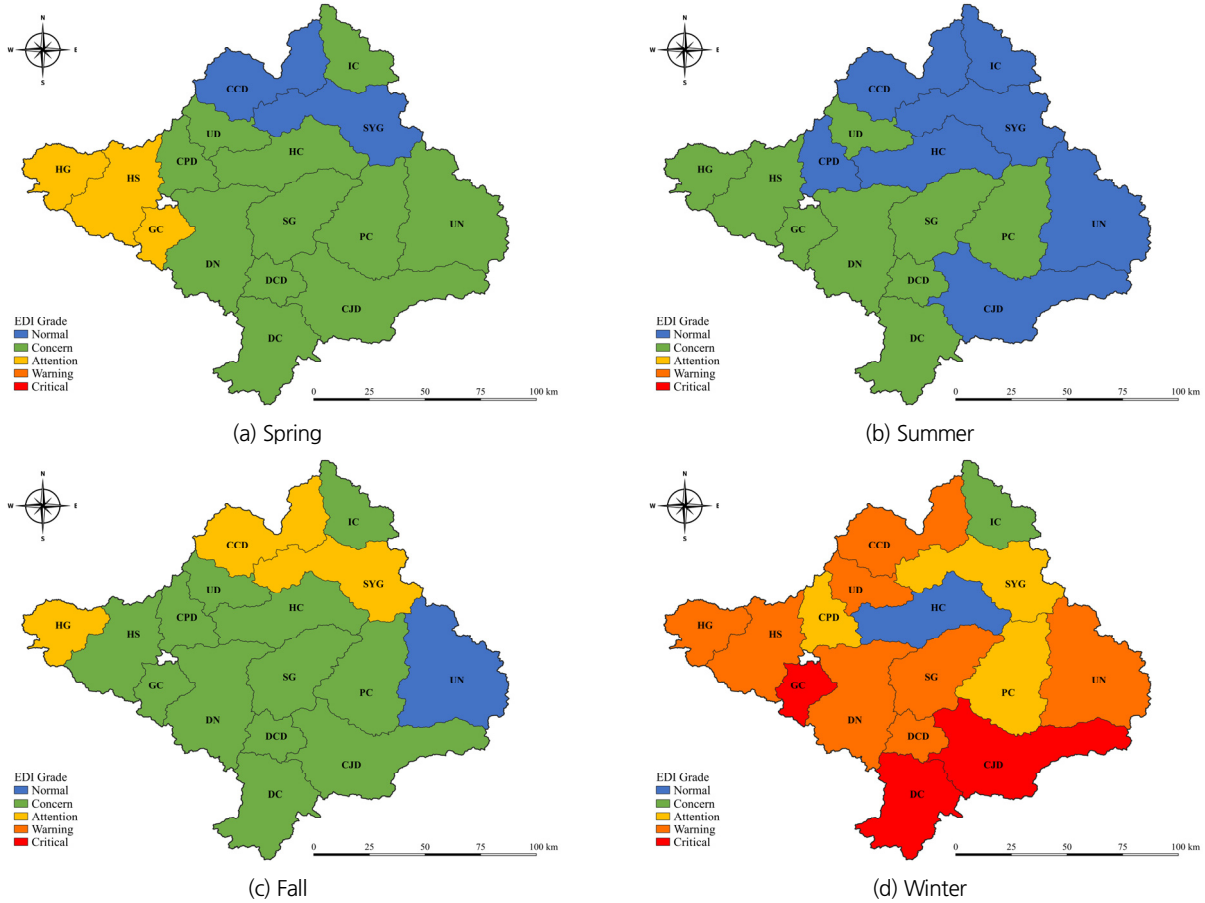

Fig. 2. Results of environmental drought index calculation

통 가뭄과 심한 가뭄에서도 안정적인 결과를 유지했다. 또한 심한 가뭄에서 남한강 상류와 소양강을 제외하면 심각 단계는 미비하였다. 랜덤포레스트 방법론 사용시 비교적으로 과대 산정 없이 안정적인 경향이 나타났으며 다양한 가뭄 상태에서 신뢰할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3.2 유역 유형별 환경가뭄지수 산정

환경가뭄지수를 산정하여 중권역별 계절 평균값을 지도에 나타냈다(Fig. 2). 봄(3-5월)에는 도시유형에서 주의단계, 농업유형에서 관심단계로 나타났으며 산림유형에서는 대부분의 지역에서 관심단계로 나타났으나 소양강 및 춘천댐은 정상단계로 나타났다. 여름(6-8월)에는 도시유형은 관심으로, 농업유형은 대부분의 지역에서 관심단계로 나타났으나 충주댐은 정상단계로 나타났다. 산림유형에서는 전반적으로 정상단계로 나타났으나 의암댐은 관심단계로 나타났다. 가을(9-11월)에는 도시유형에서 한강서울 및 경안천은 관심, 한강고양은 주의로 나타났으며 농업유형에서 전반적으로 관심단계로 나타났다. 산림유형에서는 대부분의 지역에서 관심단계로 나타났으며 소양강 및 춘천댐은 주의로, 남한강상류는 정상으로 나타났다. 겨울(12-2월)에는 도시유형에서 한강서울 및 한강고양은 경계, 경안천은 심각으로 나타났으며 농업유형에서 경계(남한강하류, 섬강, 충주댐하류), 심각(달천, 충주댐), 경계(평창강)으로 나타났다. 산림유형에서 경계(남한강상류, 의암댐, 춘천댐), 주의(소양강, 청평댐), 관심(인북천), 정상(홍천강)으로 나타났다. 봄에는 대부분의 지역에서 관심 및 주의 단계로 가뭄 위험이 있으며 특히 도시유형에서 주의가 필요하다. 여름에는 대부분 관심단계이며 도시, 농업, 산림 순으로 가뭄 위험도가 높게 나타났으나 봄에 비해 전반적으로 가뭄 위험이 감소하였다. 가을에는 한강고양, 충주댐, 소양강, 인북천, 춘천댐, 홍천강에서 단계가 격상하였으며 특히 산림유형의 소양강, 춘천댐에서 가뭄단계가 급격하게 격상하여 가뭄에 대한 즉각적인 대처가 필요할 것으로 판단된다. 겨울에는 대부분의 지역에서 경계와 심각 단계로 가뭄 위험이 급격히 증가하며 특히 도시 및 농업 유형에서 심각한 가뭄 상황이 발생할 가능성이 높아 유역 유형별로 계절에 맞는 가뭄 대비 및 관리가 필요하다.

4. 결 론

본 연구는 기후변화로 인해 심화되는 가뭄이 물 환경에 미치는 영향을 수질 측면에서 정량적으로 평가하기 위해 환경가뭄지수를 개발하는 것을 목표로 하였다. 연구 대상 유역인 한강수계를 토지피복에 따라 도시, 농업, 산림 유형으로 분류하고 다중선형회귀, 주성분분석 및 랜덤포레스트를 사용하여 수질에 영향을 미치는 인자들의 중요도를 평가하고 BOD를 주요 변수로 가뭄의 영향을 분석하였다. 유역 유형에 따라 상이한 가중치를 적용한 결과, 가뭄의 영향이 유형 특성별로 상이하게 나타났으며 이러한 결과는 기후변화에 따른 가뭄 대응 및 관리를 위해서 일률적인 방안이 아닌, 유역 특성에 맞춘 맞춤형 관리 전략이 필요함을 보여준다.

도시유형에서 가뭄 시기에 TOC와 유량이 주요 변수로 작용하여 수질 악화가 뚜렷하게 나타났다. 이는 도시화로 인한 비점오염원 유입과 강수 부족으로 인한 유량 감소가 중첩되면서 오염 물질의 농도가 증가하는 것이 원인으로 해석된다(Jang *et al*., 2010). 특히 도시 지역의 하천은 생활하수와 산업폐수가 주요 오염원으로 작용하므로 이러한 오염원에 대한 효과적인 모니터링 방안이 마련되어야 한다(Kim, 2012). 농업유형에서는 TOC와 EC가 주요 인자로 나타났으며 가뭄시 농업활동으로 인한 비료 및 농약의 유출이 수질에 미치는 영향을 증폭시키기 때문으로 판단된다(Yang, 2006). 산림 지역의 경우 TOC, 유량 및 누적강수량이 주요 변수로 작용했으니 다른 지역에 비해 상대적으로 가뭄의 영향이 적게 나타났다. 이는 산림 지역의 토양 및 식생이 가뭄에 대한 완충 역할을 하여 수질 악화를 완화한 것으로 판단된다.

본 연구에서 개발한 환경가뭄지수는 기상, 수문, 수질을 종합적으로 고려하여 가뭄이 환경에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 도구임을 확인했다. 이와 같은 환경가뭄지수의 활용은 가뭄 상황에 따른 환경적인 관점에서 각 지역의 특성에 맞춘 맞춤형 대책 수립에 기초자료를 제공하고 기후변화에 효과적으로 대응하며 지속가능한 물관리 실현에 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 수생태계 건강성 확보 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(2022003050007).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Abdel-Aty, M.A., and Pemmanaboina, R. (2006). "Calibrating a real-time traffic crash-prediction model using archived weather and ITS traffic data", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 7, No. 2, pp. 167-174.

Bilgin, A. (2018). "Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: A case study Coruh River Basin." *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 190, pp. 1-11.

Cha, K.H., Kim, S.W., Kim, J.H., Park, M.Y., and Kong, J.S. (2015). "Development of the deterioration models for the port structures by the multiple regression analysis and markov chain." *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 28, No. 3, pp. 229-239.

Jang, J.H., Lee, H.J, Kim, H.K., Park, J.H., Kim, J.H., and Rhew, D.H. (2010). "Improvement of water quality and streamflow monitoring to quantify point and nonpoint source pollutant loads." *Journal of Korean Society on Water Quality Environment*, Vol. 26, No. 5, pp. 860-870.

Jang, S.S., Ji, H.S., and Kim, H.K. (2018). "Identifying priority area for nonpoint source pollution management and setting up load reduction goals using the load duration curve." *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 60, No. 5, pp. 17-27.

Jo, B.G., Lee, S.U., Kim, Y.D., and Lee, J.H. (2023). "Drought impact on water quality environment through linkage analysis with meteorological data in Gamcheon mid-basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 56, No. 11, pp. 823-835.

Kim, H.J. (2012) "Current status and environment-friendly development policy of urban riverfront in Korea on the basis of It's locational property" *The Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 12, No. 3, pp. 449-460.

Ko, K.S., Kim, Y.J., Koh, D.C., Lee, K.S., Lee, S.G., Kang, C.H., Seong, H.J., and Park, W.B. (2005). "Hydrogeochemical characterization of groundwater in Jeju Island using principal component analysis and geostatistics." *Economic and Environmental Geology*, Vol. 38, No. 4, pp.435-450.

Lee, S.R., Shin, J.Y., Lee, G.J., Kim, K.S., Lim, K.J., and Kim, J.G. (2018). "Analysis of water pollutant load characteristics and its contributions during dry season: Focusing on major streams inflow into South-Han River of Chungju-dam Downstream." *Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 40, No. 6, pp. 247-257.

Lee, S.U., Jo, B.G., and Kim, Y.D. (2022). "Assessment of water quality index suitability of domestic watersheds." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 55, No. 5, pp. 371-381.

McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, CA, U.S., Vol. 17, No. 22, pp. 179-183.

Nalbantis, I. (2008). "Evaluation of a hydrological drought index." *European Water*, Vol. 23, No. 24, pp. 67-77.

Park, H.S., Kwon, O.H., Park, S.E., and Park, S.H.(2022). "Analysis of factors influencing traffic culture index using principal component analysis and random forest." *Traffic Safety Research*, Vol. 41, No. 1, pp. 3-20.

Seo, J.Y., Lee, J.H., Lee, H.S., and Kim, S.D.(2023). "Probabilistic monitoring of effect of meteorological drought on stream BOD water quality." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 39, No. 1, pp. 9-19.

Shin, S.M., Bae, H.K., Shim, K.H., and Kim, S.M. (2022). "Selecting rivers for management via pollution impact evaluation of tributaries of the Geumho River." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 22, No. 1, pp. 241-250.

U.S. EPA Office of Wetlands, Oceans and Watershed (U.S. EPA) (2007). *An approach for using load duration curves in the development of TMDLs.* Washington, D.C., U.S.

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., and López-Moreno, J.I. (2010). "A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index." *Journal of Climate*, Vol. 23, No. 7, pp. 1696-1718.

Yang, H.K. (2006). "Runoff characteristics of non-point source pollutants in storm event -Case study on the upstream and downstream of Kokseong River, Korea-." *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 41, No. 4, pp. 418-434.

Yoo, J.Y., So, B.J., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2020). "Analysis of drought propagation from meteorological to hydrological drought considering spatio-temporal moving pattern of drought events." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 40, No. 2, pp. 135-143.