



Analysis of effects of drought on water quality using HSPF and QUAL-MEV

Lee, Sangung^a · Jo, Bugeon^b · Kim, Young Do^{c*} · Lee, Joo-Heon^d

^aMaster Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

^bPh.D. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

^cProfessor, Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University, Yongin, Korea

^dProfessor, Department of Civil Engineering, Joongbu University, Goyang, Korea

Paper number: 23-008

Received: 7 February 2023; Revised: 29 May 2023; Accepted: 7 June 2023

Abstract

Drought, which has been increasing in frequency and magnitude due to recent abnormal weather events, poses severe challenges in various sectors. To address this issue, it is important to develop technologies for drought monitoring, forecasting, and response in order to implement effective measures and safeguard the ecological health of aquatic systems during water scarcity caused by drought. This study aimed to predict water quality fluctuations during drought periods by integrating the watershed model HSPF and the water quality model QUAL-MEV. The researchers examined the SPI and RCP 4.5 scenarios, and analyzed water quality changes based on flow rates by simulating them using the HSPF and QUAL-MEV models. The study found a strong correlation between water flow and water quality during the low flow. However, the relationship between precipitation and water quality was deemed insignificant. Moreover, the flow rate and SPI6 exhibited different trends. It was observed that the relationship with the mid- to long-term drought index was not significant when predicting changes in water quality influenced by drought. Therefore, to accurately assess the impact of drought on water quality, it is necessary to employ a short-term drought index and develop an evaluation method that considers fluctuations in flow.

Keywords: Environmental drought, HSPF, QUAL-MEV, Changes of water quality

HSPF 및 QUAL-MEV를 이용한 가뭄이 수질에 미치는 영향 분석

이상웅^a · 조부건^b · 김영도^{c*} · 이주현^d

^a명지대학교 토목환경공학과 석사과정, ^b명지대학교 토목환경공학과 박사과정, ^c명지대학교 토목환경공학과 교수, ^d중부대학교 토목공학과 교수

요 지

최근 이상기후 현상으로 발생빈도 및 규모가 증가한 가뭄은 다양한 분야에서 극심한 문제를 유발하여 가뭄에 의한 물부족 발생 시 수생태 건강성 확보를 위한 합리적인 대응 방안을 마련하기 위해 가뭄 감시, 전망 및 대응기술 개발이 필요하다. 본 연구에서는 유역모델 HSPF와 수질모델 QUAL-MEV를 연계하여 가뭄 기간 물 부족 상태가 수문 순환을 통해 변동되는 수질을 예측하였다. SPI, RCP 4.5 시나리오를 검토하고 HSPF 및 QUAL-MEV를 활용하여 유량변동에 따른 수질변화를 모의하여 유량변동에 따른 수질 변화를 분석하였다. 갈수기 유량과 수질의 관계는 높으나 강수량과 수질의 관계는 미비한 것으로 나타났다. 유량 및 SPI6는 상이한 경향이 나타나 가뭄의 영향으로 변화되는 수질 예측시 중장기 가뭄지수와 관계는 미비한 것으로 나타났다. 가뭄에 의한 수질 영향을 평가하기 위해 단기간의 가뭄지수 활용 및 유량 변동에 따른 평가방안 마련이 필요한 것으로 사료된다.

핵심용어: 환경가뭄, HSPF, QUAL-MEV, 수질 변화

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

1. 서론

최근 이상기후 현상으로 강우 패턴이 변화하면서 홍수 및 가뭄 등 자연재해의 발생빈도 및 규모가 증가하고 있다. 지속적인 평균이하의 강수량으로 물 공급 부족으로 발생하는 가뭄은 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회경제적 가뭄으로 분류된다. 가뭄은 장기간으로 지속되어 경제적, 환경적, 사회적으로 미치는 직간접적인 영향에 따라 점진적으로 광범위한 피해가 발생되어 비용손실이 크게 나타난다. 국내에서는 6월 이전에 발생한 가뭄은 여름철 장마 및 태풍이 발생하는 시기에 내리는 강수량의 영향으로 해소되거나 충분한 강수량이 내리지 못할 경우 극심한 가뭄으로 확대될 가능성이 나타난다(Yoo *et al.*, 2020). 강수량 감소 및 증발산량 증가로 발생하는 기상학적 가뭄은 지하수위 저하, 지표유출, 중간류유출 및 지하수유출 등에 의해 하천으로 유입하는 유량을 감소시킨다. 이러한 물부족에 의해 발생하는 가뭄은 다양한 분야에서 극심한 문제를 유발하여 가뭄에 의한 물부족 발생 시 수생태 건강성 확보를 위한 합리적인 대응 방안을 마련하기 위해 가뭄 감시, 전망 및 대응기술 개발이 필요하다.

가뭄을 모니터링 하기 위해 개발된 가뭄지수를 활용하여 정량적으로 평가하는 연구가 진행되고 있다. Kwak *et al.* (2022)은 용수공급 체계를 마련할 수 있는 평가 방법을 제시하기 위해 의령군을 대상으로 가뭄지수(Standardized Precipitation Index, SPI), 가뭄취약성 지수(Drought Vulnerability Index, DVI), 가뭄 위험요소 지수(Drought Hazard Index, DHI)를 산정하였다. Yoo *et al.* (2017)은 효율적인 가뭄관리 및 갈수관리를 위해 가뭄지수인 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI), 표준유출지수(Standardized Runoff Index, SRI) 및 Lombard 기법과 가중치를 적용한 수정된 유량누가가뭄지수(Streamflow Accumulation Drought Index, SADI)를 ROC 곡선을 활용하여 갈수예보 기준유량과 가뭄지수간의 일관성을 평가하였다.

또한, 인공신경망 모형 및 물리모형을 활용하여 증장기 가뭄을 예측하였다. Jeong *et al.* (2016)은 증장기 가뭄예측을 위해서 MLP-ANN 모형에 월단위의 SPI를 적용하여 가뭄을 예측하고 가뭄의 선행예측 기간을 확인하여 예측성능을 평가하였다. Choi *et al.* (2019)는 기존의 가뭄지수를 활용한 가뭄예측은 수요 및 공급 지표로 활용하기 어렵다고 판단하여 장기유출모델인 SWAT을 활용하여 갈수기와 같은 유량이 감소하는 기간에 취수 가능 일수 및 취수원의 영향 범위를 제시하였다. Jeong *et al.* (2018)은 농업유역에서 기후변화가 하천 유량에 미치는 영향을 분석하기 위해 유역모델 STREAM을

적용하여 하천 유출 특성을 분석하였다. 현재 가뭄 모니터링을 위해 지수를 활용하여 가뭄을 평가하고 인공신경망 모형과 물리모형을 통해 가뭄 및 유량 변화를 예측하고 있지만 유량 부족에 따른 환경적 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다. 가뭄이 수질에 미치는 영향으로 Lee *et al.* (2018)은 섬강, 청미천, 양화천 및 북하천의 유황곡선을 작성하여 BOD, T-P별 부하지속곡선을 작성하여 갈수기 목표수질 초과율을 계산하였을 때, 목표수질 대비 50% 이상으로 분석되어 갈수기 유량 확보 방안을 마련하는 것이 필요한 것으로 판단하였다. Yoo *et al.* (2021)은 베이지안 네트워크 모형을 활용하여 가뭄에 의한 수질관리 영향을 평가하였을 때, 낙동강 유역 내 50% 이상의 중권역에서 가뭄의 영향으로 목표수질 달성비율이 감소한 것을 분석하였다.

따라서 본 연구에서는 불투수지역과 투수지역의 유출을 물수지로 분석하여 유량 모의가 가능한 HSPF와 하천의 흐름선을 축으로 완전혼합을 가정하고 수지형 하천의 수질변화 모의에 적합한 QUAL-MEV를 연계하여 시나리오별 가뭄 기간 물 부족 상태가 수문 순환을 통해 변동되는 수질을 예측하고자 한다. 가뭄시 물부족의 영향을 검토하고자 HSPF로 모의된 유량을 QUAL-MEV의 입력자료로 수질 변화를 모의하여 가뭄에 의한 수질의 환경적 피해 감시 및 전망 기술 마련에 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 대상 유역 선정

감천 중권역에 해당하는 구미, 김천은 대규모 산업공단이 밀집되어 환경기초시설의 영향이 크게 나타난다(Jung *et al.*, 2021). 김천시는 용수수요가 변화되고 수원인 하천수와 저수지의 부족으로 빈번한 가뭄피해가 발생되고 있다(Kim *et al.*, 2021). 유황상태를 정의하는 유량변동 계수는 연중 최대유량과 최소유량 비로 산정되는데 국내 하천의 유량변동계수는 200~700 사이로 도시화의 영향으로 유량변동계수가 증가하고 여름철 집중되는 강우 및 유출량의 계절적 영향으로 홍수 및 가뭄 피해, 이수 및 취수가 한정적이다. 유량변동 계수를 인위적으로 감소하기 위해 건설된 댐은 유량 조절과 수질 개선에 효과적으로 유량변동계수 변화를 분석하였을 때 대규모 준설 이후 유량변동 계수가 개선되었다(Lee *et al.*, 2014). 감천유역의 김천부항댐 건설로 김천교와 선주교 지점 모두 하천의 침식이 발생하였으며, BOD는 최댓값과 최솟값의 차이가 증가하고 T-P는 감소하는 경향이 나타났다(Cho *et al.*, 2019).

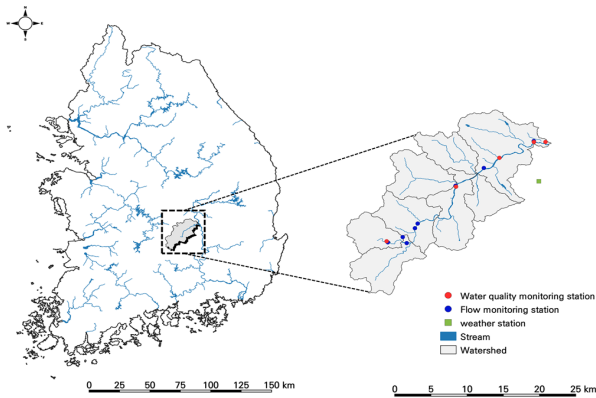


Fig. 1. Research target watershed: Gamcheon mid-watershed

기상학적 영향이 수질 변동에 미치는 영향을 파악하고자 2014년 김천부항댐이 준공된 감천 중권역을 대상 유역으로 선정하고 댐 준공 완료 이후 유황의 안정화를 고려하여 자료 구축 기간을 2016년부터 2020년으로 수행하였다. 감천 중권역의 유역도는 Fig.1과 같다.

2.2 HSPF (Hydrological Simulation Program-FORTRAN)

유역모델 HSPF는 장기유출 모형으로 수리수문 및 수질 모의를 통해 수질개선효과, 유역내 오염원 변화 등 유역관리를 목적으로 다양한 분야에 적용이 가능한 준분포형 장기 유출모델이다(Cho and Kim, 2019). HSPF는 투수 및 불투수면을 강우에 의한 개별적인 유출량과 비점오염원으로 모의하며, 불투수 지역에서는 지표유출만 발생하고 투수 지역에서는 지표유출, 중간유출 및 기저유출이 발생한다(Lee et al., 2019b).

HSPF 모형은 수치표고모델, 유역도, 하천차수도 및 토지이용도 자료를 BASINS를 이용하여 감천 중권역을 10개의 소유역으로 구축하였다. HSPF의 입력자료는 기상자료와 전국오염원조사의 환경기초시설 방류량 자료를 활용하였다. 기상자료는 감천 유역에 영향을 미치는 구미, 추풍령, 상주 기상관측소의 시간 단위의 기온, 강수량, 이슬점온도, 전운량, 일사량 자료는 WDMUtil를 이용하여 WDM 파일로 생성하였으며, 구축된 자료를 활용하여 일단위의 최대온도, 최소 온도, 평균 이슬점, 평균 강수량, 평균 운량, 일 일사량, 일 풍속 및 증발산 관련 자료를 구축하였다.

구축한 HSPF로 모의되는 유량의 예측 정확도를 높이기 위해 모의 유량이 실측 유량을 반영하도록 허용범위 내에서 매개변수를 수정하여 보정 및 검증을 수행하였다. 보정 및 검증 결과를 평가하기 위해 상대오차범(%difference)과 결정계수(R^2) 기준을 이용하였다. Eqs. (1)~(2)은 %difference, R^2 관계식을 정리하였다. 여기서, O_i 및 \bar{O} 는 실측값 및 실측값의 평균

을 의미하며, P_i 및 \bar{P} 는 예측값 및 예측값의 평균, N 은 데이터의 수를 의미한다.

$$\%difference = \frac{\sum_{i=1}^N O_i - \sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100 \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\left\{ \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \right\}^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2} \quad (2)$$

2.3 QUAL-MEV

수질모델 QUAL-MEV는 QUAL2E를 기반으로 개발된 하천 수질 모델로 하천 흐름선을 축으로 완전혼합을 가정하여 수지형 하천의 수질변화 모의에 적합하다. 하천 유역의 유량과 유입되는 부하량 등을 정상상태 조건에서 모의되며, 하천 수질을 결정하는 오염부하의 영향과 비점오염원에 의한 오염부하량의 영향을 분석하기 위해 활용된다. DO, BOD, Chl-a, 질소 및 인 등에 대하여 모의 할 수 있다. TOC와 COD 농도는 BOD 농도로 환산하는 기능을 포함하고 오염물질의 유입 과정과 용수의 취수 및 지류의 유입 등을 고려하여 수질변화를 계산한다.

QUAL-MEV를 이용하여 수질 변화를 모의하기 위해 감천 상류부터 유역 말단까지 31 km를 7개의 Reach와 1 km 범위로 31개의 Element, 지류하천, 환경기초시설을 구분하여 모델을 구축하였다. QUAL-MEV 모형으로 수질 변화를 모의하기 위해 보정 및 검증을 수행하여 수질 재현성을 검토하였다. QUAL-MEV의 보정은 관측값과 모의값의 차가 최소가 될 때까지 반복하였다. 모형의 검증은 보정된 반응계수를 검증기간의 자료로 모의하였을 때 모의결과가 관측값의 오차범위 내에 포함되도록 수행하였다. 이때 오차범위는 일반적으로 사용되는 20% 이내로 검보정을 수행하였다.

QUAL-MEV는 수질 모의 및 분석에 중점을 두는 반면 HSPF는 수문학 및 하천 흐름을 모의하여 물리모델을 연결하면 수문학 과정과 수질 역학의 통합적인 분석이 가능하다. 이러한 모델 연계를 통해 수문학적 요인이 수질에 미치는 영향과 수질 변화가 하천 흐름에 미치는 영향을 보다 전반적으로 이해할 수 있다.

2.4 시나리오 선정

대상유역인 감천 중권역의 가뭄과 기상학적 영향에 따른 유

량변동에 따른 수질 변화를 모의하기 위해 SPI 지수와 IPCC AR5(RCP4.5) 기후변화 시나리오를 검토하였다. 6개월 누적 강수량 기준으로 산정하는 SPI6를 활용하여 가뭄시기를 구분하기 위해 유역말단에 위치한 구미 관측소의 SPI6를 활용하여 시나리오 기준연도를 선정하였다(Table 1). 또한, 기후시나리오를 검토하기 위해 RCP 시나리오를 적용하고자 하였다. RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 및 RCP 8.5는 RCP 8.5 시나리오로 갈수록 많은 온실가스가 배출되는 것으로 가정되며, 국내 온실가스 저감정책을 반영하고 있는 것으로 보고되고 있는 RCP 4.5 시나리오를 선정하였다(Park et al., 2013). RCP 4.5 시나리오가 적용된 HadGEM3-RA 모델을 통해 2001년부터 2100년까지 일별 강우자료가 제공되는 73개 관측지점에서 유역말단에 위치한 구미 관측소의 연도별 강수량 비교를 통해 극한 강우사상을 시나리오 기준연도로 선정하였다.

시나리오는 HSPF 및 QUAL-MEV 모형의 검보정을 수행한 2016년부터 2021의 SPI6를 기준으로 가뭄 영향이 높게 나타나는 연도를 시나리오1, 가뭄 영향이 낮게 나타나는 연도를 시나리오2로 설정하였다. 또한, RCP 4.5 시나리오의 강수량을 활용하여 연도별 강수지수를 산정하여 시나리오를 선정하였다. 강수지수는 총 강수량으로 산정하는 TotalDR (Total 1 Year Duration Rainfall), 1 mm/day 이상의 강수 일수를 연 총 강수량으로 나눈 SDII (Simple Daily Intensity Index) 및 3일 최대 강수량으로 평가하는 R3day (Rainfall 3-day max)을 활용하여 극한강수 사상을 평가하였다.

3. 연구결과

3.1 HSPF 및 QAUL-MEMV 재현성 평가

HSPF를 통해 모의된 유량의 재현성을 평가하기 위해 감천 유역 말단에 위치한 구미시(선주교) 유량 관측소에서 관측된 유량과 HSPF 모형으로 모의된 유량의 %difference와 R²로 평가하였다. 보정기간으로 선정한 2016년부터 2018년의 %difference 및 R²는 각각 -2.040, 0.745로 평가되고 검증기간으로 선정한 2019년부터 2021년의 %difference 및 R²는 각각 8.735, 0.781로 통계적으로 유의한 결과가 나타났다(Fig. 2).

HSPF에서 모의된 유량을 사용하여 BOD, T-P 변화를 모의하기 위해 QUAL-MEV의 보정 및 검증을 수행하였다. 유량 변화에 따른 수질을 모의하기 위해 수질오염총량관리제의 기준 유량 시기인 저수기(Q₂₇₅)와 평수기(Q₁₈₅) BOD, T-P를 대상으로 검보정을 수행하였다. 감천 중권역의 수질 측정망인 감천1, 감천2, 감천3 및 감천4에서 측정된 자료와 QUAL-MEV 모형으로 모의된 BOD, T-P의 오차범위를 평가하였을 때 모의된 BOD, T-P는 감천1 지점부터 감천4지점의 측정값의 20% 범위로 모의되어 구축된 QUAL-MEV 모형의 보정과 검증이 적절하게 이루어진 것으로 판단된다(Fig. 3). HSPF 및 QUAL-MEV 보정에 활용된 매개변수, 기준 및 입력값은 Table 2와 같다.

3.2 시나리오 선정

본 연구에서는 시나리오별 가뭄 기간 물 부족 상태가 수문 순환을 통해 변동되는 수질을 예측하기 위해 모델의 재현성을

Table 1. Condition of SPI evaluation

Drought Standard	Wet	Normal	Mild drought	Moderate drought	Severe drought
SPI Range	1.00 ≤ SPI	0.99 to -0.99	-1.00 to -1.49	-1.50 to -1.99	SPI ≤ -2.00

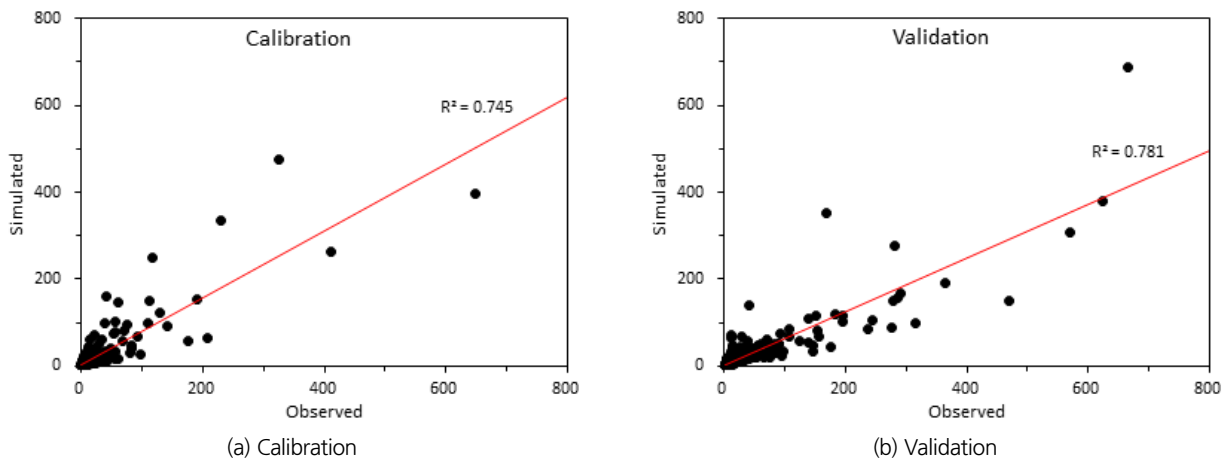


Fig. 2. Results of HSPF model calibration and validation

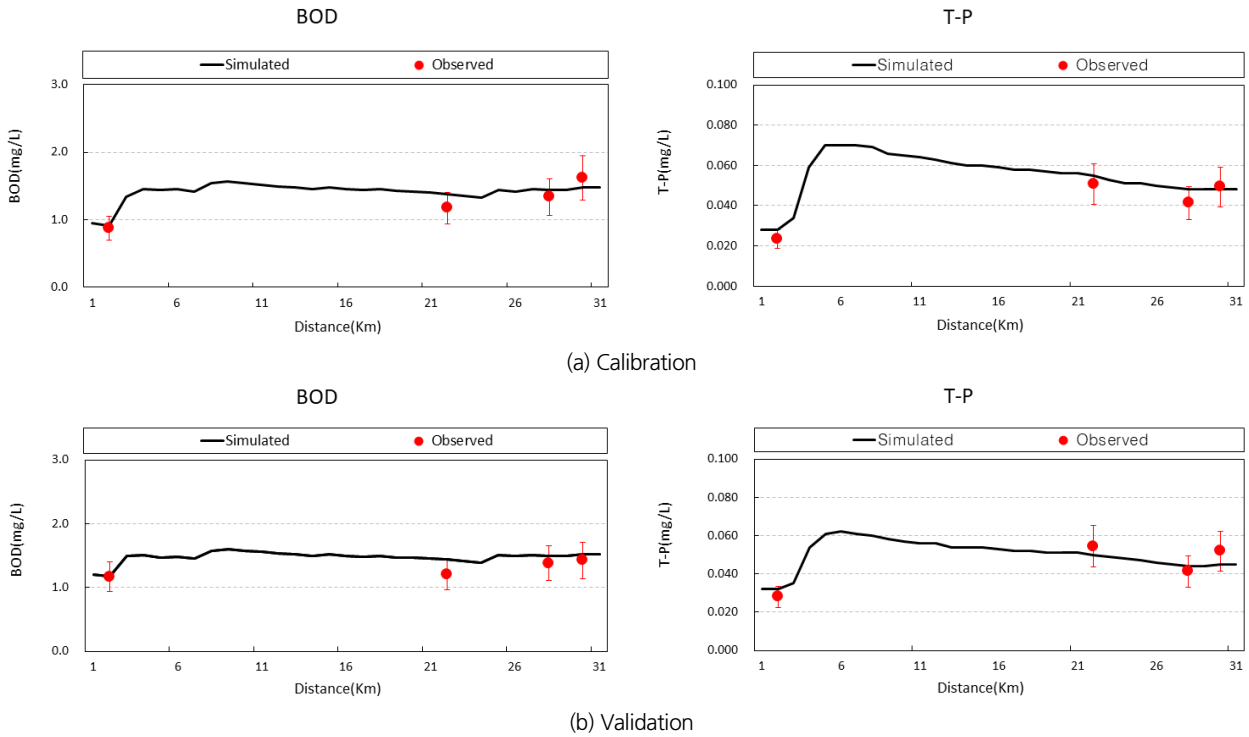


Fig. 3. Results of QUAL-MEV model calibration and validation

Table 2. Calibrated parameter values (Lee *et al.*, 2019a)

Model	Parameter	Definition	Model range	Calibrated value
HSPF	LZSN	Lower zone nominal Storage	0.01-100.0	4.0 – 6.5
	AGWRC	Groundwater recession coefficient	0.001-0.999	0.98
	Deeper	Fraction of groundwater inflow to deep recharge	0.0-1.0	0.1-0.2
	INTFW	Interflow inflow	0.0-None	0.75 – 10.0
QUAL-MEV	K1	BOD 분해율계수	0.02-3.40	0.08
	K3	침전에 의한 BOD 제거율	-0.36-0.36	0.12
	O-N HYDROLYSIS	유기질소의 가수분해율 계수	0.02-0.4	0.05
	O-N SETTLING	유기질소의 침전율 계수	0.001-0.1	0.01-0.81
	NH3 OXYDATION	암모니아 산화율 계수	0.1-1.0	0.05
	NH3 BENTHOS	암모니아 저질발생을	Variable	0.0
	NO2 OXYDATION	아질산 산화율 계수	0.2-2.0	1.0
	O-P DECAAY	유기인의 사멸률 계수	0.01-0.7	0.2
	O-P SETTING	유기인의 침전율 계수	0.001-0.1	0.01-0.61
O-P BENTHOS	용존인의 저질 용출율	Variable	0.0	

평가한 2016년부터 2021년은 기상청에서 제공되는 구미 관측소의 표준강수지수 SPI6를 활용하고 RCP 4.5 시나리오의 2001년부터 2100년의 강수량 자료를 활용하여 시나리오를 선정하였다.

시나리오1과 시나리오2는 연도별 SPI6를 가뭄단계 기준으

로 해당 일수를 산정하여 가뭄 위험도를 평가하였다. 습함 단계가 249일, 보통 단계가 116일이며, 보통가뭄 단계는 0일로 가뭄위험도가 비교적 낮은 2020년을 시나리오1로 선정하였다. 약한가뭄 단계가 160일, 보통가뭄 단계가 54일, 심한가뭄 단계가 14일로 평가기간 중 가뭄 위험도가 높은 2017년을 시나리

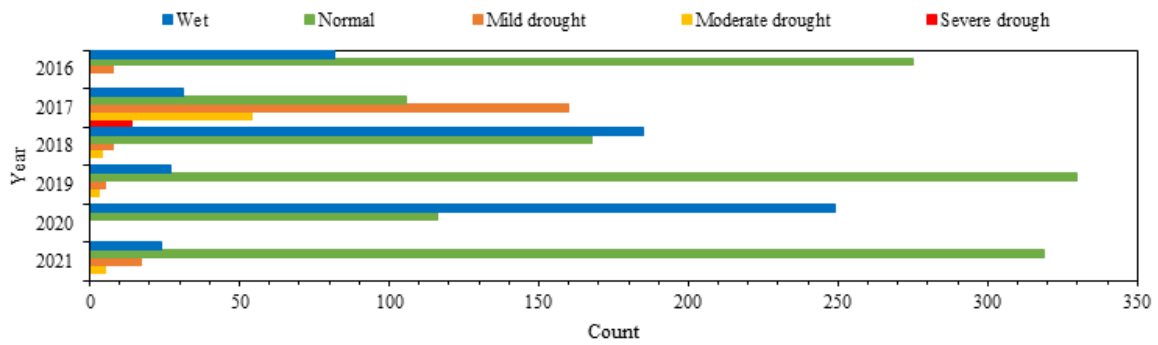


Fig. 4. SPI evaluation during the study period

오2로 선정하였다(Fig. 4). 2003년의 TotalDR은 1789.3 mm, SDII는 16.7 mm/day로 가장 높았으며, R3day는 175.8 mm로 비교적 높게 나타나 시나리오3으로 선정하였다. 2077년의 TotalDR은 647.0 mm, SDII는 5.4 mm/day로 가장 낮았으며, R3day는 56.8 mm로 비교적 낮게 나타나 시나리오4으로 선정하였다(Table 3).

3.3 유량변화에 따른 수질 변화

표준강수지수 SPI6로 선정한 시나리오1, 시나리오2와 RCP 4.5 강수량 자료로 선정한 시나리오3, 시나리오4의 강수량 자료를 HSPF 모형의 기상자료로 입력하여 기후변화에 따른 유량변화를 모의하였다. 유량 변동에 의한 수질을 모의하기 위해 시나리오별 모의된 유량을 QUAL-MEV의 유입유량으로 입력자료를 구축하고 입력자료는 모의된 유량을 초과유량 백분율로 계산하여 유황을 구분하였다(Eq. (3)). 유황은 LDC curve 결과 해석에서 초과 유량 확률을 기준으로 유황을 구분한 방법을 활용하여 초과유량백분율을 풍수기(10~40%), 평수기(40~60%), 저수기(60~90%), 갈수기(90~100%)로 구분하고 QUAL-MEV의 입력자료는 초과확률백분율의 10% 등간격에 해당하는 유입유량으로 시나리오별 수질을 모의하였다.

시나리오1 부터 시나리오4의 평균 BOD는 1.2 mg/L, 1.3 mg/L, 1.1 mg/L, 1.4 mg/L로 나타나고 평균 T-P는 0.035 mg/L, 0.039 mg/L, 0.034 mg/L, 0.042 mg/L로 나타났으며, 시나리오별 모의한 BOD, T-P는 유량이 감소함에 따라 농도가 증가하는 경향이 나타났다. 시나리오1은 저수기에서 1.3 mg/L인 BOD가 갈수기에 1.5 mg/L로 16% 증가하고 T-P는 0.040 mg/L에서 갈수기에 0.043 mg/L로 7% 증가하였으며, BOD 및 T-P는 저유량에서 각각 56%, 61% 증가하였다. 시나리오2에서는 평수기 1.3 mg/L인 BOD가 저수기에 1.5 mg/L로 15% 증가하였고 T-P는 0.040 mg/L에서 저수기에 0.043 mg/L로 7% 증가하였으며, BOD 및 T-P는 저유량에서 61%, 68%로 높은 증

가율이 나타났다. 시나리오3에서 BOD 및 T-P의 증가율은 미비하게 나타났으며, BOD 및 T-P는 저유량에서 29%, 43%로 낮은 증가율이 나타났다. 시나리오4에서는 풍수기 1.3 mg/L인 BOD가 평수기에 1.5 mg/L로 15% 증가하였고 T-P는 0.040 mg/L에서 평수기에 0.043 mg/L로 7% 증가하였으며, 고유량에서 BOD 및 T-P는 저유량에서 58%로 증가하였다(Fig. 5). 이때 시나리오2 보다 유량이 적은 시나리오4의 비교적 낮은 증가율은 시나리오2의 유황별 유량 감소율이 시나리오4 보다 3% 높게 나타나는 것으로 사료된다.

$$\begin{aligned} \text{Percent of days flow exceed}(\%) \\ = \text{Rank} / \text{Number of data} \times 100 \end{aligned} \quad (3)$$

수질, 강수량 및 유량의 관계를 통해 수질변화를 분석하기 위해 시나리오별 모의되는 수질, 유량 및 강수량을 매개변수로 활용하여 상관분석을 수행하였다. 풍수기에서는 유량과 강수량의 상관관계는 0.742로 양(+)의 상관관계가 나타났으며, BOD 및 T-P는 강수량과 -0.722로 음(-)의 상관관계가 강하게 나타나 강수에 의한 유량 증가로 수질 농도가 감소하는 것으로 분석되었다. 저수기에는 유량과 강수량의 상관관계는 -0.558로 음(-)의 상관관계가 나타났으며, T-P와 강수량은 0.432, T-P와 유량은 -0.988로 유량이 증가함에 따라 T-P 농도는 감소되거나 강수에 의한 농도 증가가 나타나는 것으로 판단된다. 평수기와 갈수기에서는 유량과 BOD 및 T-P가 -0.991, -0.989 음(-) 상관관계가 강하게 나타나 유량 증가로 수질 농도가 감소하는 것으로 분석되었다(Fig. 6). 갈수기에서는 수질은 강수량과 상관관계가 낮게 나타나고 유량과 상관관계가 높게 나타나며, 유량 및 SPI 자료가 있는 시나리오1과 시나리오2를 도식화하였을 때 시나리오1은 SPI가 Normal에서 Wet으로 평가되었으나 저유량에서 SPI가 높게 산정되는 경향이 나타나고 시나리오2에서는 Severe drought에서 Wet으로 평가되었으나 고유량에서 Mild drought로 평가되었다(Fig. 7).

Table 3. Assessment of the precipitation index

Year	TotalDR (mm)	SDII (mm/day)	R3day (mm)	Year	TotalDR (mm)	SDII (mm/day)	R3day (mm)
2001	1137.7	16.0	181.0	2051	1009.1	6.6	90.2
2002	770.3	10.8	104.9	2052	1293.9	7.5	131.5
2003	1366.0	15.9	198.1	2053	928.3	6.3	111.9
2004	1789.3	16.7	175.8	2054	1517.0	8.9	151.4
2005	1336.6	14.4	236.4	2055	1212.9	7.3	98.0
2006	1036.1	11.4	168.9	2056	960.6	6.4	114.1
2007	1275.2	14.0	217.6	2057	1193.7	7.7	115.3
2008	1538.2	14.8	238.8	2058	1104.1	7.7	120.8
2009	786.3	8.5	151.0	2059	1136.9	9.6	163.5
2010	769.1	7.7	77.9	2060	1435.9	8.9	171.1
2011	1190.4	9.9	144.2	2061	996.8	7.0	134.8
2012	1654.4	9.8	196.9	2062	1683.7	9.6	186.3
2013	752.0	5.7	59.7	2063	1247.7	8.1	278.4
2014	1189.1	8.6	122.2	2064	1607.6	11.1	286.9
2015	1141.2	7.5	112.6	2065	1210.2	7.2	105.3
2016	1130.3	8.1	137.9	2066	1013.7	6.9	71.0
2017	1087.5	6.9	90.3	2067	824.7	7.2	142.7
2018	952.5	7.9	110.1	2068	1544.6	10.0	210.9
2019	1448.0	9.7	273.0	2069	1183.4	7.6	99.0
2020	925.7	6.5	58.4	2070	1403.4	10.6	330.2
2021	1016.6	6.7	146.3	2071	1487.2	8.4	232.6
2022	1249.0	8.3	127.1	2072	1421.4	7.5	84.7
2023	1018.5	8.2	82.2	2073	1388.8	9.6	175.5
2024	1165.2	7.3	171.3	2074	1422.1	8.7	118.4
2025	1554.1	8.8	180.0	2075	1111.9	7.2	155.5
2026	1421.1	11.9	148.6	2076	1289.1	8.9	142.0
2027	1004.4	9.1	96.9	2077	647.0	5.4	56.8
2028	1185.4	8.5	103.5	2078	992.2	6.5	81.2
2029	1238.6	8.5	118.9	2079	1049.3	7.6	147.9
2030	1243.3	8.4	164.3	2080	1102.6	7.6	112.7
2031	1261.0	7.9	119.4	2081	1264.7	7.2	131.2
2032	1365.8	9.2	173.4	2082	1464.2	10.0	182.9
2033	1127.7	7.9	104.2	2083	721.7	5.5	81.2
2034	1179.1	9.2	130.6	2084	907.6	6.1	74.6
2035	1512.2	9.4	174.1	2085	1023.8	8.1	106.6
2036	1163.6	7.1	91.7	2086	1112.3	7.9	113.7
2037	1283.4	7.5	91.1	2087	1001.5	9.7	206.1
2038	1446.8	9.8	269.1	2088	1083.8	8.0	114.0
2039	1204.9	7.3	112.5	2089	1296.3	8.9	99.3
2040	977.7	6.5	64.6	2090	1437.0	8.3	283.4
2041	821.4	5.6	82.3	2091	1308.7	7.6	138.7
2042	1282.9	9.0	119.7	2092	1149.3	8.0	150.8
2043	810.7	7.0	110.4	2093	1101.4	6.3	132.5
2044	1321.4	8.6	157.9	2094	1342.0	9.3	288.7
2045	1219.5	7.3	82.0	2095	1194.3	7.4	206.4
2046	1402.4	9.4	268.6	2096	1310.7	8.4	109.8
2047	995.8	6.1	51.9	2097	1433.4	7.5	100.3
2048	982.1	6.2	73.9	2098	892.5	6.0	136.2
2049	967.4	7.6	89.0	2099	1495.7	11.0	149.7
2050	1073.3	7.9	137.2	2100	1172.8	7.3	83.3

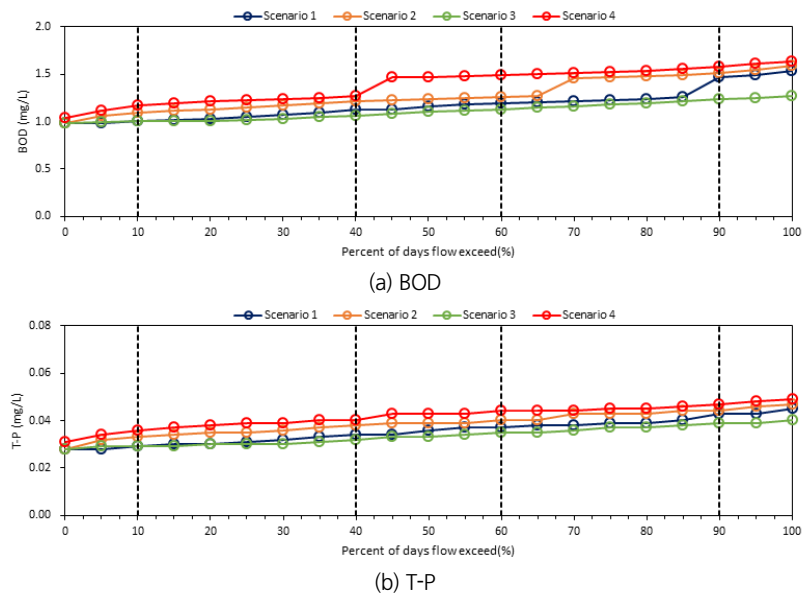


Fig. 5. Water quality change according to flow rate change

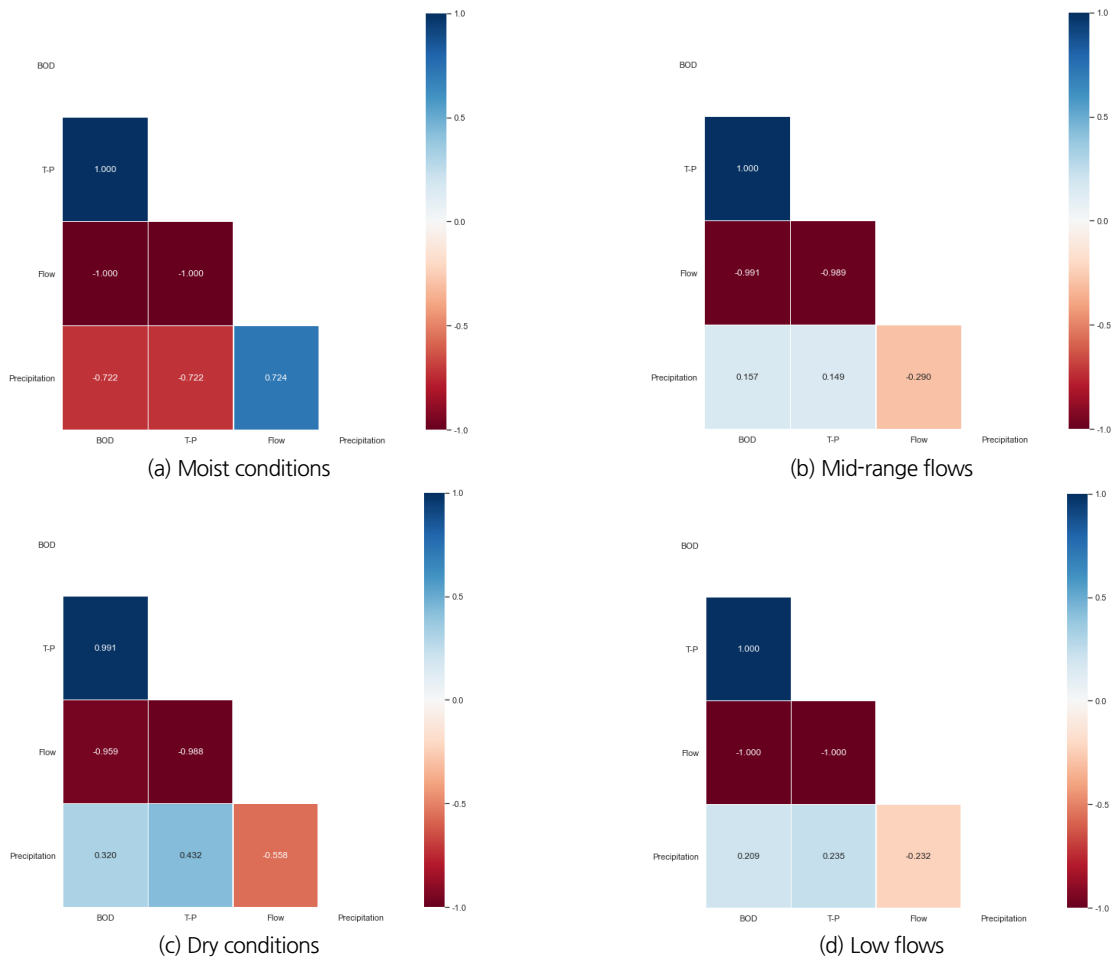


Fig. 6. Water quality-precipitation-flow correlation analysis by scenarios

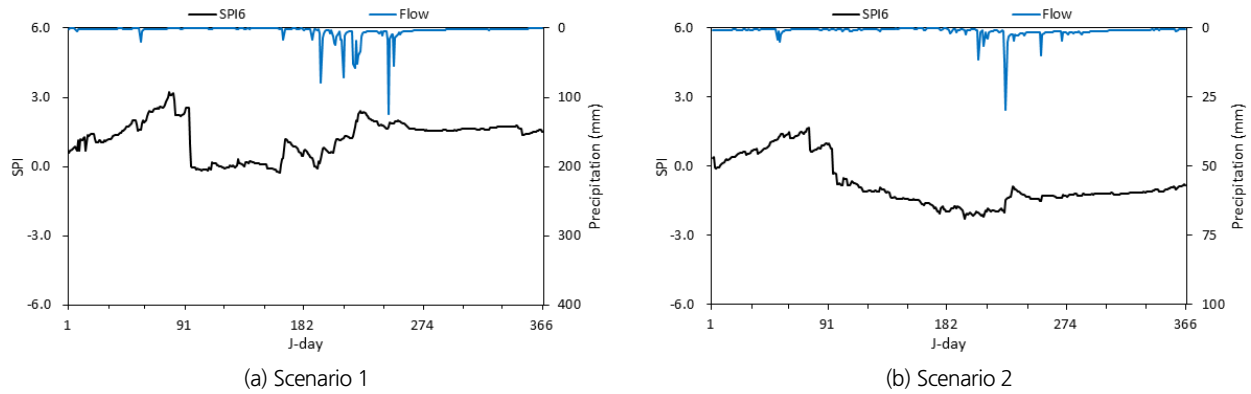


Fig. 7. Trends of Flow-SPI

4. 결론

가뭄 시기 물 부족 상태가 수문 순환을 통해 수질에 미치는 영향을 예측하기 위해 유역모델 HSPF와 수질모델 QUAL-MEV를 활용하여 유량변동에 따른 수질 변화를 모의하였다. 물리 기반 모델의 재현성을 평가하기 위해 HSPF를 통해 모의된 유량을 보정기간은 2016년부터 2018년, 검증기간은 2019년부터 2021년으로 설정하여 구미시(선주교) 지점의 실측유량과 모의유량을 %difference와 R^2 를 평가하였다. 보정기간의 %difference 및 R^2 는 각각 -2.040, 0.745로 나타나고 검증기간의 %difference 및 R^2 는 각각 8.735, 0.781로 산정되어 모형의 재현성이 적절한 것으로 평가하였다. QUAL-MEV는 BOD, T-P의 실측값과 모의값의 오차율은 20%로 재현성도 적절한 것으로 평가하였다.

유량 변동에 의한 수질을 모의하기 위해 SPI6와 RCP 4.5 강수량 자료로 선정한 시나리오별 모의한 유량을 LDC curve 결과 해석에서 활용하는 초과유량백분율을 통해 유황을 구분하여 QUAL-MEV 입력자료를 구축하였다. 갈수기 수질은 유량 변동이 큰 시나리오2에서 수질농도 증가율이 높게 나타났다. 수질, 유량 및 강수량을 매개변수로 상관분석을 수행하였을 때 갈수기 유량과 BOD 및 T-P가 음(-) 상관관계가 높으나 강수량과 수질의 상관관계는 미비한 것으로 나타났다. 저유황에서 수질 오염은 크게 나타났으나 유량 및 SPI6는 상이한 경향이 나타나 가뭄의 영향으로 변화되는 수질 예측시 중장기 가뭄지수와 관계는 미비한 것으로 나타났다. 가뭄에 의한 수질 영향을 평가하기 위해 단기간의 가뭄지수 활용 및 유량 변동에 따른 평가방안 마련이 필요한 것으로 사료되며, 유역모델과 수질모델 연계를 통해 예측한 수질변화 특성은 향후 가뭄 전망시 효과적인 수질관리에 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

- Cho, H.K., and Kim, S.M. (2019). "Estimation of the Hapcheon Dam inflow using HSPF Model." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 61, No. 5, pp. 69-77.
- Cho, Y.H., Pakr, S.Y., Na, J.M., Kim, T.W., and Lee, J.H. (2019). "Hydrological and ecological alteration of river dynamics due to multipurpose dams." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 21, No. s-1, pp. 16-27.
- Choi, J.R., Jo, H.J., La, D.H., and Kim, J.T. (2019). "A study on drought prediction and diffusion of water supply intake source using SWAT model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 39, No. 6, pp. 743-750.
- Jeong, E.S., Cho, H.L., and Koo, B.K. (2018). "Analysis of the impact of droughts on river flows in an agricultural watershed using a semi-distributed watershed model STREAM." *Journal of the Korean Society for Marine Environment & Energy*, Vol. 21, No. 4, pp. 398-410.
- Jeong, M.S., Kim, J.S., Jang, H.W., and Lee, J.H. (2016). "ROC evaluation for MLP ANN drought forecasting model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 10, pp. 877-885.

- Jung, W.S., Kim, S.E., and Kim, Y.D. (2021). "Analysis of influential factors of cyanobacteria in the mainstream of Nakdong River using random forest." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 27-34.
- Kim, J.E., Lee, B.S., Yoo, J.Y., Kwon, H.H., and Kim, T.W. (2021). "Low-flow frequency analysis and drought outlook in water districts under climate change scenarios: A case study of Gimcheon-si, Korea." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 23, No. 1, pp. 14-26.
- Kwak, J.S., Kim, G.S., Jung, Y.H., and Um, M.J. (2022). "Drought assessment with SPI and DRI in Uiryeong-Gun." *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 42, No. 4, pp. 457-467.
- Lee, H.J., Kim, K.U., Song, J.H., Lee, D.G., RHee, H.P., and Kang, M.S. (2019a). "Pollutant delivery ratio of Okdong-cheon watershed using HSPF Model." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 61, No. 1, pp. 9-20.
- Lee, K.S., Ryu, J.K., and Ahn, S.J. (2014). "Change of regime coefficient due to dredging and dam construction." *Journal of Korean Environmental Dredging Society*, Vol. 4, No. 1, pp. 30-38.
- Lee, S.R., Shin, J.Y., Lee, G.J., Sung, Y.S., Kim, K.S., Lim, K.J., 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." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 40, No. 6, pp. 247-257.
- Lee, S.Y., Kim, J.M., Shin, H.S., and Kwon, S.C. (2019b). "Evaluation of riparian buffer for the reduction efficiency of non-point sources using HSPF Model." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 1, pp. 341-349.
- Park, J.H., Kang, M.S., Song, I.H., Hwang, S.H., and Song, J.H. (2013). "Development of IDF curves based on RCP4.5 scenario for 30-reservoirs in South Korea." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 6, pp. 146-159.
- Yoo, J., Ryu, J.H., Lee, J.H., and Kim, T.W. (2021). "Probabilistic assessment of causal relationship between drought and water quality management in the Nakdong River basin using the Bayesian network model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 10, pp. 769-777.
- Yoo, J.Y., Kim, T.W., Kim, J.Y., and Moon, J.W. (2017). "Development of drought index based on streamflow for monitoring hydrological drought." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 39, No. 4, pp. 669-680.
- 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.