



Drought impact on water quality environment through linkage analysis with meteorological data in Gamcheon mid-basin

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

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

^bMaster 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: 23-054

Received: 6 September 2023; Revised: 12 November 2023; Accepted: 14 November 2023

Abstract

Recently, due to the increase in abnormal climate, rainfall intensity is increasing and drought periods are continuing. These environmental changes lead to prolonged drought conditions and difficulties in real-time recognition. In general, drought can be judged by the amount of precipitation and the number of days without rainfall. In determining the impact of drought, it is divided into meteorological drought, agricultural drought, and hydrological drought and evaluation is made using the drought index, but environmental drought evaluation is insufficient. The river water quality managed through the total water pollution cap system is vulnerable to the effects of such drought. In this study, we aim to determine the drought impact on river water quality and quantify the impact of prolonged drought on water quality. The impact of rain-free days and accumulated precipitation on river water quality was quantitatively evaluated. The Load Duration Curve (LDC), which is used to evaluate the water quality of rivers, was used to evaluate water pollution occurring at specific times. It has been observed that when the number of consecutive rainless days exceeds 14 days, the target water quality in the mid-basin is exceeded in over 60% of cases. The cumulative rainfall is set at 28 days as the criteria, with an annual average rainfall of 3%, which is 32.1 mm or less. It has been noted that changes in water quality in rivers occur when there are 14 or more rainless days and the cumulative rainfall over 28 days is 32.1 mm or less in the Gamcheon Mid-basin. Based on the results of this study, it aims to quantify the drought impact and contribute to the development of a drought water quality index for future environmental droughts.

Keywords: Environmental drought, Load duration curve, Drought impact, Water quality changes

기상자료와의 연계분석을 통한 수질환경에 대한 가뭄영향 연구 - 감천중권역을 대상으로

조부건^a · 이상웅^b · 김영도^{c*} · 이주현^d

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

요 지

최근 이상기후의 증가로 강우강도가 높아지고 가뭄시기가 지속되는 현상이 나타나고 있다. 이러한 환경의 변화는 가뭄 현상의 장기화, 실시간 인지의 어려움이 있다. 일반적으로 가뭄은 강수량, 무강우지속일수 등으로 판단할 수 있다. 가뭄의 영향을 판단하는데 있어 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄으로 구분되어 가뭄지수를 활용한 평가가 이루어지고 있으나 환경가뭄 평가에 대해서는 미비한 실정이다. 수질오염총량제를 통해 관리되어지고 있는 하천 수질은 이러한 가뭄의 영향을 대비하는데 취약한 부분이 있다. 본 연구에서는 가뭄이 하천 수질에 미치는 영향을 파악하고 가뭄의 지속이 수질에 미치는 가뭄영향을 정량화 하고자한다. 무강우일수, 누적강수량이 하천 수질에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 하천의 수질을 평가하는데 활용되는 부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)를 활용하여 특정 시기에 발생하는 수질오염을 평가하였다. 감천 중권역에서는 무강우일수가 14일 이상 지속되는 경우 중권역 목표수질을 초과하는 경우가 60% 이상으로 나타났다. 누적강수량은 28일을 기준으로 설정하였을 때 연간 평균강수량의 3%인 32.1 mm 이하인 경우에 하천에서의 수질변화가 나타났다. 감천 중권역에서는 무강우일수 14일, 28 일간 누적강수량이 32.1 mm 이하를 기준으로 기상학적 영향이 목표수질 초과에 영향을 미친다고 판단하였다. 본 연구의 결과를 통해 가뭄영향을 정량화하고 향후 환경가뭄에서의 수질환경 가뭄지수 개발에 기여하고자 한다.

핵심용어: 환경가뭄, 부하지속곡선, 가뭄영향, 수질변화

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

1. 서론

자연적으로 발생하는 가뭄 영향은 시공간적으로 확장되고 국내 가뭄의 경우 계절적 특성에 의해 건조시기에 발생한 가뭄은 여름철 장마 및 태풍에 의한 충분한 강수로 해결되나 강수량이 부족할 경우 수자원 확보에 어려움이 발생하여 극한 가뭄피해를 초래할 가능성이 있다(Yoo *et al.*, 2020). 가뭄은 특정 기간, 계절 및 장기간 동안 부족한 강수량에 의해 발생하는 물 부족은 홍수와 달리 진행속도가 느리며, 시공간적으로 정확한 판단이 어렵다. 특정 지역에서 중장기간 동안 강수-증발산의 물수지에 대한 평균 조건과 비교되어야 하고 가뭄과 관련된 시기, 강우 강도 및 발생횟수, 기상인자 등은 가뭄 악화를 야기할 수 있다(Kim *et al.*, 2011). 기후변화에 의해 빈번이 발생하는 가뭄 현상은 장기간 지속되며, 실기간으로 인지하기 어렵고, 장기간 기상 전망의 불확실성으로 예측이 어려운 실정이다(Jang *et al.*, 2017). 일반적으로 가뭄은 특정 기간 동안의 강수량, 무강수 지속일수 등으로 정의되는 기상학적 가뭄, 농작물 생육에 직접 관계되는 토양수분 등 농업에 영향을 주는 농업적 가뭄, 물 공급을 중심으로 하천유량, 저수지, 지하수 등 가용수자원의 양으로 정의되는 수문학적 가뭄으로 구분되어 있다(Kim *et al.*, 2016). 가뭄의 시공간적인 전개 과정, 가뭄 모니터링, 분석 및 대응을 위하여 개발된 가뭄지수는 가뭄을 판단하고 가뭄 강도 및 가뭄 영향 등 목적에 따라 선택적으로 활용되고 있다(Won *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2022).

가뭄의 분류는 농업적 가뭄, 기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 사회경제적 가뭄으로 구분할 수 있다. 농업적 가뭄은 토양수분의 부족, 식물 수분량 부족을 의미하며, 기상학적 가뭄은 강수량 부족, 고온, 풍속 강화, 일조시간 및 증발량의 증가를 의미한다. 수문학적 가뭄은 하천-저수지 유입량 감소, 댐 저수율 감소로 수량적 가뭄을 의미하며, 사회경제적 가뭄은 농업·공업·생활용수 부족으로 정의된다. 이와 같이 여러 분야에서의 가뭄은 정의되고 있지만 환경학적 분야에서의 수질환경 가뭄에 대한 연구는 미비한 실정이다.

정의되고 있는 가뭄 중 환경가뭄을 평가하는 지표는 미비한 실정이다. 다른 분야의 가뭄의 경우 농업적 가뭄을 평가하기 위해 현재 및 평년 저수율을 활용하여 산정하는 저수지 가뭄지수(Reservoir Drought Index, RDI)가 대표적인 농업적 가뭄지수이다. 수문학적 가뭄지수는 월 유량으로 가뭄 심도 및 지속기간을 구분하는 하천수가뭄지수(Streamflow Drought Index, SDI)와 일 유량의 누적 확률함수를 통해 산정되는 표준하천유량지수(Standardized Streamflow Index, SSI)이 있다(Lee *et al.*, 2019; Kim and Chung, 2018). 대표적인 기상학적 가뭄지

수는 McKee *et al.* (1995)이 강수량 감소에 의하여 지하수량, 저수지 저류량 및 하천유출량 등에 상호작용을 미치는 것으로부터 제안한 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)의 활용도가 높게 나타난다(Kwak *et al.*, 2022).

가뭄지수의 연구로 농업, 수문학, 기상학적 가뭄을 평가하는 연구가 주로 이루어지고 있다. 농업적 가뭄을 평가하기 위해 Song (2018)은 SPI와 SGI (Standardized Groundwater level Index)의 상관분석을 활용한 최적의 누적기간을 결정하여 농업적 가뭄이 지하수계에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, Lee *et al.* (2016)는 장기가뭄을 대상으로 SPI, RDI 및 농업적 가뭄 빅데이터를 활용하여 기상, 수문, 농업적 가뭄의 관계를 상관성 분석을 통해 가뭄의 발생 시기 및 패턴을 분석하였으며, Lee *et al.* (2019)는 SPI와 RDI를 상관분석과 ROC (Receiver Operating Characteristic Curve) 분석을 이용한 가뭄 발생 패턴과 시공간적 가뭄심도를 분석하여 기상학적 가뭄과 농업적 가뭄의 상관성을 규명하였다. 수문학적 가뭄을 평가한 연구에서 Kim and Chung (2018)은 SWAT으로 모의한 일단위의 유출량 자료를 60일, 90일, 120일 및 150일의 SPI, SDI, SSI를 활용하여 가뭄 발생 시기, 침투가뭄심도 발생지점 및 가뭄기간에 대하여 일단위로 분석하고 Lee *et al.* (2021)는 산정한 SPEI, SDI (Streamflow Drought Index), WBDI (Water Budget based Drought Index)를 Dry spell 기법을 활용하여 가뭄의 지속기간, 규모 및 심도를 분석하여 수문학적 가뭄을 평가하였다. 기상학적 가뭄은 Park (2017)이 SPI를 활용하여 발생한 가뭄을 진단하고, 가뭄 발생시 시공간적 특성을 분석하여 가뭄의 발생 시기 및 가뭄심도, 유효 주기와 단기 가뭄 및 장기가뭄을 평가하였다. 기존 가뭄지수로 활용된 SPI는 기온과 잠재증발산량을 정상상태로 가정하고 강수의 변동성만을 활용하여 기간에 따라 가뭄을 평가하고 있으나 SPI 산정시 시간 척도에 따라 일관성이 미비한 결과를 제시하고 있는 한계가 나타난다(Kim *et al.*, 2012a). Yoo *et al.* (2014)은 기상학적 가뭄 해석에 활용되는 SPI를 베이지안 네트워크 기법을 활용하여 변수 간의 민감성을 검토하여 효율적인 SPI 활용 방안을 제시하고, Kim *et al.* (2012b)은 Copulas를 이용하여 지속시간별 SPI를 종합하여 수정한 결합가뭄지수는 다른 지속시간을 갖는 SPI의 낮은 일관성을 개선하였다.

최근에는 환경 분야에서 발생하는 가뭄을 정량적으로 평가할 수 있는 환경학적 가뭄을 평가하는 연구가 추진되고 있지만 직접적인 수질을 평가할 수 있는 연구는 미비한 실정이다. Kim *et al.* (2019)은 SPI와 비모수적 커널 밀도 추정을 적용하여 가뭄이 수질에 미치는 영향을 정량화하고 유역별 구분된 가뭄조건에 따른 수질초과확률 산정을 통해 수질 위험을 진단

하여 극심한 가뭄에 취약한 지역을 식별하였으며, Yoo *et al.* (2021)는 SPI를 활용하여 계절별 가뭄 비고 및 심한가뭄 발생 빈도 분석과 조건별 BOD, TOC, T-P의 목표수질 달성비율을 산정하고 베이지안 네트워크 분석을 통해 가뭄과 수질의 인과성을 분석하였다. Peña-Guerrero *et al.* (2020)와 Giri *et al.* (2021)는 SPI와 SSI를 활용하여 가뭄시기를 구분하고 유량 및 수질에 대한 임계값 확인을 통해 기후 변화에 따른 수질의 인위적 기여를 추적하였으며, 가뭄 누적기간에 대한 기상 및 수문학적 가뭄을 특성화하여 누적기간 변화에 따른 수질 영향성을 분석하였으나, 수질-유량-기상을 연계하여 환경학적 가뭄을 평가한 연구는 미비한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 수질환경에 대한 가뭄의 영향을 분석하고자 하였다. 기상 영향에 따른 하천에서의 수문학적 가뭄 영향이 수질에 미치는 영향을 판단하여 하천의 수질 관리에 활용하고자 하였다. 또한, LDC (Load Duration Curve)를 통해 부하량관리에서 유황조건에 따른 수문학적 영향을 판단하고 수질을 관리하는데 있어 영향을 미치는 정도를 파악하고자 하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상 유역 및 분석자료

대상 유역으로는 낙동강에 위치한 감천 중권역을 대상으로 연구를 수행하였다. 감천은 낙동강 대권역 물환경관리계획에서 중점관리 대상 중권역이며 환경부에서 하천법 제51조에 따라 생태를 기준으로 하천유지유량을 고시한 감천을 선정하였다. 감천은 국가하천으로 분류되며, 낙동강의 1차 지류이다. 하천유지유량의 최종고시년도인 2015년을 살펴보면 확보 가능량 0.39 m³/sec, 향후확보 필요량은 7.61 m³/sec로 총 8 m³/sec의 유지유량을 고시하였다. 감천 중권역은 하천의 유량이 크지 않은 소규모 하천으로 낙동강 중상류 지역에 주요 지류하천이다. 감천의 상류에서 합류하는 부향천의 하류에는 감천부향댐이 있으며, 부향댐은 2002년 착공해 2013년 12월 준공되었다. 감천유역에서의 부향댐에 따른 수문환경 변화는 댐 건설 이전과 댐 건설 이후의 자연적 홍수와 가뭄의 발생 정도는 큰 차이가 없으며, 수문변화지표군(Indicators of Hydrologic Alteration, IHA) 분석결과 댐 건설 후 홍수조절 및 하천유지용수 방류량 조절로 인한 비홍기간의 유량증가, 홍수기 기간의 유량이 감소하는 것으로 나타났다(Cho *et al.*, 2019). 분석에 활용한 자료는 부향천합류 이후의 자료를 활용하여 댐의 영향이 고려되었다. 분석에 활용한 수질 및 유량자

료는 2013년 부터 2022년까지 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)에서 제공하는 물환경측정망 자료를 이용하였으며 수질은 감천2 수질측정망, 유량은 감천A 총량측정망 자료를 활용하여 분석하였다. 수질, 유량 자료 측정지점을 일치시키고자 중권역 대표지점인 감천4보다 총량측정망과 같은 지점인 감천2 지점이 타당하다고 판단하였다. 기상자료는 기상자료개방포털(<https://data.kma.go.kr>)에서 제공하는 자료를 활용하였으며, 구미 기상관측소 자료를 활용하였다. 감천에서의 기상학적 영향이 수문, 수질에 미치는 영향을 파악하고 수질환경적 가뭄의 영향을 파악하고자 하였다. 감천 중권역의 유역도는 Fig.1과 같다.

2.2 부하지속곡선(LDC)을 이용한 수질평가

부하지속곡선(Load Duration Curve, LDC)은 수질 총량관리에서 주로 활용하는 방법으로 수질기준을 만족여부를 판단하는데 있어 유용한 방법이다. LDC는 수질 평가의 이해가 편리한 도구로 TMDL (Total Maximum Daily Load)에 적용되었으며, 비점오염원과 점오염원간의 오염원 배열, 계절적인 수질의 영향, 초과확률개념을 통한 빈도와 양적인 분석, 수질 기준의 조건을 충족하는 정도의 평가를 수행하는데 특히 그 장점이 있다(KECO, 2011). LDC는 하천의 전체 유량 조건에서 실측수질과 목표수질과의 관계를 나타내는 곡선이다(U.S. EPA, 2007). LDC에 있어 가장 기본이 되는 것은 총량관리 단위유역의 유향곡선이다(Kim *et al.*, 2015). LDC에 해당 기간 관측 수질 및 유량을 도식하여 전체 유량 규모에 대한 관측치의 분포를 확인할 수 있고, 하천 및 유역관리에 필요한 유량 및 수질의 점수를 확인할 수 있는 방법이다(Lee *et al.*, 2020). 부하지속곡선의 작성을 위해서는 목표수질 설정지점에 대한 일 유량자료를 높은 값에서 낮은 값 순으로 정렬하고, 각 유량 값에 대해 이 값을 초과하는 일수를 백분율(초과유량 백분율)로 계산한다(Eq. (1)).

$$\text{Percent of days flow exceed}(\%) = \frac{\text{Rank} / \text{Number of data}}{100} \quad (1)$$

그리고 초과유량백분율을 x축, 해당 유량값을 y축으로 하여 유량지속곡선(Flow Duration Curve, FDC)을 우선 작성한다. 위의 과정에서 작성된 유량지속곡선을 바탕으로 각 유량 값에 수질기준(목표수질)을 곱하여 부하량을 계산한다. 초과유량백분율에 대응하는 초과 부하량 백분율을 x축, 해당 부하량값을 y축으로 하여 부하지속곡선을 작성하게 된다(Eq. (2))(Kang *et al.*, 2011).

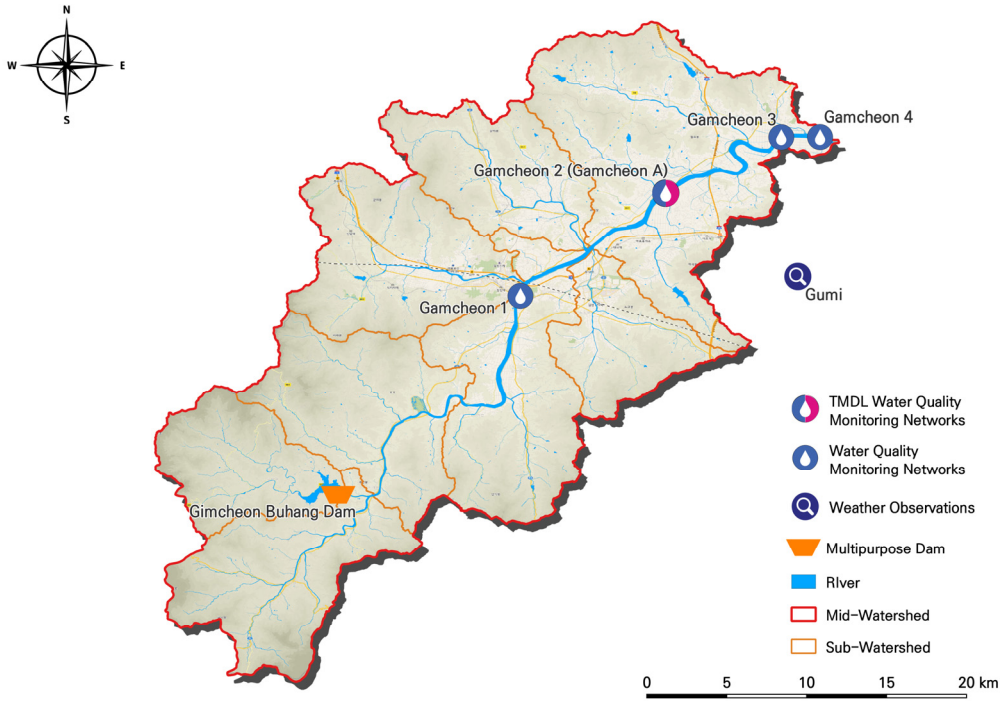


Fig. 1. Research target watershed : Gamcheon mid-watershed

Table 1. Gamcheon a watershed base flow

	Moist Conditions	Mid-range Flows	Dry Conditions	Low Flows
Flow	6.201~14.951 (9.175)	4.361~6.201 (5.215)	2.517~4.361 (3.438)	0.898~2.503 (2.005)

$$Load(kg/day) = Flow(m^3/sec) \times Water\ quality\ standard(mg/l) \times 86.4 \quad (2)$$

물환경정보시스템에서 취득한 유량 및 수질자료를 활용하여 일 부하량을 산정하였다. 유량값에 대한 초과유량백분율을 통해 계산된 부하량을 도식화 하였다. 본 연구에서는 측정된 유량값에 따라 4대강수계 수질오염총량관리 관리기준 설정연구(I)낙동강수계(NIER, 2017)에서 산정한 기준유량 범위를 적용하였다. 해당 기준유량은 수질오염총량제에서 하천 수질을 관리하기 위해 설정한 기준유량으로 HSPF를 사용하여 과거 10년에 대한 일유량을 산정하였으며 전 기간의 유량 자료를 활용하여 10년 평균 유행곡선에 비해 넓은 범위의 유량을 포함하고 있어 특정일 기준의 유량 설정에 대한 불확실성을 개선할 수 있을 것으로 사료되며, 수질이 악화되는 구간을 유량 범위 나타내었다. 부하지속곡선의 결과를 해석 할 때 유행구분은 초과 유량 확률에서 0%~10%는 홍수기 조건, 10%~40%는 풍수기 조건, 40%~60%는 평수기 조건, 60%~90%는 저수기 조건, 90%~100%는 갈수기 조건이다. 본 연구

에서는 감천A 단위유역의 기준유량을 사용하였다(Table 1). 또한, 대상으로하는 감천유역에서의 기준 및 조건별 목표 수질을 초과하는 경우를 정량화 하기 위하여 해당 조건별 초과확률을 산정하고자 하였다. 초과확률이란 설정된 한계를 초과하여 특정값 이상의 값이 생길확률을 말한다. 본 연구에서는 기상학적 요인을 설정하였을 때의 목표수질을 초과하는 경우를 산정하였다. 기상학적 요인에 따른 목표수질 초과율을 산정하여 유행별 초과정도의 변화를 살펴보고자 하였다.

3. 연구결과

3.1. 연구대상지역 현황 분석

2013년부터 2022년까지 감천2, 감천A 측정망 자료를 활용하여 분석하였다. LDC에서의 빨간색 실선은 측정망에서 측정된 실제 하천 유량이 감천 중권역의 목표수질을 만족하는 경우의 부하량을 나타내는 것이며, 푸른색 점은 측정된 유량과 수질을 통해 부하량으로 환산된 값이다. 이는 측정된 하천

수질 농도를 부하량으로 변환하여 평가하였다. 감천 중권역의 중권역 목표수질은 BOD 1 mg/L, T-P 0.02 mg/L로 수질현황에서 목표수질을 모두 초과하는 것으로 나타났다(Fig. 2). 연강우량은 10년간 평균 1,069 mm의 강수량이 내렸으며 2015, 2017, 2022년에 800 mm이하로 적은 강수량을 나타냈다(Fig.

3). 강수량이 가장 적었던 2017년을 보면 강우가 없는 5월 이후, 10월 이후에 BOD (mg/L)가 증가하는 경향을 나타냈다 (Fig. 4). LDC에서는 홍수기를 제외한 유량조건에 대하여 LDC를 분석하였으며 BOD의 경우 하천의 유량이 작을수록 실제 수질 변화폭이 작게 나타났다(Figs 5 and 6). T-P의 경우

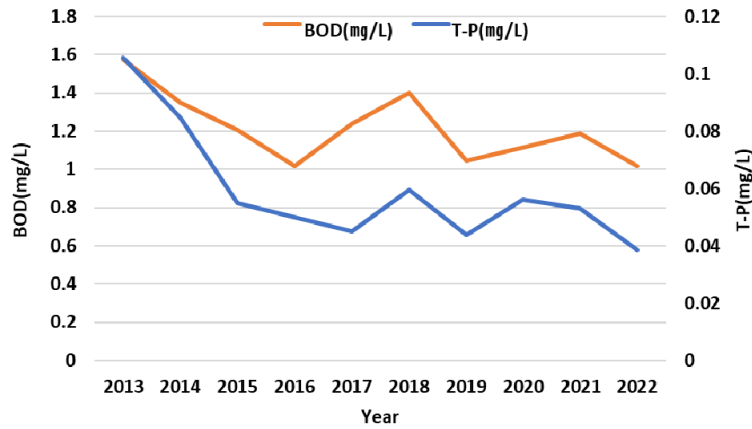


Fig. 2. Water quality status in Gamcheon mid-basin

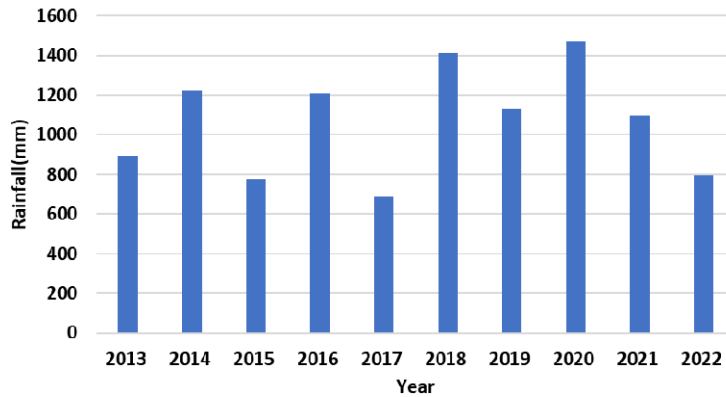


Fig. 3. Gumi meteorological observatory annual precipitation

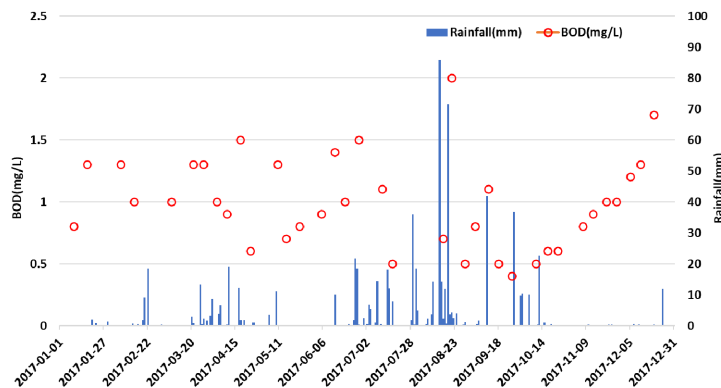


Fig. 4. 2017 Gamcheon Mid-basin water quality and meteorological daily data

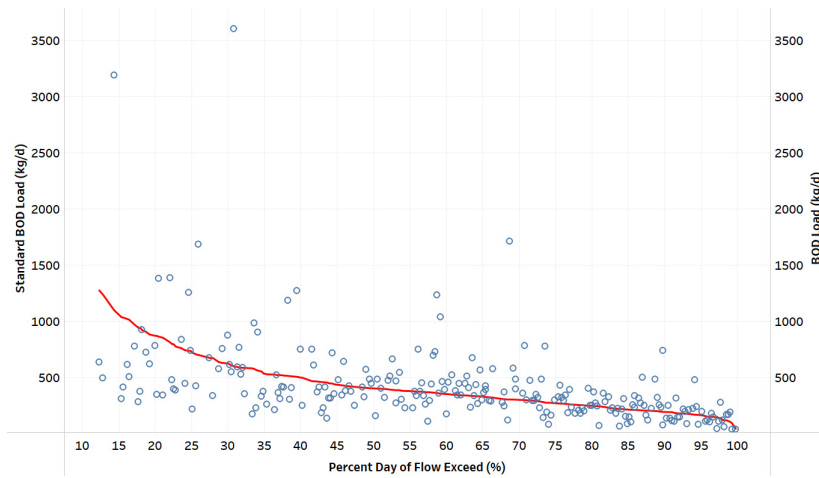


Fig. 5. Results of BOD LDC

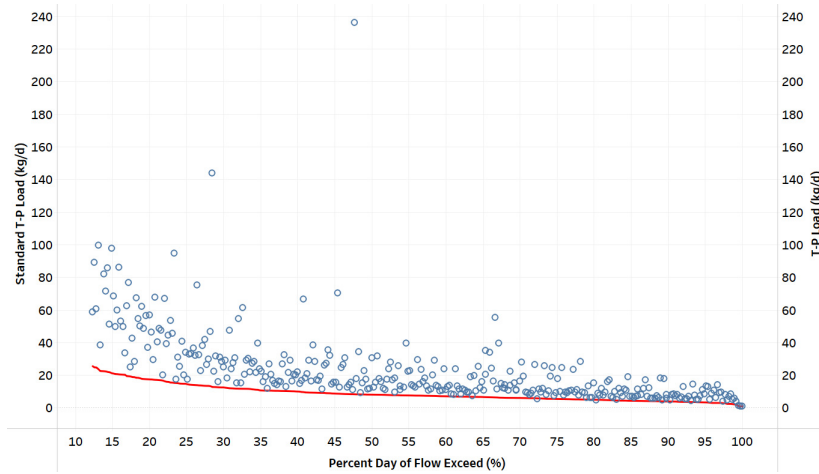


Fig. 6. Results of T-P LDC

하천에서의 실제농도가 증편역 목표수질에 만족하지 않고 초과하는 것으로 나타났다. 이후 분석에서는 기후영향에 따른 분석을 수행하고자 BOD에 대하여 분석을 수행하였다.

3.2. 무강우일수에 따른 영향 평가

기상학적 요인이 하천환경에 미치는 영향을 판단하고자 판단 기준을 설정하였다. 무강우일수의 기준은 비점오염 저감시설의 설치 및 관리 운영매뉴얼(ME, 2020)의 비점오염원 모니터링 조건의 강수사상의 선정 중 10mm 이상을 기준으로 모니터링 대상으로 선정하고 있다. 본 연구에서는 기상요인이 하천 수문학적 영향을 판단하는 요소로 무강우일수의 경우 10mm의 기준으로 강우의 유무를 판단하였으며, 해당 수질 측정일자로부터 사전 무강우 일수를 산정하였다. 무강우일수를 기준으로 기준일보다 높은 경우에만 그래프에 나타내었

다. 무강우일수의 기준은 일주일간격으로 구분하였다. 수질관리를 위한 현행 모니터링 시스템은 관심지점을 선정하여 일주일 또는 그 이상의 시료채취 주기를 가지고 수질을 분석하며 이러한 수질분석 결과를 통하여 수계의 오염도를 가늠하고 있다(Bae, 2013). 본 연구에서는 무강우일수의 기준을 7일, 14일, 21일, 28일로 구분하였다.

무강우일수 7일의 경우 전체 유행구간에서 초과하는 경우가 나타나며, 14일의 경우 풍수기에서의 초과율이 감소하는 것으로 나타났다. 21일, 28일 기준에서는 저수기, 갈수기에서 주로 영향율이 나타났다. 유행조건에 따라 무강우일수가 길어질수록 하천에서의 목표수질을 초과하는 확률이 높은 것으로 나타났다(Fig. 7). Table 2에 무강우일수 및 유행별 목표수질 초과율을 정리하였다. 7일, 14이상 무강우일수가 지속될 때 저수기, 풍수기의 목표수질의 초과율이 50%이상으로 나

타났다. 21일 이상의 경우 저수기, 갈수기의 목표수질 초과율이 60% 이상으로 나타났으며, 28일 이상일 때 저수기, 갈수기

60% 풍수기 50% 이상으로 나타났다. 이는 하천의 유량이 적은 경우 무강우일수가 길어질수록 수질이 초과하는 것으로

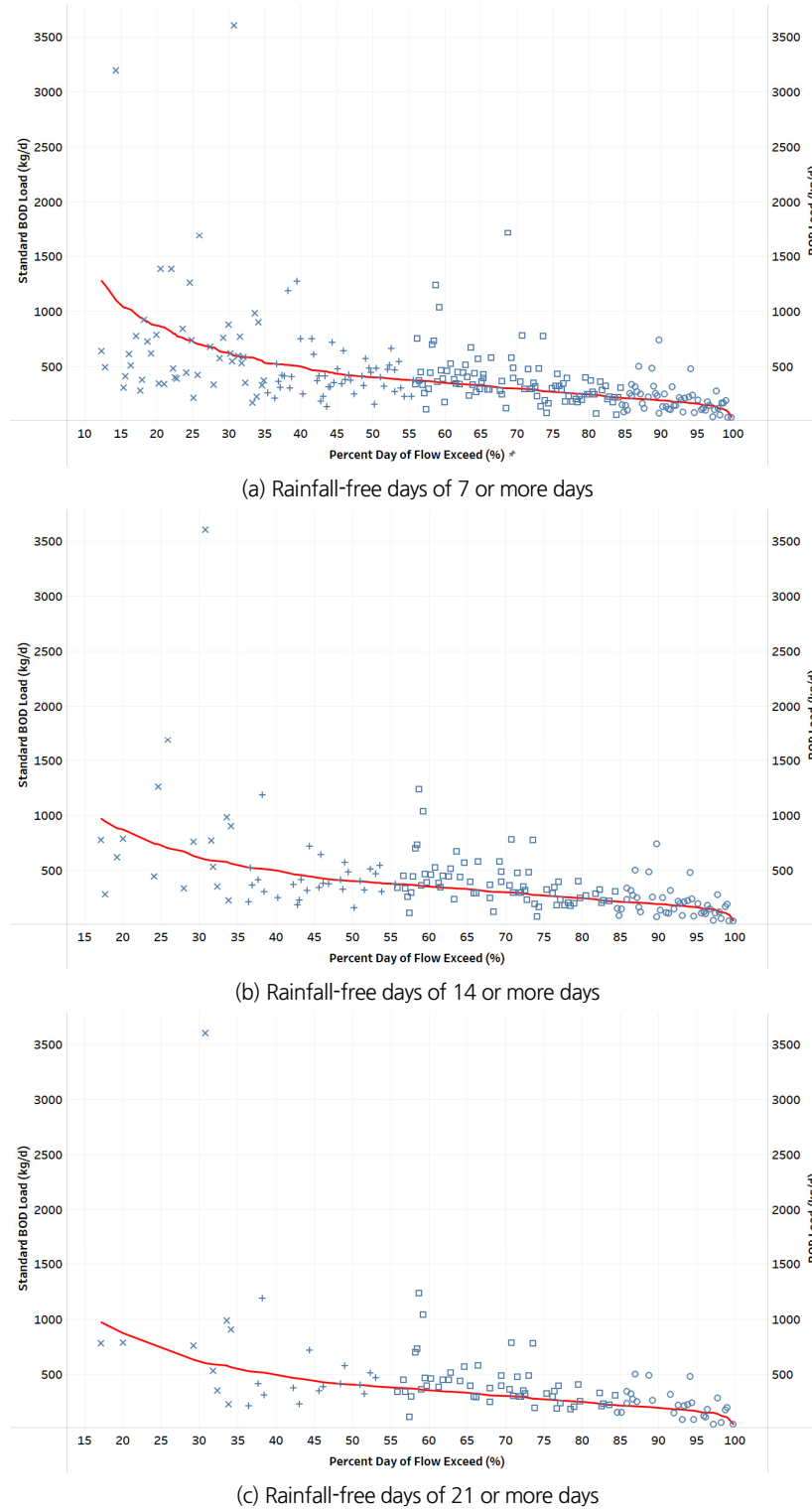
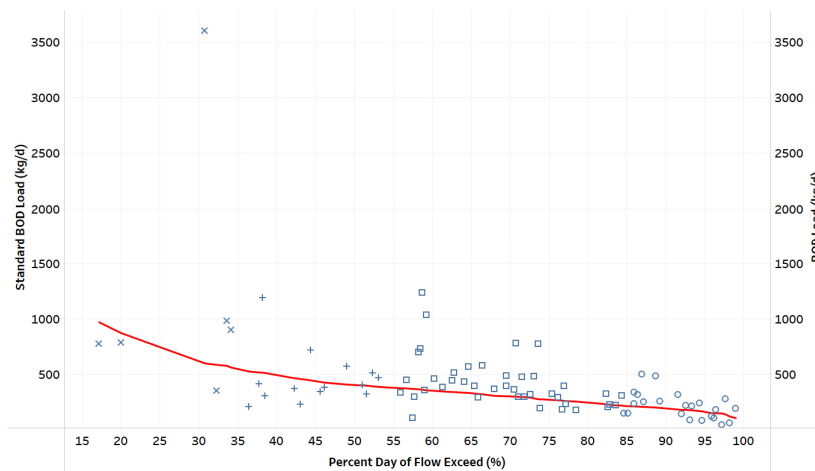


Fig. 7. LDC results according to number of rainfall-free days



(d) Rainfall-free days of 28 or more days

Fig. 7. LDC results according to number of rainfall-free days (Continued)

Table 2. Target water quality exceedance rate according to number of rain-free days

Rain-free Days		Moist Conditions	Mid-range Flows	Dry Conditions	Low Flows	Total
More than 7 days	Exceedance	12	17	49	27	106
	Total	47	51	93	52	248
	Excess rate (%)	25.5%	33.3%	52.7%	51.9%	42.7%
More than 14 days	Exceedance	7	8	39	22	76
	Total	16	29	68	44	157
	Excess rate (%)	43.8%	27.6%	57.4%	50.0%	48.4%
More than 21 days	Exceedance	4	5	33	18	60
	Total	9	15	53	28	105
	Excess rate (%)	44.4%	33.3%	62.3%	64.3%	57.1%
More than 28 days	Exceedance	3	5	27	14	49
	Total	6	14	41	23	84
	Excess rate (%)	50.0%	35.7%	65.9%	60.9%	58.3%

볼수있으며 무강우일수가 증가할수록 저수기, 갈수기 시기에 영향이 더 커지는 것으로 나타났다.

3.3. 누적강우량이 하천 수질에 미치는 영향 평가

누적강우량이 하천수질에 미치는 영향을 분석하기 위하여 누적강우량에 따른 초과정도를 분석하였다. 2013년부터 2022년까지의 BOD LDC를 활용하여 누적강우량에 따른 목표수질 초과확률을 분석하였다. 누적강우량 설정 일수는 무강우일수가 14 이상인 경우 저수기, 갈수기에 대한 영향을 분석할수 있는 것으로 나타나 누적강우량 누적일수는 28일을 기준으로 설정하였다. 누적강우량의 경우 구미 기상관측소의 자료를 활용하여 수질측정일자로부터 28일이전의 강우량을 누적하여 활용하였다. 누적강우량 기준은 2013년부터

2022년 까지의 연강수량의 평균값 1,069.7 mm의 10%, 5%, 3%, 1%를 적용하였다. 해당 수질측정일로부터 28일간 기준으로 설정한 누적강우량 이하인 경우를 그래프로 도식화하였다(Tables 3 and 4).

28일 누적강우량을 통해 누적강우량 변화에 따른 수질영향을 분석하였다. 누적강우량이 5% 이하인 경우에 유량이 적은 경우에 더 큰 영향이 나타났으며, 3%, 1% 이하인 경우에는 저수기, 갈수기에서 대부분이 초과하는 것으로 나타났다(Fig. 8). Table 5에 누적강우량 변화에 따른 초과율을 정리하였다. 10년 평균강수량의 10%이하 누적강우량인 경우 풍수기의 초과율이 50%이상, 5%이하 누적강우량일 경우 풍수기가 70%이상의 초과율을 나타냈다. 누적강우량이 3%이하의 경우에는 풍수기, 평수기, 저수기, 갈수기 모두 50% 이상의

목표수질 초과율을 나타냈으며, 1%이하일 경우에는 저수기, 갈수기의 초과율이 60%정도로 나타났다.

3.3. 강수량 변화에 따른 하천수질환경 영향 기준설정

기상학적 가뭄이 하천에 미치는 영향에 대한 정략적인 수치를 판단하는데 있어 무강우일수와 누적강우량을 활용하여 정량화 하고자 하였다. 무강우일수와 누적강우량에 대하여

하천수질에 미치는 영향을 분석하였다. 무강우일수의 경우 무강우일수가 14일 이상 지속될 때 하천 수질에 영향을 미치는 것으로 판단되어지며, 누적강우량의 경우 28일간 누적강우량이 32.1 mm 이하인 경우에 수질에 영향을 미치는 것으로 판단된다(Fig. 9). 두가지 조건을 종합하여 목표수질 초과율을 확인하였다(Table 6). 무강우일수가 14일 이상 지속되며, 누적강우량이 3%이하인 경우 감천의 BOD 목표수질 초과율

Table 3. Gumi meteorological observatory annual precipitation

Year	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	Ave.
Rainfall (mm)	895.2	1,222.8	779	1,208	688.6	1,410.1	1,133.2	1,469.5	1,098	792.9	1,069.7

Table 4. Cumulative precipitation application amount

%	10	5	3	1
Rainfall (mm)	106.7	53.49	32.1	10.7

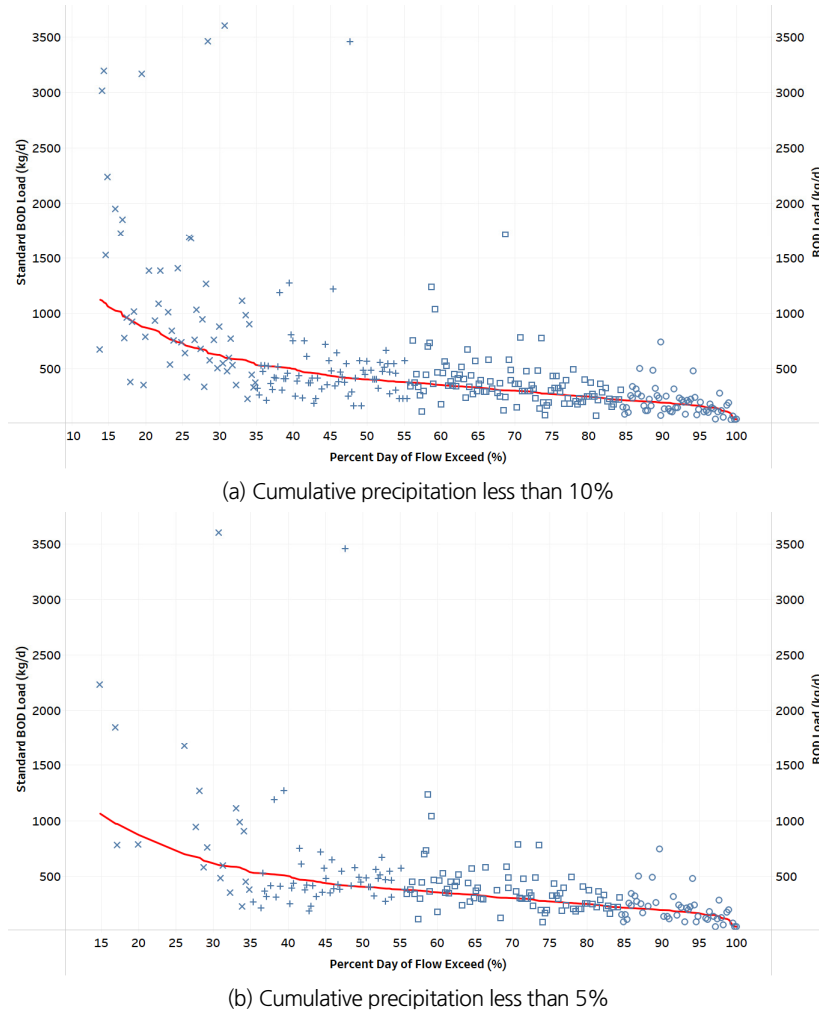
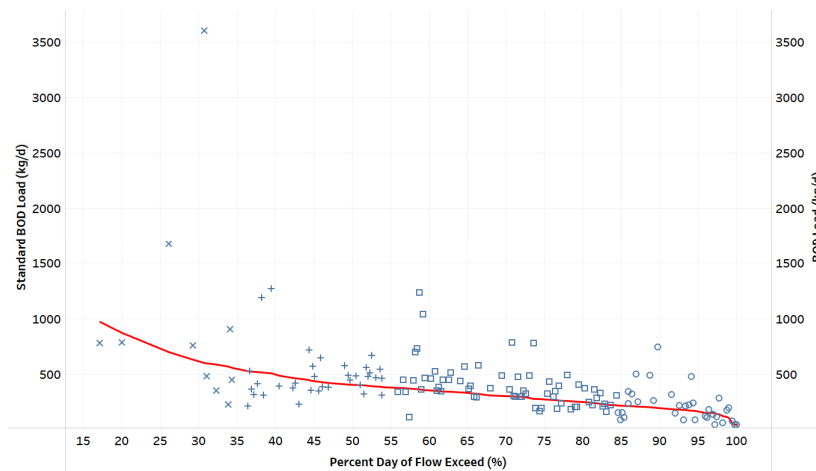
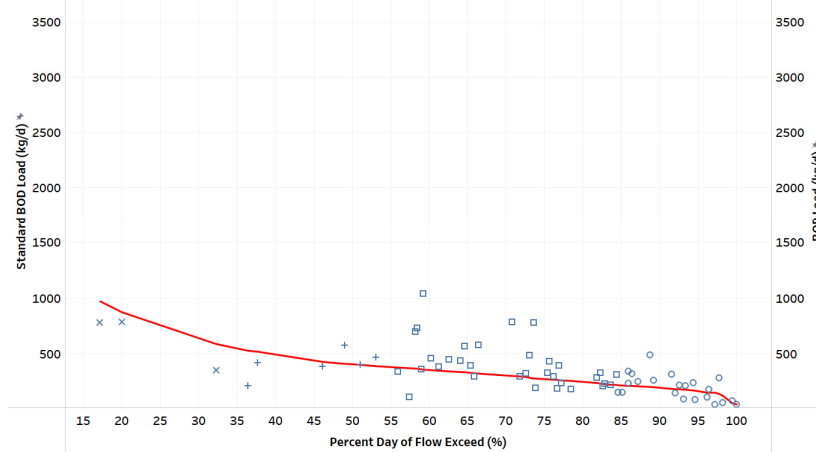


Fig. 8. Result of LDC according to accumulated precipitation



(c) Cumulative precipitation less than 3%



(d) Cumulative precipitation less than 1%

Fig. 8. Result of LDC according to accumulated precipitation (Continued)

Table 5. Target water quality exceedance rate according to cumulative precipitation

Cumulative Precipitation		Moist Conditions	Mid-range Flows	Dry Conditions	Low Flows	Total
10% or less	Exceedance	20	6	10	5	46
	Total	36	24	23	14	103
	Excess rate (%)	55.6%	25.0%	43.5%	35.7%	44.7%
5% or less	Exceedance	7	5	4	5	21
	Total	10	17	17	11	55
	Excess rate (%)	70.0%	29.4%	23.5%	45.5%	38.2%
3% or less	Exceedance	4	15	18	6	43
	Total	7	28	32	12	79
	Excess rate (%)	57.1%	53.6%	56.3%	50.0%	54.4%
1% or less	Exceedance	0	2	21	13	36
	Total	3	6	33	22	64
	Excess rate (%)	0.0%	33.3%	63.6%	59.1%	56.3%

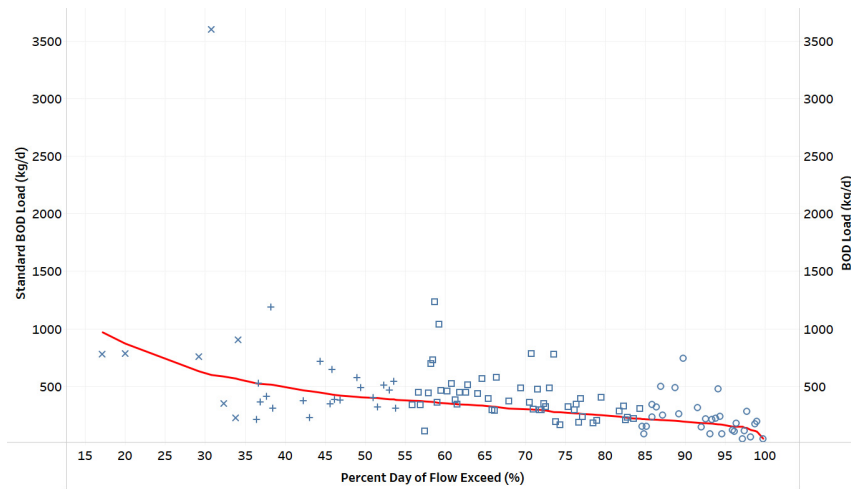


Fig. 9. Result of more than 14 rain-free days and less than 3% of cumulative precipitation

Table 6. Target water quality exceedance rate according to number of rain-free days and cumulative precipitation

Rain-free Days	Cumulative Precipitation		Moist Conditions	Mid-range Flows	Dry Conditions	Low Flows	Total
More than 14 days	3% or less	Exceedance	3	6	14	6	29
		Total	4	15	21	10	50
		Excess rate (%)	75.0%	40.0%	66.7%	60.0%	58.0%
	1% or less	Exceedance	0	6	14	6	34
		Total	3	6	32	20	61
		Excess rate (%)	0.0%	100.0%	43.8%	30.0%	55.7%
More than 28 days	3% or less	Exceedance	2	3	7	2	14
		Total	2	8	8	3	21
		Excess rate (%)	100.0%	37.5%	87.5%	66.7%	66.7%
	1% or less	Exceedance	0	2	19	12	33
		Total	3	6	31	20	60
		Excess rate (%)	0.0%	33.3%	61.3%	60.0%	55.0%

은 58%이고 풍수기, 저수기, 갈수기의 초과율이 60%이상으로 나타났다. 누적강우량이 1%이하인 경우에는 평수기에 100% 목표수질이 초과하는 것으로 나타났다. 무강우일수가 28일 이상 지속되는 경우에는 누적강우량이 3% 이하의 경우 전체 66%의 초과율이 나타났으며, 풍수기, 저수기의 초과율이 80%, 갈수기의 초과율이 60%이상으로 나타났으며 1%이하의 누적강우량일 경우 저수기, 갈수기의 초과율이 60%이상으로 나타났다.

감천 중권역에 대하여 기상학적 요인이 하천의 수질에 미치는 영향을 정량화 하였다. 무강우일수의 지속기간이 14일 이상인 경우에 저수기, 갈수기에 영향을 받으며, 28일간 누적강우량이 연평균 강수량의 3%이하로 내릴 경우 하천의 수질에 영향을 미친다고 판단된다. 무강우일수가 28일까지 지속

될 경우에는 목표수질 초과율이 더 높아지는 것을 알 수 있었다. 기상학적 요인이 실제 하천 수질에 미치는 영향을 정량화 할 수 있으며, 이는 수질환경에 대한 가뭄을 평가하는데 활용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

기상학적 가뭄이 하천환경에 미치는 영향을 파악하고자 무강우일수와 누적강우량을 활용하여 감천 중권역에서의 목표수질을 초과하는 경우를 분석하였다. LDC를 활용하여 기상요인의 변화에 따른 초과율을 분석하였다. 감천 2 지점을 대상으로 유량과 수질 자료를 활용하였다. T-P의 경우 목표수

질을 100% 초과하였으며 BOD는 조건에 따라서 초과율이 다르게 나타났다. 무강우일수, 누적강우량이 하천에서 수질농도의 변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

무강우일수는 10 mm이하인 경우를 기준으로 7, 14, 21, 28 일을 간격으로 분석하였다. 14일이상 무강우가 지속되는 경우 갈수기 57.4%, 저수기 50.0%의 목표수질 초과율을 나타냈다. 21일, 28일 이상인 경우에는 저수기, 갈수기 모두 60% 이상의 목표수질 초과율을 나타내어 무강우일수가 하천수질의 영향을 주는 것으로 나타났다. 저수기, 갈수기의 경우 무강우일수가 늘어남에 따라 목표수질 초과율이 높아졌다. 구미 기상관측소의 강수량 자료를 활용하여 산정한 누적강수량을 10년 연평균 대비 10%, 5%, 3%, 1%의 강우량으로 적용하여 28일간 누적강수량에 따른 수질 영향을 판단하였다. 누적강수량이 감소할수록 목표수질 초과율이 높아지는 것으로 나타났다. 10년 평균 강수량의 3%인 32.1 mm 이하의 누적강수인 경우 저수기 56.3%, 갈수기 50.0%의 목표수질 초과율을 나타냈다. 누적강우량이 1% 이하인 경우에는 저수기, 갈수기에 60%의 초과율을 나타냈으며 이는 28일간의 누적강우량이 3% 미만인 경우 하천 수질에 미치는 영향이 큰 것으로 판단하였다. 무강우일수와 누적강수량을 함께 적용하였을 때 무강우일수 14일, 누적강수량 3%이하인 경우 전체 초과율이 58%로 나타났으며 풍수기, 저수기, 갈수기에서 각각 75%, 66%, 60%의 초과율을 나타냈다. 무강우일수의 지속과 유역내의 강수량의 저하가 실제 하천의 수질을 악화 시키는 것으로 파악되었다. 본 연구를 통해 기상인자가 하천의 수질에 영향을 미치는 정도를 파악할 수 있었다. 현재 가뭄지수는 기상학적 가뭄지수인 SPI를 활용하여 가뭄을 판단하고 있으나 이는 하천에 직접적으로 적용하는데에는 한계점이 있다. 무강우일수가 증가하고 강수량이 감소하면 하천의 수문학적 변동성이 생기게된다. 이는 유량의 감소에 따른 하천 수질의 악화를 야기할수 있다. 가뭄에 따른 하천을 관리하기 위해서는 하천에서의 가뭄의 영향을 유량의 감소와 수질의 악화를 정량적으로 판단할 수 있어야 한다. 본 연구에서는 기상학적 요인인 무강우일수, 누적강우량의 변화를 통해 하천수질 변화를 분석하였으며, 유황구분을 통해 직간접적으로 수문에 대한 영향을 분석하였다. 본 연구를 통해 기상학적 요인이 하천의 수질에 미치는 영향을 정량화하였고 이는 향후 수질환경적 가뭄지수를 개발하는데 있어 지수의 주요 인자로 활용이 가능할 것으로 판단되어지며, 가뭄이 하천에 미치는 영향을 정량화하여 수질환경학적 가뭄지수를 개발하는데 활용되어질 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 행정안전부 지능형 상황관리 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2021-MOIS37-003)(RS-2021-ND631021).

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Bae, H.K. (2013). "Reconsideration for current water quality monitoring system throughout daily observation" *Journal of Environmental Policy*, Vol. 12, No. 1, pp. 59-74.
- Cho, Y.H., Park, 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.
- Giri, S., Mishra, A., Zhang, Z., Lathrop, R.G., and Alnahit, A.O. (2021). "Meteorological and hydrological drought analysis and its impact on water quality and stream integrity." *Sustainability*, Vol. 13, No. 15, pp. 1005-1021.
- Jang, H.W., Cho, H.W., Kim, T.W., and Lee, J.H. (2017). "Developing extreme drought scenarios for seoul based on the long term precipitation including paleoclimatic data." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 4 pp. 659-668.
- Kang, H., Ryu, J., Shin, M., Choi, J., Choi, J., Shin, D.S., and Lim, K.J. (2011). "Application of web-based load duration curve system to TMDL watersheds for evaluation of water quality and pollutant loads." *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 27, No. 5, pp. 689-698. doi: 10.15681/KSWE.2011.27.5.15.
- Kim, B.S., Kwon, H.H., and Kim, H.S. (2011). "Impact assessment of climate change on drought risk." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-11.
- Kim, B.S., Sung, J.H., Kang, H.S., and Cho, C.H. (2012a). "Assessment of drought severity over South Korea using Standardized Precipitation Evapo-transpiration Index (SPEI)." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 9, pp. 887-900.
- Kim, D.H., Hong, S.J., Han, D.G., Choi C.H., and Kim, H.S. (2016). "Analysis of future meteorological drought index considering climate change in Han-River Basin." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 18, No. 4, pp.432-447.
- Kim, E.K., Ryu, J.C., Kim, H.T., Kim, Y.S., and Shin, D.S. (2015).

- “Application of the Load Duration Curve (LDC) to evaluate the achievement rate of target water quality in the Han-River watersheds.” *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 31, No. 6, pp. 732-738. doi: 10.15681/KSWE.2015.31.6.732.
- Kim, J.S., Jain, S., Lee, J.H., Chen, H., and Park, S.Y. (2019). “Quantitative vulnerability assessment of water quality to extreme drought in a changing climate.” *Ecological Indicators*, Vol. 103, pp. 688-697.
- Kim, S.D., Ryu, J.S., Oh, K.R., and Jeong, S.M. (2012b). “An application of copulas-based joint drought index for determining comprehensive drought conditions.” *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 1, pp. 223-230.
- Kim, S.H., and Chung, E.S. (2018). “Analysis of peak drought severity time and period using meteorological and hydrological drought indices.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 6, pp. 471-479.
- Korea Environment Corporation (KECO) (2011). *Water quality management methods for urban river basin*.
- 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, J.H., Park, S.Y., Kim, M.G., and Chung, I.M. (2021). “Hydrological drought analysis and monitoring using multiple drought indices: The case of Mulrocheon watershed.” *KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 41, No. 5, pp. 477-484.
- Lee, J.W., Jang, S.S., Ahn, S.R., Park, K.W., and Kim, S.J. (2016). “Evaluation of the relationship between meteorological, agricultural and in-situ big data droughts.” *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 19, No. 1, pp. 64-79.
- Lee, J.W., Kim, K.H., Kim, S.H., Woo, S.Y., and Kim S.J. (2019). “Evaluation of the relationship between meteorological drought and agricultural drought of Geum River basin during 2014~2016.” *Journal of Wetlands Research*, Vol. 21, No. s-1, pp. 80-89.
- Lee, S.S., Kang, J.M., Park, H.R., Kang, J.H., Kim, S., Kim, J.P., and Kim, G.H. (2020). “A study on the variation of water quality and the evaluation of target water quality using LDC in major tributaries of Nakdong River Basin.” *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 36, No. 6, pp. 521-534. doi: 10.15681/KSWE.2020.36.6.521.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1995). “Drought monitoring with multiple time scales.” *Journal of Environmental Protection*, Vol. 2 No. 6, pp. 233-236.
- Ministry of Environment (ME) (2020) *Installation, management, and operation manual of non-point pollution reduction facilities*.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017). *Research on establishing management standards for the total amount of water pollution in the four major river systems (I) - Nakdong River System -*.
- Oh, B.Y., Son, J.W., Hwang, S.A., and Hur, S.O. (2022). “Drought assessment using standardized precipitation evapotranspiration index, standardized precipitation index and soil available water content.” *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer*, Vol. 55, No. 4, pp. 497-510.
- Park, C.E. (2017). “Spatial and temporal aspects of drought in South Korea based on Standardized Precipitation Index (SPI) and Palmer Drought Severity Index (PDSI).” *Journal of Agricultural, Life and Environmental Sciences*, Vol. 29, No. 3, pp. 202-214.
- Peña-Guerrero, M.D., Nauditt, A., Muñoz-Robles, C., Ribbe, L., and Meza, F. (2020). “Drought impacts on water quality and potential implications for agricultural production in the Maipo River Basin, Central Chile.” *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 65, No. 6, pp. 1005-1021.
- Song, S.H. (2018). “Assessment of drought effects on groundwater system in rural area using standardized groundwater level index (SGI).” *Journal of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 23, No. 3, pp. 1-9.
- 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.
- Won, K.J., Chung, E.S., Lee, B.R., and Sung, J.H. (2016). “Characteristics of the Han River basin drought using SPEI and RDI.” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 3, pp. 187-196.
- Yoo, J.Y., Kim, J.G., Kwon, H.H., and Kim, T.W. (2020). “Analysis of changes of spatio-temporal drought characteristics using three-dimensional drought maps.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 40, No. 2, pp. 209-215.
- Yoo, J.Y., Kim, J.Y., Kwon, H.H., and Kim, T.W. (2014). “Sensitivity assessment of meteorological drought index using Bayesian network.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 34, No. 6, pp. 1787-1796.
- Yoo, J.Y., 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.