

수문학적 가뭄감시 및 해석을 위한 다양한 가뭄지수 평가 -물로천 유역을 중심으로-

이주헌* · 박서연** · 김민규*** · 정일문****

Lee, Joo-Heon*, Park, Seo-Yeon**, Kim, Min Gyu***, Chung, Il-Moon****

Hydrological Drought Analysis and Monitoring Using Multiple Drought Indices: The Case of Mulrocheon Watershed

ABSTRACT

Due to climate change, parts of Korea are experiencing large and small droughts every 2-3 years and extreme droughts every 7 years. Since most droughts occur mainly in areas where small water supply facilities in the tributaries or upstream are located, more research on technology for securing water in these areas is required. In this study, a drought evaluation using SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), SDI (Streamflow Drought Index), and WBDI (Water Budget-based Drought Index) was performed to investigate hydrological drought in the Mulrocheon watershed of Chuncheon, a vulnerable area in terms of water supply. As a result of calculating hydrological drought indices SPEI and SDI, examining each duration, it was confirmed that the common drought in 2014 did not recover and continued until 2015. In the hydrological drought index evaluation result by WBDI, a very severe drought condition was observed in the spring of 2015 following 2014, and that drought was the most severe at -1.94 in November 2017. As a result of deriving a SDF (Severity-Duration-Frequency) curve through frequency analysis by duration using the drought index calculated on a monthly basis from 2003 to 2019 (17 years), most droughts in the Mulrocheon watershed were found to have a return period of less than 10 years, but droughts that occurred in 2014, 2015, and 2019 were found to cover more than 20 years, respectively.

Key words : Drought, Chuncheon, SPEI, SDI, WBDI, SDF curve

초록

최근 기후변화로 인하여 우리나라는 지역에 따라 2~3년 마다 크고 작은 가뭄과 7년 주기의 극한 가뭄이 발생하고 있다. 대부분의 가뭄이 지류 또는 상류의 소규모 용수공급시설이 위치한 지역에서 주로 발생되므로 이 지역에 대한 용수확보 기술에 관한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 물공급 취약지역의 하나인 춘천 물로천 유역의 수문학적 가뭄을 조사하기 위해 SPEI, SDI, WBDI를 이용한 가뭄 평가를 수행하였다. 수문학적 가뭄지수인 SPEI와 SDI를 산정한 결과, 공통적으로 2014년에 발생한 가뭄으로 인해 회복되지 못하고 2015년까지 지속된 것을 확인할 수 있었다. WBDI에 의한 수문학적 가뭄지수 평가결과에서는 2014년에 이은 2015년 봄철에 매우 심한가뭄 상태를 보였으며, 2017년 11월에 -1.94로 가장 가뭄이 심했던 것으로 분석되었다. 2003~2019년 (17년)의 월 단위로 산정된 수문학적 가뭄지수를 활용하여 지속기간 및 심도에 따른 코플라 함수를 적용한 이변량 빈도해석 결과, 물로천 유역의 가뭄은 대부분의 10년 빈도 이하의 값으로 나타났으나, 2014년, 2015년, 2019년에

* 중신회원 · 중부대학교 토목공학과 교수 (Joongbu University · leejh@joongbu.ac.kr)

** 중부대학교 가뭄연구센터 선임연구원 (Joongbu University · sypark276@gmail.com)

*** 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 전임연구원 (Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · kimmingyu@kict.re.kr)

**** 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원하천연구본부 선임연구위원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · imchung@kict.re.kr)

Received December 29, 2020/ revised January 9, 2021/ accepted March 11, 2021

발생한 가뭄의 경우 각각 20년 이상의 재현기간을 갖는 심한가뭄으로 분석되었다.

검색어 : 가뭄, 춘천, SPEI, SDI, WBDI, SDF곡선

1. 서론

최근 기후변화로 인하여 우리나라는 지역에 따라 2~3년 마다 크고 작은 가뭄과 7년 주기의 극한 가뭄이 발생하고 있다. 대부분의 가뭄이 지류 또는 상류의 소규모 용수공급시설이 위치한 지역에서 주로 발생되므로 이들 물 복지 사각지대에 대해 단기 가뭄에 안정적으로 공급할 수 있는 용수확보 기술에 관한 연구가 필요하다(Kim et al., 2020). 한편, 지방·광역상수도에 비해 소규모 수도시설은 낮은 수질 안전성과 상대적으로 가뭄에 취약한 특성을 가지기 때문에 이들 시설의 안정적 용수관리 체계에 대한 점검은 필수적이다. 강원지역에서는 2014년 겨울 가뭄으로 운반급수와 제한급수를 시행한 바 있으며(Kim, 2015), 2016년에는 가뭄시 계곡수 결빙으로 1,443세대 3,817명(22개 면, 44개 마을)이 급수차에 의한 물공급(285회, 1,845톤)을 받는 등 극심한 불편이 발생한 바 있다(Kim et al., 2020). 우리나라의 상수도 보급율은 96.5%에 이르나, 미보급지역과 소규모 수도시설(5,920개소) 지역은 가뭄시 취약지역으로서 안정적 수원 확보를 위한 기술 개선이 요구된다. 본 연구에서는 이와 같은 소규모 용수공급 시설의 가뭄대응을 위한 물공급 인프라 개선의 일환으로 춘천 물로리 지역(Yifru et al., 2018)에 대해 수문학적 가뭄평가를 수행하고자 한다.

가뭄은 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄으로 분류되며 가뭄의 모든 시작은 무강우로 인하여 비롯되는 기상학적 가뭄이며, 무강우 기간이 길어짐에 따라서 농업용수의 부족을 유발하는

농업적 가뭄, 저수지와 하천의 수위가 저하되어 생활용수의 공급에 차질을 빚게 되는 수문학적 가뭄으로 전이하면서 발달하게 된다. 각각의 기상학적, 농업적, 수문학적 가뭄을 정량적으로 평가하기 위한 가뭄지수가 별도로 개발되어 있으며, 가뭄을 평가하고 예측하기 위해서는 연구의 목적에 부합되는 적절한 가뭄지수를 선택하는 것이 매우 중요하다(Lee et al., 2015; Won and Chung, 2016). 또한 수문학적 자료를 바탕으로 새로운 가뭄평가 지수도 개발되어 활용되고 있다(Yoo et al., 2018). 한편, 본 연구의 선행연구로 춘천지역의 기상학적 가뭄평가를 수행한 결과 2014년의 재현기간은 300년, 2015.6~2016.1은 재현기간은 200년으로 추정된 바 있다(Lee et al., 2020).

본 연구에서는 강수와 증발산을 이용하여 수문학적 가뭄을 평가하는 SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index)와 하천유량을 이용하여 가뭄을 평가하는 SDI (Streamflow Drought Index) 그리고, 최근 위성자료를 활용하여 수문학적 가뭄을 평가할 수 있는 WBDI (Water Budget based Drought Index)를 이용한 수문학적 가뭄평가 및 분석을 수행하고자 한다.

2. 분석에 사용된 자료 및 이론적 근거

2.1 기상 및 유량자료

본 연구대상인 물로천 유역은 계곡하천으로 미계측 유역에 속해 인근에 위치하는 수위 및 유역의 기상관측 자료를 활용하였다(Fig. 1).

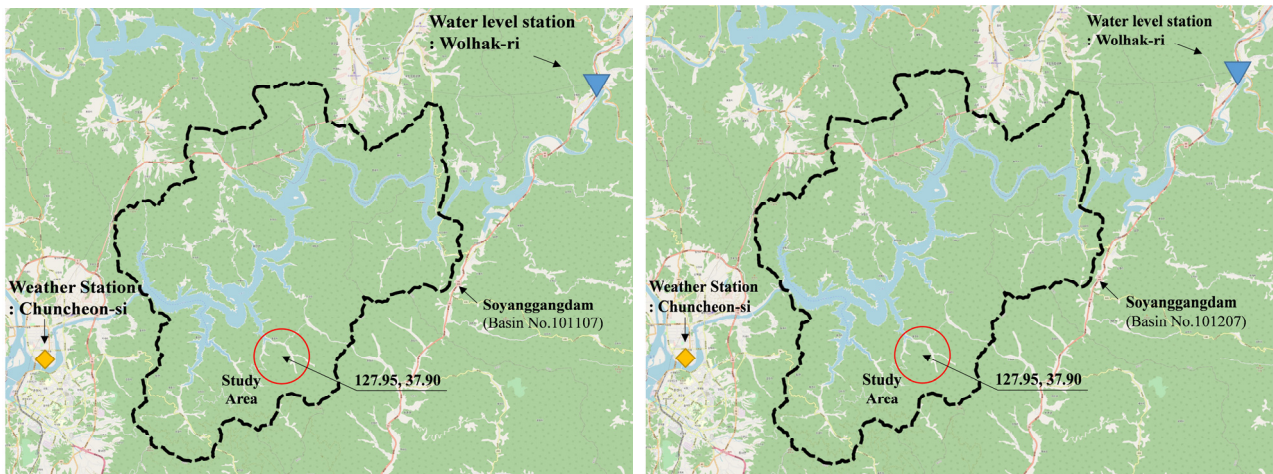


Fig. 1. Location of Meteorological Station and Water Level Station

본 연구의 선행연구(Lee et al., 2020)에서는 기상학적 가뭄지수 산정을 위해 기상청에서 제공하는 종관기상관측장비(ASOS, Automated Surface Observing System)를 활용하였으며, 물로천 유역 인근 관측소 중 자료보유기간이 가장 긴 춘천관측소(101)를 선정하여 강우분석을 실시한 바 있다. 이때 춘천관측소의 강수자료는 1973~2019년 자료를 활용하였으며, 위치정보는 Table 1과 같다.

유량자료를 활용한 가뭄분석을 위해 물로천 인근의 수위관측소 중 댐과 같은 수공구조물로 인한 하천유향에의 영향이 적고 최대한 장기간의 자료를 보유하고 있는 인제군(월하리)를 선정하였으며, 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 관련된 유량자료를 취득하여 분석하였다.

2.2 위성영상자료

본 연구에서는 위성자료 기반의 수문학적 가뭄지수인 WBDI를 산정하기 위해 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)에서 제공하는 증발산 자료를 활용하였으며, 위성자료 기반의 강수량 자료는 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), GPM IMERG (the Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) 자료를 활용하였다(Table 2). 서로 다른 공간 해상도는 1 km × 1 km, 시간해상도는 월단위로 변환하여 위성자료 기반의 수문학적 가뭄지수를 산정하였다.

2.3 수문학적 가뭄지수

수문학적 가뭄을 평가하고 모니터링하기 위해서는 강수인자뿐만이 아니고 정상적인 물공급의 가능성 및 가용수자원을 평가하기 위한 또 다른 수문인자가 활용되어야 한다. 일반적으로 증발산을 활용하여 강수로부터의 손실량을 추정하기도 하고, 경우에 따라서는 저수지 수위, 강설량, 하천수위, 지하수위 등의 수문정보를 이용하여 수문학적 가뭄상황을 평가하게 된다. 본 연구에서 춘천 물로리 지역을 대상으로 본 연구에서 선정한 수문학적 가뭄지수인 SPEI, SDI, WBDI를 산정하고 이를 비교 분석하였다.

Table 1. Location Information of the Chuncheon Rain Gauge Station

Standard point number	Name	Latitude	Longitude
101	Chuncheon	37.90262	127.7357

Table 2. Remote Sensing Data according to Satellite Type

Satellites and sensors	Product		Resolution
Terra/MODIS	MOD16A2	Evapotranspiration	0.5 km - 8 days
TRMM	TRMM3B42	Precipitation	25° - 3 hours
GPM	GPM IMERG	Precipitation	10° - 30 minutes

2.3.1 SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index)

SPEI는 강수인자만을 사용하여 산정되는 대표적인 기상학적 가뭄지수인 SPI (Standardized Precipitation Index)를 개선하여 수문학적 가뭄을 감지할 수 있도록 증발산량을 포함한 가용수자원을 평가하기 위한 지수로서, 강수량과 잠재증발산량(Potential Evapotranspiration, PET)의 차이에 의해 계산된다. SPEI의 증발산량은 경험적인 Hargreaves 방법을 활용하였으며, 산정 시 필요한 변수는 최고 및 최저기온과 대기권 상층부 태양복사열(extraterrestrial radiation) 자료로 산정 과정은 다음 Eqs. (1)~(3)과 같다.

$$PET = 0.0023(T_{mean} + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}} RA \quad (1)$$

여기서, T_{max} 는 최고기온, T_{min} 은 최저기온, T_{mean} 은 최고 및 최저 기온의 평균 값, RA 는 대기권 상층부 태양복사열을 의미한다.

주어진 월 i 에 대한 강수(P)와 잠재증발산(PET)의 차이는 다음 Eq. (2)를 활용하며, 이 값은 해당 월에 대한 물의 과잉 및 부족량을 나타낸다.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (2)$$

Eq. (2)로부터 합성된 D_i 의 확률분포는 3변수 log-logistic을 이용하여 매개변수 산정한 후, z-표준화정규값으로 변환하여 가뭄지수를 산정하게 된다(Vicente-Serrano, 2010).

$$D_n^k = - \sum_{j=0}^{k-1} P_{n-i} - PET_{n-i} \quad (3)$$

2.3.2 SDI (Streamflow Drought Index)

하천유량을 산정하여 수문학적 가뭄상황을 감지할 수 있는 SDI는 기상학적 가뭄지수인 SPI 개발 개념을 기반으로 Nalbantis and Tsakiris(2009)가 수문학적 가뭄을 평가하기 위해 개발하였다. SDI를 계산하기 위해 Eq. (4)의 월 유량 $Q_{i,j}$ 의 시계열 자료를 활용한다. 여기서 i 는 수문년도를 나타내고 j 는 해당 수문년도 내의 월을 나타낸다.

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, 12, k = 1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

여기서, $V_{i,k}$ 는 i 번째 연도에서 k 번째 기간 동안 누가한 유량이다.

SDI는 다음과 같이 i 번째 수문년도의 각 기준 기간 k 에 대한 누적 흐름량 $V_{i,k}$ 를 기반으로 정의된다.

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k}, \quad i = 1, 2, \dots, 12, k = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

여기서 \bar{V}_k 와 s_k 는 각각 장기간에 걸쳐 추정되는 기준 기간 k 의 누적 흐름 체적의 평균 및 표준편차이다. 이 정의에서 다른 값을 사용할 수 있지만 임계 수준은 V_k 로 설정한다(Nalbantis 2008; Nalbantis and Tsakiris, 2009). 양의 SDI 값은 습윤조건을 반영하며 음의 값은 수문학적 가뭄 상황을 나타낸다.

2.3.3 WBDI (Water Budget-based Drought Index)

Sur et al.(2020)가 개발한 WBDI는 위성자료기반의 수문학적 가뭄지수로서, 물수지 방정식을 기본개념으로 활용한다(Fig. 2).

즉, 총 강수에서 증발산량을 빼면 그 나머지가 유역에서 공급가능한 가용수자원량이라는 개념을 활용하여 지표면 유출과 지하수 유출량을 강수와 증발산의 차이로 정의하는 수문학적 가뭄지수이다. 위성자료 기반의 가뭄지수를 사용하는 목적으로는 여러 가지가 있지만, 지상관측자료가 부족한 미계측 유역이나, 관측망의 공간해상도가 좋지 못한 경우에도 매우 효과적으로 사용될 수 있는 장점이 있다.

$$P - E = dS + R \quad (6)$$

여기서, P는 강수량(mm), E는 실제 증발산(mm), dS는 토양 수분 변화(mm), R은 잠재적 유출(mm)을 의미하며, 이 결과는 유역의 유출 가능성으로 처리되고 지수로 표현된다.

$$WBDI = z(P - E) \quad (7)$$

여기서, z는 표준화(standardization)를 의미한다.

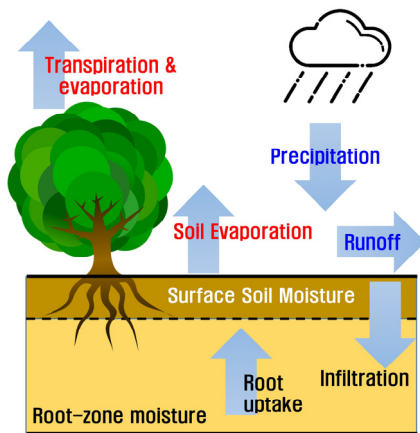


Fig. 2. Concept of Water Budget-based Drought Index (WBDI)

Table 3. Range of Drought Indices Used in This Study

Drought condition	SPEI	SDI	WBDI
Normal	≥ -0.5	≥ 0.0	≥ 0
Attention	-1.0 - -0.5	-1.0 - 0.0	0 - -0.5
Caution	-1.5 - -1.0	-1.5 - -1.0	-0.5 - -1.0
Alert	-2.0 - -1.5	-2.0 - -1.5	-1.0 - -1.5
Serious	< -2.0	< -2.0	< -1.5

Notes: SPEI = standardized precipitation evapotranspiration index; SDI = streamflow drought index; WBDI = water budget-based drought index

물수지 방정식 개념을 기반으로 개발된 WBDI는 증발산을 통해 현재 강수 및 가뭄 상태를 감시하는 대신 잠재적(근미래) 유역 유출량의 추정을 통해 수문학적 가뭄을 정의함으로써 단기적인 예후적 관점에서의 가뭄모니터링 방식을 적용한다(Sur et al., 2020).

본 연구에서 활용한 3가지 수문학적 가뭄지수의 가뭄등급 및 범례는 다음 Table 3과 같다.

2.4 이변량 가뭄빈도해석

가뭄을 정량적으로 분석하기 위해 여러 가지 방법이 적용될 수 있으며, 가뭄지수를 활용한 가뭄기간의 심도평가와 같은 Dry Spell과 과거의 수문자료 및 가뭄지수를 활용하여 빈도해석에 의해서 가뭄의 재현기간을 추정하는 빈도해석 방법 등이 있다. 수문빈도해석은 자료의 변량에 따라서 일변량빈도해석과 다변량 빈도해석이 있으며, 가뭄빈도해석을 위해서는 가뭄의 특성을 반영하는데 중요한 요소인 지속기간과 심도를 동시에 고려한 분석 기법이 필요로 한다. 일변량 빈도해석을 진행할 경우 지속기간과 심도가 서로 독립확률변수로 나타나기 때문에 이를 동시에 고려할 수 있는 이변량 빈도해석이 가뭄빈도해석에 더욱 효율적이며, 각각의 확률변수에 대해 확률분포함수가 같아야 한다는 과거의 이변량 빈도분석 방법의 한계를 극복하기 위해 두 변수간의 의존구조를 잘 반영하고 서로 다른 확률분포의 결합이 용이한 코플라 함수가 많이 활용되고 있다(Kim et al., 2018; Park et al., 2019; Yoo et al., 2016).

코플라 함수는 주변 확률분포함수를 연결하여 결합 확률분포를 산정하기 위해 산정되며 Eq. (8)과 같다.

$$F_{D,S}(d,s) = C(F_D(d), F_S(s)) \quad (8)$$

여기서, $F_D(d)$ 와 $F_S(s)$ 는 지속기간(d)와 심도(s)에 대한 확률분포함수를 나타내며, C는 코플라 함수를 의미한다. 코플라 함수 중 Archimedean 코플라 함수는 다양한 형태의 결합분포함수를 간단히 산정할 수 있고 수문변수간의 상관관계를 잘 반영한다는 장점이 있다. 여기에 속하는 함수군 중 Clayton, Fank, Gumbel

Table 4. Archimedean Copula Family Functions

Copula	Function
Clayton	$C(d, s; \theta) = (d^{-\theta} + s^{-\theta} - 1)^{-1/\theta}$
Fank	$C(d, s; \theta) = \frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{(e^{-\theta d} - 1)(e^{-\theta s} - 1)}{e^{-\theta} - 1} \right]$
Gumbel	$C(d, s; \theta) = \exp \{ - [(-\ln d)^\theta + (-\ln s)^\theta]^{1/\theta} \}$

세가지 함수를 고려하였으며(Table 4), θ 는 코플라의 매개변수이며 각 모형별로 제한되어 있다.

가뭄사상의 재현기간을 산정하기 위해서는 임의의 가뭄사상의 재현기간을 해당 사상의 초과확률에 역수를 취하여 얻는다. 본 연구에서는 지속기간과 심도 모두 초과할 때의 재현기간 산정 방법은 Eq. (9)와 같다.

$$\begin{aligned}
 T_{DS} &= \frac{E(L)}{P(D > d \text{ and } S > s)} \\
 &= \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + F_{D,S}(d, s)} \\
 &= \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

여기서, T_{DS} 는 지속기간이 d 를 초과하고 동시에 가뭄 심도가 s 를 초과하였을 때의 결합재현기간이며, $E(L)$ 은 가뭄사상의 평균 발생 간격을 의미한다.

3. 대상구역의 수문학적 가뭄 평가

3.1 수문학적 가뭄지수 산정

본 연구에서는 유역내 수문기상 관측자료중에서 결측데이터가 없고 강우량에 비하여 비교적 자료기간이 짧은 하천유량의 관측기간에 맞추기 위해서 2003년 이후부터 물로천 유역의 수문학적 가뭄을 평가하고자 한다. 선정된 수문학적 가뭄지수를 산정하기 위하여 자료의 지속기간을 1개월에서 12개월까지 선정하여 지속기

간별로 가뭄지수의 산정이 가능하지만 본 연구에서는 수문학적 가뭄을 평가한다는 점과 수문학적 가뭄은 기상학적 가뭄이 진행되고 상당한 시간적 지체가 발생한다는 점을 감안하여 지속기간 6개월의 수문기상자료를 활용한 SPEI (6), SDI (6)을 산정하였으며 위성영상기반 WBDI는 101207(소양강댐) 표준단위역에 대해 산정하였다.

수문학적 가뭄지수인 SPEI (6)를 산정한 결과, 2014년에 발생한 가뭄으로 인해 회복되지 못하고 2015년까지 가뭄이 지속된 것을 확인할 수 있었으며, 2018년에 정상상태로 회복되는 모습을 보였으나 완전히 회복되지 못하고 2019년까지 장기연속 가뭄의 영향이 이어진 것을 확인할 수 있었다. SPEI (6)은 2015년 10월에 가뭄심도가 -2.37로 가장 극심한 가뭄을 나타냈다.

유량자료를 활용한 수문학적 가뭄지수인 SDI를 산정한 결과 SPEI와 심도의 차이는 있으나 가뭄기간에 대해서 유사한 패턴으로 가뭄이 진행되었으며, 2014년에 발생한 가뭄으로 인해 정상상태를 회복되지 못하고 2015년까지 지속된 것을 확인할 수 있었다. 특이한 점은 2018년 가뭄의 가뭄상태가 회복되었다가 2019년 다시 가뭄으로 급격하게 상태변화가 나타난 것으로 분석되었으며, SDI (6)은 2019년 6월에 가뭄심도가 -2.54로 가장 극심한 가뭄을 나타냈다.

위성자료 기반의 수문학적 가뭄지수인 WBDI를 산정한 결과, 지속기간 6개월의 수문기상자료를 사용한 다른 가뭄지수보다 가뭄의 시작이 빠르게 나타나는 양상을 보였다. 2014년에 발생한 가뭄은 완전히 회복되지 못하고 2015년까지 가뭄이 진행되었다는 점에서 지상자료 기반의 다른 가뭄지수와 동일한 결과를 보였다.

위성자료 기반의 WBDI는 현재의 수자원량인 하천유량이나 저수지 저류량을 직접적으로 평가하는 것이 아니고, 향후 지표면 유출 또는 지표하 유출로 나타날 수 있는 유역의 잠재보유수량을 평가하는 개념으로 기존의 수문학적 가뭄지수에 의한 평가결과와는 다소 차이를 보일 수 있다. WBDI에 의한 수문학적 가뭄지수 평가결과에서는 2014년에 이은 2015년 봄철에 매우 심한가뭄 상태를 보였으며, 2017년 11월에 가뭄심도가 -1.94로 가장 가뭄이 심했던 것으로 분석되었다(Fig. 3).

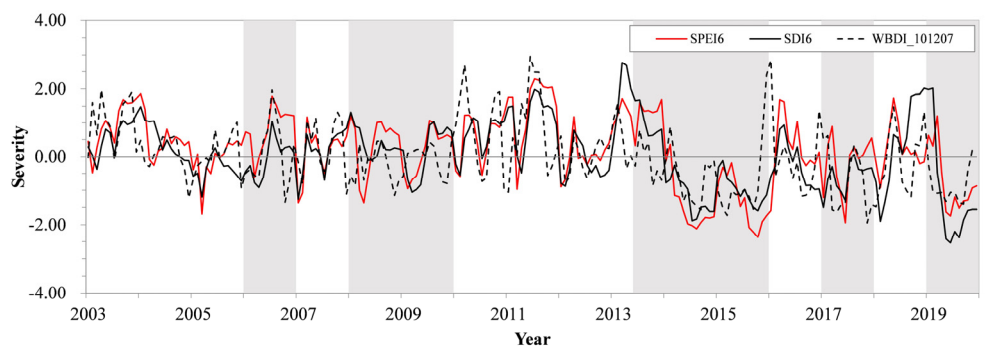


Fig. 3. Historical Drought Analysis Using SPEI, SDI, and WBDI (2003-2019)

3.2 Dry spell에 의한 가뭄지수별 과거가뭄의 지속기간-규모-심도(DMS) 분석

가뭄지수별로 평가된 결과를 기반으로 하여, dry spell 기법을 활용하여 가뭄지속기간(Duration, D)-가뭄규모(Magnitude, M)-평균가뭄심도(Severity, S)를 분석하였다. Dry spell 기법은 기상, 가뭄, 수문학적 현상 등에 대한 발생빈도해석에 일반적으로 사용되는 방법으로 특정 기상 및 수문현상에 대해 일별, 월별 기반으로 해당사상을 카운팅하여 분석하는 방법이다(Lee et al., 2012).

본 연구에서는 관심단계의 가뭄을 대상으로 분석하기 보다는 Table 3의 가뭄지수별 주의(Caution)단계 기준으로 가뭄의 시작과 종료를 구분하였으며, 발생한 가뭄 사상 중 4개월 이상 가뭄이 지속된 경우만을 선정하여 분석하였다. Table 4에 제시한 바와 같이 D-M-S에 따른 SPEI 분석결과 SPEI (6)에서 2014년도에 10개월 동안 주의단계 이하의 심한가뭄이 지속되었으며, 가뭄규모는 -17.34, 평균가뭄심도는 -1.73으로 수문학적 가뭄이 오래도록 지속된 것으로 분석된다. 대부분 2014년-2015년 가뭄에서는 평균 가뭄심도가 1.50이상의 심한 가뭄상태가 적게는 5개월 이상의 가뭄이 지속된 것으로 분석되었다.

유량자료 기반의 수문학적 가뭄지수인 SDI 분석결과 SPEI와 가뭄발생기간이 유사한 것으로 분석되었으며, 최근 2019년에 발생한 가뭄의 경우에도 9개월 동안 가뭄이 지속되었으며, 가뭄규모는 -17.42, 평균가뭄심도는 -1.94로 최대지속기간과 최대가뭄심도를 나타냈다. WBDI 분석결과 최대가뭄지속기간은 2015년에 10개월 동안 발생하였으며, 최대가뭄심도는 2017년에 11월에 발생한 가뭄으로 -1.49로 분석되었다.

가뭄의 지속기간과 심도는 기준을 어떻게 설정하느냐에 따라서 다소의 차이는 있을 수 있으며 본연구에서는 수문학적 가뭄을 평가한다는 목적에 부합하기 위하여 주의단계 이하의 가뭄을 대상으로 설정하였다.

3.3 코플라 함수를 활용한 주요 가뭄사상별 재현기간 산정

물로천 유역의 다양한 수문자료를 활용하여 2003~2019년(17년)의 월 단위로 산정된 가뭄지수를 통해 가뭄사상을 추출하고 가뭄빈도해석을 수행하였다. 본 연구에서 빈도해석에 활용된 자료 기간이 짧은 물리적인 한계로 인하여 자료의 적합도 검정을 통한 확률분포함수를 선정하기가 어려웠으며, 기존에 발표된 코플라 함수와 국내의 수문기상 변수를 활용한 빈도해석 연구를 통해 밝혀진 결과를 반영하여, 지속기간은 지수분포, 가뭄심도는 감미분포를 적용하여 분석하였다(Lee et al., 1986; Shiau, 2006; Zelenhasic and Salvai, 1987). 가뭄 지속기간과 심도를 동시에 고려하여 가뭄 발생 특성을 표출하기 위한 결합분포함수를 선정하기 위해 최우도법을 활용하여 적합도 검정 및 매개변수를 추정한

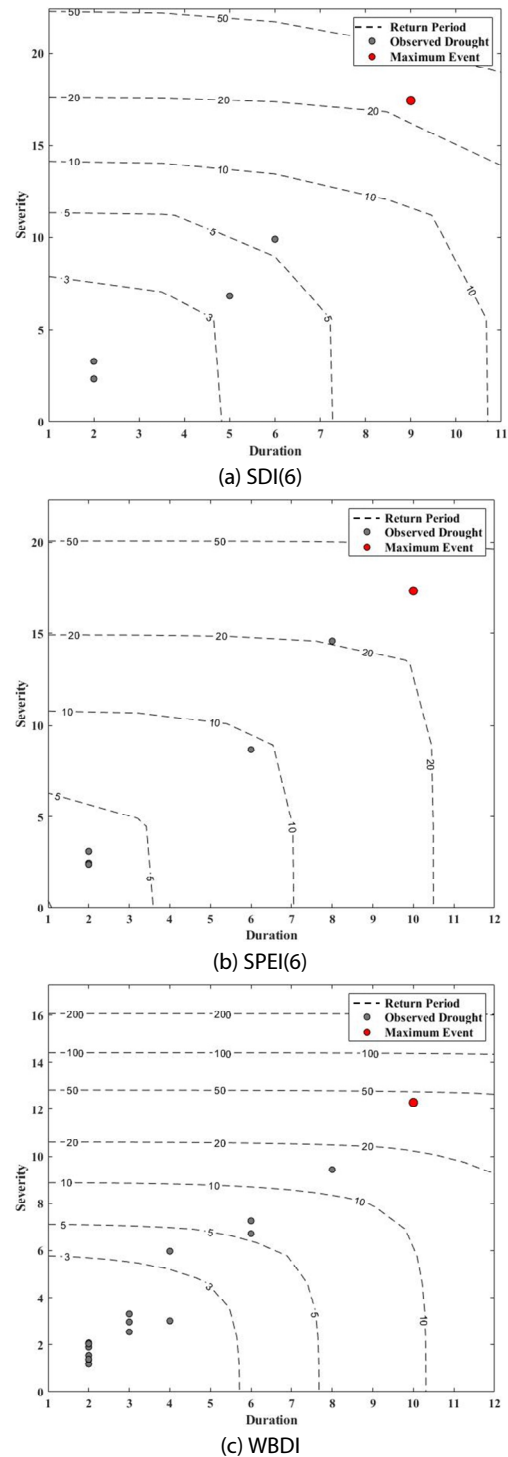


Fig. 4. Return Period of Drought Events Considering Duration and Severity Using Copula

결과 SDI는 Frank 코플라가 SPEI, WBDI는 Gumbel 코플라가 최적 결합확률밀도함수로 선정되었다. 선정된 결과를 바탕으로 이변량 빈도해석을 실시한 결과 Fig. 4에 나타났다.

코플라 함수의 빈도해석 결과, SPEI (6)의 경우에는 2014년 3월부터 2014년 12월까지 발생한 가뭄 사상의 재현기간이 32.64년으로 나타났으며, SDI (6)의 경우 2019년 4월부터 2019년 12월까지 발생한 가뭄 사상의 재현기간이 20.08년으로 분석되었다. WBDI의 경우 2015년 1월부터 2015년 10월까지 발생한 가뭄의 재현기간이 48.23년으로 가장 큰 재현기간을 갖는 것으로 확인되었다(Table 4).

본 연구에서 적용된 이변량 빈도해석에 의한 가뭄사상별 재현기간의 추정에서 알 수 있듯이 가뭄사상의 재현기간은 가뭄의 심도보다는 가뭄의 지속기간에 따라서 재현기간이 많은 차이를 보이는 것으로 나타났다. 또한 3가지 수문학적 가뭄지수가 약간씩 다른 최대가뭄기간을 표출하고 있지만, 근본적으로 2014-2015년에 한 강유역에서 발생했던 역사적인 가뭄피해 기록을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다(Tables 5 and 6).

본 연구에서 활용된 3가지의 수문학적 가뭄지수는 강수와 증발산량의 차이를 고려한 유역의 가용수자원을 평가한다는 점과 하천의 자연유출량을 평가하여 수문학적 가뭄을 평가하기 때문에 실제로 물의 수요와 공급의 밸런스를 고려한 물수지의 개념이 아님을 전제로 할 때 유역의 수문학적 가뭄상황을 감시할 때 매우 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 평가된다.

4. 결론

기후변화의 영향으로 최근 우리나라는 지역에 따라 2~3년 마다 크고 작은 가뭄과 7년 주기의 극한 가뭄이 발생하고 있다. 이러한

극심한 가뭄상황에서 대부분의 가뭄 피해 지역은 지류하천 또는 상류의 소규모 용수공급시설이 위치한 지역이므로 이와 같은 물 복지 사각지대에 대한 가뭄대응 및 용수확보에 관한 연구가 필요한 상황이다. 본 연구에서는 이와 같은 가뭄 피해 지역 중 하나인 춘천 물로리 지역을 대상으로 가뭄 극복을 위한 인프라 구축의 전 단계로 수문학적 가뭄평가를 실시하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수문학적 가뭄지수인 SPEI를 산정한 결과 2014년에 발생한 가뭄으로 인해 회복되지 못하고 2015년까지 지속된 것을 확인할 수 있었다. SDI 산정 결과 SPEI와 심도의 차이는 있으나 가뭄기간에 대해서 유사한 패턴으로 진행되었으며, 공통적으로 2014년에 발생한 가뭄으로 인해 회복되지 못하고 2015년까지 지속된 것을 확인할 수 있었다. 특이한 점은 SPEI와는 다르게 2018년 가뭄의 가뭄상태가 회복되었다가 2019년 다시 가뭄으로 급격하게 상태변화가 나타난 것으로 분석되었다.
- (2) 위성자료 기반의 수문학적 가뭄지수인 WBDI를 산정한 결과, 다른 가뭄지수와는 다소 다른 양상을 보였으나, 공통적으로는 2014년에 발생한 가뭄은 완전히 회복되지 못하고 2015년까지 가뭄이 진행되었다는 점에서 다른 지수와 동일한 결과를 보였다. WBDI에 의한 수문학적 가뭄지수 평가결과에서는 2014년에 이은 2015년 봄철에 매우 심한가뭄 상태를 보였으며, 2017년 11월에 가장 가뭄이 심했던 것으로 분석되었다.
- (3) 결과적으로 물로리 지역의 가뭄지수에서 공통적으로 2014년에 발생한 가뭄이 2019년까지 크거나 작게 지속적으로 발생했

Table 5. The Results of Quantitative Drought Analysis (Duration-Magnitude-Severity) Using SPEI, SDI, and WBDI

SPEI (6)			SDI (6)			WBDI					
Period	D	M	S	Period	D	M	S	Period	D	M	S
14.03.-14.12.	10	-17.34	-1.73	14.07.-14.12.	6	-9.89	-1.64	14.04.-14.09.	6	-7.26	-1.21
15.06.-16.01.	8	-14.57	-1.82	15.08.-15.12.	5	-6.82	-1.36	15.01.-15.10.	10	-12.29	-1.23
19.05.-19.10.	6	-8.68	1.45	19.04.-19.12.	9	-17.42	-1.94	17.03.-17.06.	4	-5.97	-1.49
								17.10.-18.03	6	-6.72	-1.12
								19.02.-19.09.	8	-9.44	-1.18

Table 6. Return Period (R) of Bivariate Analysis (Duration [D] and Severity [S])

SPEI (6)			SDI (6)			WBDI					
Period	D	S	R	Period	D	S	R	Period	D	S	R
14.03.-14.12.	10	-17.34	32.63	14.07.-14.12.	6	-9.89	5.81	14.04.-14.09.	6	-7.26	5.62
15.06.-16.01.	8	-14.57	15.89	15.08.-15.12.	5	-6.82	3.77	15.01.-15.10.	10	-12.29	48.23
19.05.-19.10.	6	-8.68	8.35	19.04.-19.12.	9	-17.42	20.07	17.03.-17.06.	4	-5.97	3.38
								17.10.-18.03	6	-6.72	5.62
								19.02.-19.09.	8	-9.44	12.98

던 것으로 분석됨에 따라서 춘천시 인근 지역이 가뭄으로 인해 피해를 경험했을 것으로 판단된다.

- (4) 관측자료 기반의 2003~2019년(17년)의 월 단위로 산정된 수문학적 가뭄지수를 활용하여 지속기간 및 심도에 따른 이변량 빈도분석을 코플라 함수를 이용하여 분석한 결과, 각각의 가뭄지수에 따라 SPEI (6)의 경우 2014년 32.64년, SDI (6)의 경우 2019년 20.08년, WBDI의 경우 2015년 48.23년으로 최대 가뭄사상의 재현기간이 다르게 나타났다. 하지만 이 외의 가뭄사상에서는 10년 빈도의 이하 값으로 분석되었다.

한편, 본 연구에서 수행한 이변량 빈도분석의 경우에 사용된 수문기상자료의 관측기간이 짧은 제약과 연구결과의 한계가 있음을 분명히 밝히고자 하며, 추후 자료 기간이 늘어남에 따라 더욱 신뢰성 높은 분석이 수행 될 수 있을 것으로 기대되며 이에 따라 위험도 분석 등을 통해 가뭄시에 하천유지유량의 관리, 수문학적 가뭄대응책 마련 등에 본 연구 성과를 이용 할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국연구재단(No.2021R1A2C1013190) 및 한국환경산업기술원의 수요대응형 물공급 서비스 사업(과제번호 146525)의 재원으로 수행되었습니다.

References

- Kim, G. B., Chung, I. M. and Ha, G. C. (2020). "Research and development of technology to secure water resources in drought-prone areas." *Water Journal*, Vol. 192, pp. 32-39.
- Kim, J. E., Yu, J. S., Lee, J. H. and Kim, T. W. (2018). "Drought risk analysis in Seoul using Cheugugi and climate change scenario based rainfall data." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 38, No. 3, pp. 387-393 (in Korean).
- Kim, J. S. (2015). *Alleviating the current drought condition in Gangwon region*, Issues and Perspectives, no. 973, The National Assembly Research Service (NARS).
- Lee, B. R., Sung, J. H. and Chung, E. S. (2015). "Comparison of meteorological drought and hydrological drought index." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 48, No. 1, pp. 69-78.
- Lee, J. H., Park, S. Y., Lee, J. W. and Chung, I. M. (2020). "Meteorological drought evaluation in Chuncheon region." *Journal of Environmental Science International*, Vol. 29, no. 5, pp. 541-549.
- Lee, J. H., Seo, J. W. and Kim, C. J. (2012). "Analysis on trends, periodicities and frequencies of Korean drought using drought indices." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol.45, No.1, pp. 75-89 (in Korean).
- Lee, K. S., Sadeghipour, J. and Dracup, J. A. (1986). "An approach of frequency analysis of multiyear drought durations." *Water Resources Research*, Vol. 2, No. 5, 5W417.
- Nalbantis, I. (2008). "Evaluation of a hydrological drought index." *European Water*, Vol. 23, No. 24, pp. 67-77.
- Nalbantis, I. and Tsakiris, G. (2009). "Assessment of hydrological drought revisited." *Water Resources Management*, Vol. 23, pp. 881-897.
- Park, J. Y., Kim, J. E., Lee, J. H. and Kim, T. W. (2019). "Assessment of hydrologic risk of extreme drought according to RCP climate change scenarios using bivariate frequency analysis." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 39, No. 3, pp. 561-568 (in Korean).
- Shiau, J. T. (2006). "Fiting drought duration and severity with two-dimensional copulas." *Water Resources Management*, Vol. 20, pp. 795-815.
- Sur, C. Y., Park, S. Y., Kim, J. S. and Lee, J. H. (2020). "Prognostic and diagnostic assessment of hydrological drought using water and energy budget-based indices." *Journal of Hydrology*, Vol. 591, 125549.
- Vicente-Serrano, S., 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.
- Won, K. J. and Chung, E. S. (2016). "Drought analysis of Cheongmicheon watershed using meteorological, agricultural and hydrological drought indices." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 49, No. 6, pp. 509-518.
- Yifru, B., Kim, M. G., Chang, S. W., Lee, J. W. and Chung, I. M. (2018). "Numerical modeling of the effect of sand dam on groundwater flow." *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 28, No. 4, pp. 529-540.
- Yoo, J. Y., Kim, T. W., Kim, J. Y. and Moon, J. W. (2018). "Development of drought index based on streamflow for monitoring hydrological drought." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 37, No. 4, pp. 669-680.
- Yoo, J. Y., Yu, J. S., Kwon, H. H. and Kim, T. W. (2016). "Determination of drought events considering the possibility of relieving drought and estimation of design drought severity." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 49, No. 4, pp. 275-282 (in Korean).
- Zelenhasic, E. and Salvai, A. (1987) "A method of streamflow analysis." *Water Resources Research*, Vol. 23, p. 156-168.