



Peak drought index analysis of cheongmicheon watershed using meteorological and hydrological drought index

Kim, Soo Hyun^a · Chung, Eun-Sung^{a*}

^aDepartment of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology

Paper number: 16-097

Received: 18 November 2016; Revised: 19 December 2016 / 27 December 2016; Accepted: 27 December 2016

Abstract

This study analyzed the peak drought severity and drought duration of the Cheongmicheon watershed from 1985 to 2015 to assess the lag time of peak drought severity between several drought indices. Standardized Precipitation Index (SPI) based on precipitation and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) based on precipitation and evapotranspiration were applied as meteorological drought indices. Streamflow Drought Index (SDI) based on runoff data was applied as hydrological drought index. In case of SDI, we used Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model for simulation of daily runoff data. As a result, the time of peak drought severity of SDI occurred after the occurrence of SPI and SPEI. The lag time for the peak drought severity, on average, between SDI and SPI was 0.59 months while SDI and SPEI was 0.79 months. As compared with SDI, the maximum delay was 2 months for both SPI and SPEI. This study results also shows that even though the rainfall events were able to cope with meteorological droughts, they were not always available to solve the hydrological droughts in the same time.

Keywords: Peak Drought Severity Time, Meteorological Drought Index, Hydrological Drought Index, SWAT

기상학적 및 수문학적 가뭄지수를 이용한 청미천 유역의 침도가뭄지수 분석

김수현^a · 정은성^{a*}

^a서울과학기술대학교 건설시스템학과

요 지

본 연구는 청미천 유역을 대상으로 1985년부터 2015년까지의 가뭄지수를 이용하여 침도 가뭄심도와 가뭄기간을 분석하였다. 이를 위해 기상학적 가뭄지수로는 강수량만을 변수로 하는 SPI (Standardized Precipitation Index)와 강수량과 증발산량을 함께 고려하는 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)를 적용하였으며, 수문학적 가뭄지수는 유역의 유출량을 변수로 하는 SDI (Streamflow drought index)를 적용하였다. SDI의 경우 청미천 유역을 구축한 SWAT 모형을 이용하여 도출한 유출량을 사용하였다. 그 결과 침도 가뭄심도의 발생시기는 SPI, SPEI의 발생 후에 SDI가 발생하는 양상을 보였으며 평균적으로 SDI와 SPI는 0.59개월, SPEI는 0.72개월의 차이를 보인다. 최대 발생지체 시간은 SPI, SPEI 모두 2개월을 보인다. 또한 기상학적 가뭄이 해결될 수 있는 강우량임에도 수문학적 가뭄을 해결하지 못하는 경우가 발생함을 확인하였다.

핵심용어: 침도가뭄심도 시간, 기상학적 가뭄지수, 수문학적 가뭄지수, SWAT

1. 서 론

지구 온난화로 인하여 기온이 상승하고 강수량이 크게 변화하여 증발산량의 증가로 이어지고 있다. 이로 인하여 가뭄의 발생 지역이 넓어지고, 가뭄빈도와 정도가 심각해지고 있

*Corresponding Author. Tel: +82-2-970-9017
E-mail: eschung@seoultech.ac.kr (E.-S. Chung)

다. 증가하는 가뭄지역의 피해를 최소화하기 위해 다양한 가뭄지수가 개발되어 가뭄의 심도(severity)를 정량화하려는 연구가 이루어지고 있다(Du Pisani et al., 1998; Heim, 2002; Keyantash and Dracup, 2002; Sung and Chung, 2014). 일반적으로 가뭄은 농업적(agricultural), 기상학적(meteorological), 수문학적(hydrological) 및 사회-경제학적(socioeconomic) 가뭄 등으로 구분된다(Wilhite and Glantz, 1985; Correia et al., 1991; Tate and Gustard, 2000).

강수의 부족은 기상학적 가뭄을 야기하고, 심해지면 토양 수분에 영향을 끼친다. 지표, 토양부터 하천에 이르기까지 줄어드는 강수량으로 결국 기저유출의 감소로 이어져 하천수량까지 부족하여 수문학적 가뭄이 발생하게 된다. 이렇듯 가뭄은 다양한 수문순환의 구성성분들이 서로 영향을 끼치므로 여러 개의 가뭄지수를 동시에 이용하여 가뭄의 상태를 정확하게 판단하는 과정이 필요하다(Karamouz et al., 2012; Won et al., 2016).

가뭄을 평가하기 위해서 사용되는 가뭄지수 중 SPI (Standardized Precipitation Index; Mckee et al., 1993)는 계산과정이 쉽고, 강수의 부족량으로 가뭄심도를 정량화하여 상태를 간단히 판단할 수 있어 가장 활발하게 이용되고 있다. 최근에는 강수량과 증발산량을 동시에 고려하여 조금 더 물리적으로 가뭄을 평가할 수 있는 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; Vicente-Serrano, 2010)가 활발하게 이용되고 있다(Lee et al., 2015). 더 나아가, Nalbantis (2008)는 하천수 가뭄지수인 SDI (Streamflow Drought Index)를 제안하여 월 유량으로 수문학적 가뭄의 심도와 지속기간을 구분해 내는 방법을 제안하였다.

근래 여러 형태의 가뭄 간에 어떤 영향을 미치는 지에 대하여 국가별로 다른 가뭄의 특성을 분석하는 연구가 활발하다(Edossa et al., 2010; Zhao et al., 2014). 이중 가뭄심도(drought severity)는 핵심 연구대상이다. 하지만 이러한 연구들은 가뭄심도의 크기에 따른 빈도(Shiau et al., 2009, Spioni et al., 2014), 지역별 차이(Blenkinsop et al., 2007) 등에 대한 연구가 대부분이다. 또한 가뭄지수간의 관계에 대한 연구는 대부분 가뭄지수 사이의 상관관계(Dagon et al., 2012; Jain et al., 2015)가 주를 이루고 있으며, 가뭄지수에 따른 가뭄발생 기간 또는 최대가뭄심도가 발생하는 시점의 차이 등에 대한 연구는 거의 없었다.

따라서 본 연구는 가뭄지수별로 다르게 나타날 수 있는 가뭄의 발생기간과 가뭄심도의 첨두발생시점에 대한 연구를 진행하였다. 가뭄지수의 특성 인자 중 첨두 가뭄심도의 발생 시점에 대하여 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수의 차이

에 대해 비교하였다. 연구 대상유역은 한강유역에 포함되는 청미천 유역으로 가뭄의 지속기간을 60일부터 30일 단위로 270일까지 하였고 1985년부터 2015년까지 첨두 가뭄심도의 발생기간을 분석하였다. 이때 사용한 가뭄지수로는 기상학적 가뭄지수인 SPI와 SPEI, 수문학적 가뭄지수인 SDI를 적용하였다. 연구 대상유역에 매개변수가 추정된 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 적용하여 수문학적 가뭄지수 산정을 위한 유출량을 모의하여 이를 활용하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연구절차

본 연구는 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수의 첨두 가뭄심도 발생시점에 대하여 평가하였다. 기상학적 가뭄지수는 강수량을 변수로 하는 SPI, 강수량과 증발산량을 동시에 고려하는 SPEI를 적용하였다. 수문학적 가뭄지수는 월 총 유입량을 이용하여 SDI를 계산하였다. 가뭄지수의 평가를 위해 지속기간 60일부터 30일단위로 270일까지 총 8단계에 따라 월별로 이동평균 하여 정량화 하였다. 이렇게 계산한 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수간의 첨두 가뭄심도 발생시점을 비교하였다.

2.2 SWAT 모형

물 부족 현상을 규명하기 위해 강우-유출모형은 오랜 기간 동안 사용되어 왔으며, 공간분석 기술의 발전은 유역의 특성을 반영하는 다양한 매개변수로 이루어지고 있는 강우-유출 모형의 전-후처리에 많은 기여를 했다(Won et al., 2015). 이러한 기술을 바탕으로 최근에는 분포형(distributed) 및 준분포형(semi-distributed) 모형이 수자원 관리에서 복잡한 문제를 해결하기 위해 사용되고 있다(Beven, 1989; Beven, 2002; Sorooshian and Gupta, 1995). 그 중에서도 SWAT 모형은 토양의 특성과 토지이용 그리고 다양한 기후 조건을 고려하여 유역의 유출량 산정에 효과적으로 사용되고 있다.

SWAT 모형은 유역단위로 일 단위의 모의가 가능한 준분포형 장기-강우유출모의 모형으로서 수문, 영양물질, 토양유실, 하도추적 4가지 부모형으로 구분되어 있다. 이 중에서 수문 부모형은 연속방정식에 의해 일 단위로 물수지를 산정하며, 물수지의 구성으로는 수로손실, 유출, 지하수 흐름, 증발산, 지표면, 차단, 침투 등이다. 이를 통해 각 수문응답단위(HRU, Hydrological Response Unit) 별로 독립적으로 유출량이 계산되며 하도추적을 통해 해당 유역의 출구지점에서의

유출량이 계산한다.

SWAT 모형의 매개변수 최적화를 위한 SWAT-CUP 모형의 알고리즘은 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2), GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation), ParaSol (Parameter Solution), PSO (Particle Swarm Optimization), MCMC (Markov Chain Monte Carlo)로 구성되어 있다. 본 연구에서는 가장 효과적인 방법인 SUFI-2 방법을 사용하였다. SUFI-2 알고리즘은 개념적 모델, 매개변수, 추정값 그리고 강수량 등 모두가 불확실한 매개변수로 이루어져 있다고 본다. 불확실성의 정도는 P-factor로 불리는 95% 예측의 불확실성(95PPU)의 비율로 측정되며, 강수량, 온도와 같은 입력 자료는 모델 예측의 불확실성을 증가시키므로 예측의 불확실성에 의해 선택된 자료의 비율은 불확실성 분석의 강도를 평가하는 좋은 척도가 된다.

2.3 SPI와 SPEI

기상학적 가뭄지수인 SPI는 시간 단위별 누가강수 시계열의 작성, Pearson Type-III (PT-III) 분포를 이용한 매개변수 추정, 누가분포함수(cumulative distribution function) 산정 및 표준정규분포에 적용시킨 가뭄지수의 산정 등의 단계로 계산되며, 최종적으로 산정한 SPI는 값이 -2이하이면 극심한 건조(extremely dry), -1.5 이하이면 심각한 건조(severely dry), -1 이하이면 중간 건조(moderately dry), 1에서 -1사이는 정상에 가까운 상태로 구분하고 1 이상이면 가뭄이 아닌 습윤한 상태로 구분하고 있다.

가뭄은 SPI값이 -1.0 혹은 더 작은 값에 도달할 때 발생하며 0보다 클 때 가뭄이 끝나게 된다. 가뭄 사상은 가뭄 시작과 끝의 시간 간격으로 정의된 지속기간과 SPI 값으로 표현되는 가뭄 심도로 표현하며 누적된 가뭄의 총량도 구분할 수 있다. 이를 가뭄 크기(Drought Magnitude, DM)라 하며, 가뭄 사상에 속한 모든 기간에 대한 지수의 합으로서 Eq. (1)을 이용하여 계산된다.

$$DM = - \left(\sum_{j=i}^x SPI_{ij} \right) \quad (1)$$

여기서, 임의의 기간 i 월 단위에 대하여, j 는 가뭄 시작 첫 번째 달로부터 가뭄이 끝날 때(x)까지 계속해서 증가한다.

SPEI는 강수량과 잠재 증발산량인 PET (Potential Evapo-Transpiration)의 차이에 의해 계산된다. PET를 결정하기 위하여 자료수집이 용이하며, 계산이 간단한 Thornthwaite (Thornthwaite, 1948)방법을 사용하였으며, 산정 과정은 Eq.

(2)와 같다.

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (2)$$

여기서, T 는 월평균 기온으로 단위는 $^{\circ}\text{C}$, I 는 열지수(heat index)로 월(month) 열지수를 합하여 구한 연(year) 열지수를 의미하며, m 은 I 와의 관계를 통해 나타낼 수 있다. 또한 K 는 위도(latitude)와 월(month)의 함수이다.

각기 다른 시간 규모에 따라 Eq. (3)과 같이 강수량과 증발산량의 차로 산정되는 D_i 는 시간 규모에 따라 합성되며, Eq. (4)로부터 합성된 D_i 의 확률분포는 Log-logistic 분포를 이용하여 매개변수 산정한 후, 표준정규분포로 변환하여 가뭄지수를 산정하게 된다(Vicente-Serrano, 2010).

$$D_i = P_i - PET_i \quad (3)$$

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-i} - PET_{n-i} \quad (4)$$

여기서, k 는 합성 시간 규모, n 은 계산에 이용된 월(month)이다.

2.4 SDI

수문학적 가뭄지수인 SDI는 Eq. (8)과 같이 계산되며, $Q_{i,j}$ 는 월 유량, 누적값 $V_{i,k}$ 는 Eq. (5)와 같이 계산된다(Nalbantis, 2008).

$$V_{i,k} = \sum_{j=1}^{3k} Q_{i,j}, \quad i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, 12, k = 1, 2, 3, 4 \quad (5)$$

여기서, $V_{i,k}$ 는 i 번째 연도에서 k 번째 기간 동안 누가한 유량이다. 예를 들어 $k = 1$ 이면 특정 년도의 10월부터 12월, $k = 2$ 이면 10월부터 그 다음해의 3월, $k = 3$ 이면 10월부터 그 다음해 6월까지 기간을 의미한다.

누가한 유량 $V_{i,k}$ 를 이용하여 SDI는 특정 i 번째 연도의 k 기간에 대하여 Eq. (6)과 같이 정의할 수 있다.

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad (6)$$

여기서, \bar{V}_k 와 s_k 는 각각 누적한 하천수량의 평균과 표준편차

를 나타낸다. 임계수준은 주로 평균인 \bar{V}_k 가 사용된다. 작은 규모의 하천에는 유량이 Gamma 분포형에 근사하게 되어 확률분포형이 왜곡되므로 유량을 정규분포에 적합하게 변환하여야 한다. 2변수 대수정규(log-normal) 분포형으로 변환하면, SDI는 최종적으로 Eq. (7)과 같으며, y 는 Eq. (8)과 같이 하천수량에 자연로그를 취한 값이다.

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{s_{y,k}}, \quad i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4 \quad (7)$$

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}), \quad i = 1, 2, \dots, k = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

Nalbantis and Tsakiris (2009)에 의하면, SDI에 의해 정의되는 수문학적 가뭄은 값이 -2 이하이면 극한 가뭄(extremely drought), -1.5 이하이면 심각한 가뭄(severe drought), -1 이하이면 중간 가뭄(moderate drought), 0 이하이면 가벼운 가뭄(mild drought), 0 이상이면 가뭄이 아닌 것으로 분류되고 있다.

3. 연구대상 지역

3.1 연구대상유역

본 연구의 대상지역인 청미천 유역은 행정구역상 경기도 여주군, 이천시 안성시 및 용인시와 충청북도 음성군으로 전체 또는 일부 포함되어있다. 수자원단위지도로 구분했을 때 한강 대권역, 남한강하류 중권역으로 구분되어있다. 유역의 총 면적은 596.13 km²이며 농경지는 187.24 km² (31.5%), 임야 299.46 km² (50.3%), 대지 14.49 km² (2.4%), 하천 및 제방

21.95 km² (3.7%), 기타 71.99 km² (12.1%)로 구성되어있다. 연구를 위한 기상데이터는 기상청 관할인 이천 기상관측소의 자료를 이용하였다. 이천 기상 관측소의 1985년부터 2015년까지의 강수 특성을 확인한 결과 31년간 평균 강수량은 1,372.8 mm로 2014년이 31년 평균 강수량 대비 57.5%인 791.5 mm로 가장 낮은 연평균 강수량을 보였다. 2015년과 2016년에도 각각 841.5 mm, 815.2 mm (12/16 기준)에 불과하여 평년보다 크게 낮은 강수량을 3년 연속 기록하고 있는 실정이다.

3.2 SWAT 모형의 구축

수문학적 가뭄지수를 산정하기 위한 유출량은 SWAT 모형을 적용하여 모의하였다. SWAT 모형을 구축하기 위해서는 지형자료와 기상자료가 필요하다. 지형자료는 정방 30 × 30 m의 DEM (Digital Elevation Model; 수치고도모형), 1:25,000의 토지피복도(Land cover)와 토양도(Soil type)가 필요하다. 기상학적 자료는 일 강수(mm), 최고·저 기온(°C), 일사량(MJ/m³day), 풍속(m/s)과 습도(%)이다. SWAT 모형을 구축하기 위해서 청미천 유역의 유역경계, 수치고도모형(DEM), 토지피복도, 토양도 등을 사용하였다. SWAT 모형은 청미천 유역의 출구점을 기준으로 단위 소유역을 구분하며, 이를 토지피복, 토양도에 따라 수문반응단위 (HRU)로 구분하여 적용한다. 그 결과 청미천 유역은 총 7개의 소유역으로 구분되었다. 강수량, 최고/최저 기온, 풍속, 습도 자료는 본 연구의 평가기간인 1985년부터 2015년까지의 자료를 적용하였다. 자료는 기상청에서 제공하는 이천 관측소의 자료를 이용하였으며, 유출량의 검정 기준자료로써 한강홍수통제소에서 제공하는 관측유량을 수집하였다.

2013년 관측유량에 대하여 SUFI-2 알고리즘을 이용하여 모의유량을 최적화하였다. 유량 모의와 관계된 매개변수 최적화를 위해 사용한 매개변수는 총 19개이며, SUFI-2 알고리즘으로 구한 최적 매개변수들로 모의된 유량과 관측유량을 비교하면 Fig. 2와 같다. 월별 및 계절별 변동성을 잘 재현하고 있으며, 대응하는 월별 유량값도 비교적 높은 정확도를 보였다. 좀 더 정량적으로 비교하기 위하여 NSE (Nash and Sutcliffe, 1970)와 상관계수를 함께 비교하였는데 NSE는 0.88, 상관계수는 0.90로 Fig. 2(a)와 같이 월유출량을 잘 모의하고 있음을 확인할 수 있다. 장기유출 모형은 일반적으로 월 단위 모의는 정확하지만 일별 첨두유량 모의에 취약하다고 알려져 있어서 일 유량을 도시하여 검토하였다. Fig. 2(b)와 같이 첨두유량은 다소 차이를 보이는 것으로 보이나 강우사상 이후 기저유출이 주를 이루는 기간에는 비교적 정확하게 모의하고 있었다.

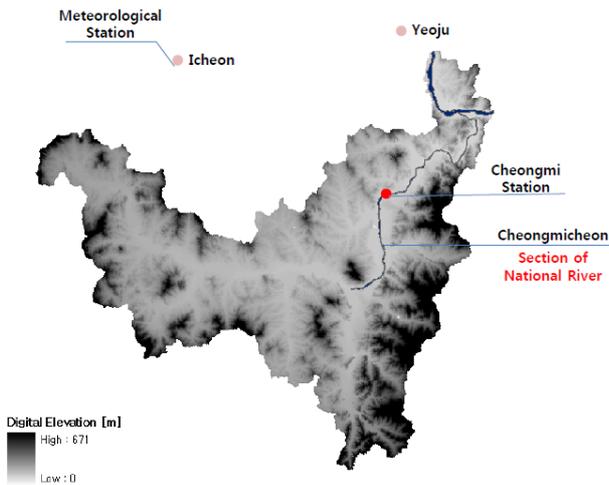
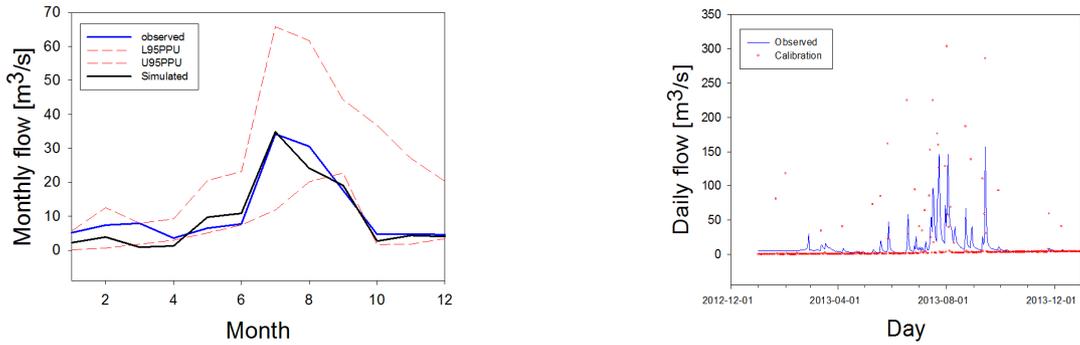


Fig. 1. Description of the Chungmicheon watershed



(a) Observed, simulated and confidential monthly discharges

(b) Daily observed and simulated discharges

Fig. 2. Calibration and validation results of SWAT model used in this study (Won et al., 2016)

Table 1. Three largest drought severities of SPI, SPEI and SDI according to all durations

Duration		60days		90days		120days		150days	
Drought	Rank	Year	Drought Severity	Year	Drought Severity	Year	Drought Severity	Year	Drought Severity
SPI	1	2000	-3.6	2001	-3.18	2000	-2.73	2015	-2.78
	2	2001	-2.97	2000	-2.91	2015	-2.72	2014	-2.34
	3	2014	-2.5	2015	-2.52	2001	-2.53	2000	-2.22
SPEI	1	2001	-2.6	2014	-2.4	2014	-2.39	2014	-2.47
	2	2014	-2.25	2015	-2.24	2015	-2.27	2015	-2.35
	3	2000	-2.15	2000	-2.13	2007	-2.00	2007	-2.06
SDI	1	1988	-3.91	2001	-2.88	2015	-2.65	2015	-2.72
	2	2001	-2.89	2000	-2.82	2000	-2.6	2014	-2.49
	3	2000	-2.62	2015	-2.6	2014	-2.47	2000	-2.27

Duration		180days		210days		240days		270days	
Drought	Rank	Year	Drought Severity						
SPI	1	2015	-2.78	2015	-2.47	2015	-2.37	2015	-2.43
	2	2014	-2.24	2014	-2.32	2014	-2.16	2014	-2.27
	3	2000	-1.74	2000	-1.65	2001	-1.83	2001	-1.74
SPEI	1	2014	-2.32	2014	-2.29	2014	-2.27	2015	-2.19
	2	2015	-2.29	2015	-2.19	2015	-2.17	2014	-2.17
	3	2007	-1.75	1994	-1.72	2001	-1.69	2001	-1.78
SDI	1	2015	-2.67	2015	-2.54	2014	-2.5	2015	-2.41
	2	2014	-2.53	2014	-2.56	2015	-2.43	2014	-2.39
	3	1989	-1.47	1989	-1.25	2001	-1.42	2001	-1.46

4. 연구결과

4.1 가뭄지수 산정결과

본 연구는 대상 지속기간을 60일, 90일, 120일, 150일, 180일, 210일, 240일, 270일로 설정하였으며, 지속시간에 따른 가뭄지수를 산정하였다. 이를 위해 기상학적 가뭄지수인 SPI

와 SPEI, 수문학적 가뭄지수인 SDI를 적용하였다.

SPI 산정결과 지속기간 90일인 경우 2001년도에 가장 심한 가뭄이 발생하였으며, 지속기간 120일인 경우 2000년도에 가장 심한 가뭄이 발생하였다. 또한 지속기간 150일, 180일, 210일, 240일, 270일인 경우는 2015년도에 가장 극심한 가뭄이 발생하였다. 특히 지속기간 60일인 경우 2000년도에 가뭄

지수 -3.6으로 가장 극심한 가뭄이 발생하였다.

SPEI 산정결과 지속기간 90일, 120일, 150일, 180일, 210일, 240일인 경우 2014년도, 270일인 경우 2015년도에 가장 심한 가뭄이 발생하였다. 특히 지속기간 60일인 경우 2001년도에 가뭄지수 -2.6으로 가장 극심한 가뭄을 나타냈으며, 각 지속기간별 가뭄지수를 평균하였을 경우 2014년도에 -2.28의 극심한 가뭄을 나타냈다.

SDI 산정결과 지속기간 90일인 경우 2001년도, 지속기간 120일, 150일, 180일, 270일인 경우 2015년도, 지속기간 210일과 240일인 경우 2014년도에 가장 심한 가뭄이 발생하였다. 특히, 지속기간 60일인 경우 1988년도에 가뭄지수 -3.91로 가장 극심한 가뭄이 발생하였다. 각 지속기간별 가뭄지수를 평균하였을 경우 2015년도에 -2.60의 극심한 가뭄을 나타냈다.

4.2 가뭄지수의 시간적 비교

기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수를 계산하여 시간적으로 변화양상을 비교하면 Fig. 3과 같다. Fig. 3(a)는 지속기간 90일에 대한 2015년 1월부터 2015년 12월까지의 시간적 분포를 나타내고 있는데, SPI와 SPEI의 가뭄심도가 2015년 9월에 첨두심도를 보인 후에 SDI의 가뭄지수가 2015년 10월에 첨두시점에 도달하였다. Fig. 3(b)는 지속기간 120일에 대한 2006년 8월부터 2007년 9월까지의 가뭄지수들의 시간적 분포를 나타내고 있다. SPI의 첨두심도는 2006년 11월에, SPEI의 첨두심도는 2006년 12월에서 나타내고 있으며, SDI는 그 이후인 2007년 2월에 첨두심도를 나타내고 있다.

두 그래프를 비교해본 결과 각 가뭄지수들은 비슷한 형태를 따르나 기상학적 가뭄지수인 SPI와 SPEI의 첨두 가뭄심도가 선행된 후에 수문학적 가뭄지수인 SDI의 첨두 가뭄심도가 뒤따르는 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

4.3 첨두 가뭄심도 발생시점 비교

본 연구는 지속기간별 기상학적, 수문학적 가뭄지수를 바탕으로 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수의 첨두 가뭄심도 발생시점에 대하여 평가하였다. 평가를 위해 각 가뭄에 대하여 정량화 하였고, 수문학적 가뭄발생을 기준으로 기상학적 가뭄에 대하여 평가하였다. SDI가 -1.5 이하일 때 지속기간별 각 가뭄지수의 첨두 가뭄심도 기간의 산정결과는 Table 2와 같다.

지속기간 60일의 첨두 가뭄심도 발생시점을 확인한 결과, SDI는 총 9번의 심각한 수준이상의 가뭄이 발생하였다. 가뭄지수별 평균 가뭄기간은 SDI는 3.22개월, SPI는 2.44개월, SPEI는 2.22개월이었으며, 평균적 SDI의 첨두발생시간과 SPI, SPEI 모두 1개월의 차이를 나타내고 있다. 지속기간 90일의 경우, SDI는 6건의 가뭄이 발생하였으며, 가뭄지수별 평균 가뭄지속기간은 SDI가 4.83개월, SPI는 3.83개월, SPEI는 4개월이었다. 또한 SDI의 첨두발생시간과 SPI, SPEI의 첨두발생시간은 0.67개월과 1개월로 나타났다. 지속기간 120일의 경우 SDI는 5건이 발생하였고, 가뭄지수별 평균 가뭄지속기간은 SDI가 4.4개월, SPI, SPEI는 평균 4.2개월을 나타냈다. SDI의 첨두발생시간과의 차이는 SPI, SPEI가 0.8개월로 나타났다. 지속기간 150일의 경우 총 4건의 가뭄이 발생하였고, SDI는 평균 4.5개월, SPI는 4.75개월, SPEI는 5개월로 확인되었다. SDI와의 첨두발생시간의 차이는 SPI, SPEI모두 0.5개월로 확인되었다. 지속기간 180일, 210일, 240일, 270일 모두 2건씩의 SDI 가뭄이 발생하였으며, 평균 가뭄기간은 180일의 경우 SDI 7개월, SPI 6.5개월, SPEI 7개월, 210일의 경우 SDI 8개월, SPI, SPEI 7개월, 240일의 경우 SDI 8.5개월, SPI 7개월, SPEI 8개월, 지속기간 270일의 경우 SDI는 7.5개월, SPI 7개월, SPEI 7.5개월로 확인되었다. 또한 SDI와의 첨두심도 발생시간과의 차이는 180일 SPI는 0.5개월, SEPI 1.5개월, 210일 SPI, SPEI 0개월, 240일 SPI 0.5개월, SPEI 1.5개

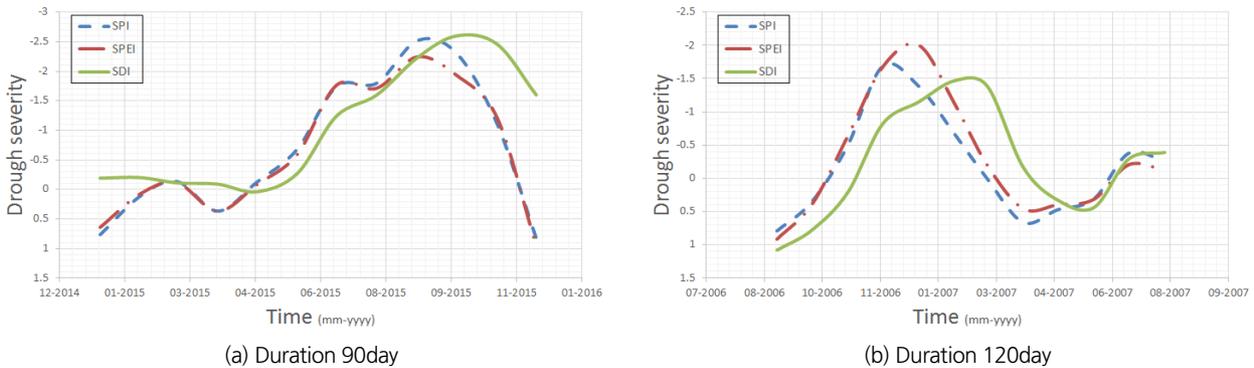


Fig. 3. Temporal variations of drought severity of SPI, SPEI and SDI

Table 2. Calculation results of peak drought severity time according to all durations

SDI		SPI		SPEI	
Drought period	Peak drought time	Drought period	Difference of peak drought time to SDI (month)	Drought period	Difference of peak drought time to SDI (month)
Duration-60days					
88Y10M-88Y12M	88Y12M	88Y 9M-88Y11M	1	88Y 9M-88Y11M	1
97Y 9M-97Y11M	97Y11M	97Y 9M-97Y10M	2	97Y 9M-97Y 9M	2
00Y 3M-00Y 6M	00Y 4M	00Y 3M-00Y 5M	1	00Y 3M-00Y 4M	1
01Y 4M-01Y 6M	01Y 6M	01Y 4M-01Y 6M	1	01Y 4M-01Y 6M	1
01Y11M-01Y12M	01Y12M	01Y11M-01Y12M	0	01Y11M-01Y12M	0
06Y11M-07Y 2M	06Y12M	06Y 9M-06Y10M	2	06Y 9M-06Y10M	2
14Y 4M-14Y 4M	14Y 4M	14Y 3M-14Y 4M	0	14Y 3M-14Y 4M	0
14Y 6M-14Y10M	14Y 8M	14Y 7M-14Y 8M	1	14Y 7M-14Y 8M	1
15Y 7M-15Y11M	15Y10M	15Y 6M-15Y 9M	1	15Y 6M-15Y 9M	1
Duration-90days					
88Y 9M-89Y 2M	88Y12M	88Y10M-88Y12M	0	88Y10M-88Y12M	0
00Y 4M-00Y 7M	00Y 5M	00Y 4M-00Y 7M	1	00Y 4M-00Y 7M	1
01Y 5M-01Y 7M	01Y 6M	01Y 5M-01Y 7M	0	01Y 5M-01Y 7M	0
06Y12M-07Y 2M	07Y 2M	06Y11M-06Y12M	2	06Y11M-06Y12M	2
14Y 5M-14Y11M	14Y 9M	14Y 5M-14Y10M	0	14Y 4M-14Y10M	2
15Y 7M-15Y12M	15Y10M	15Y 7M-15Y11M	1	15Y 7M-15Y11M	1
Duration-120days					
88Y11M-89Y 2M	89Y 2M	88Y11M-89Y 1M	2	88Y11M-89Y 1M	2
00Y 5M-00Y 7M	00Y 6M	00Y 4M-00Y 7M	1	00Y 4M-00Y 7M	1
01Y 6M-01Y 7M	01Y 6M	01Y 5M-01Y 7M	0	01Y 5M-01Y 7M	0
14Y 6M-14Y12M	14Y 9M	14Y 6M-14Y11M	0	14Y 6M-14Y11M	0
15Y 7M-15Y12M	15Y11M	15Y 7M-15Y11M	1	15Y 7M-15Y11M	1
Duration-150days					
88Y12M-88Y 2M	89Y 2M	88Y12M-88Y 2M	2	88Y12M-88Y 2M	2
00Y 6M-00Y 7M	00Y 6M	00Y 4M-00Y 7M	0	00Y 4M-00Y 7M	0
14Y 7M-15Y 1M	14Y 9M	14Y 7M-14Y12M	-1	14Y 6M-14Y12M	-1
15Y 7M-15Y12M	15Y11M	15Y 7M-15Y12M	1	15Y 7M-15Y12M	1
Duration-180days					
14Y 7M-15Y 2M	14Y 9M	14Y 7M-15Y 1M	0	14Y 6M-15Y 1M	2
15Y 7M-15Y12M	15Y11M	15Y 7M-15Y12M	1	15Y 7M-15Y12M	1
Duration-210days					
14Y 6M-15Y 3M	14Y 9M	14Y 7M-15Y 2M	0	14Y 7M-15Y 2M	0
15Y 7M-15Y12M	15Y11M	15Y 7M-15Y12M	0	15Y 7M-15Y12M	0
Duration-240days					
14Y 6M-15Y 4M	14Y10M	14Y 7M-15Y 3M	0	14Y 6M-15Y 3M	1
15Y 7M-15Y12M	15Y11M	15Y 7M-15Y12M	1	15Y 7M-15Y12M	2
Duration-270days					
14Y 7M-15Y 5M	14Y 9M	14Y 7M-15Y 4M	-1	14Y 6M-15Y 4M	-3
15Y 7M-15Y12M	15Y11M	15Y 8M-15Y12M	-1	15Y 7M-15Y12M	-1

월, 270일 SPI -1개월, SPEI -2개월로 나타났다. 지속기간 전체 평균으로 비교했을 경우 SDI와의 침투발생 시점차이는 SPI가 0.51개월, SPEI가 0.72개월로 나타났다.

지속기간이 증가함에 따라 SDI의 가뭄 발생 빈도는 감소하지만, 가뭄지수별 가뭄의 평균 가뭄기간은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 지속기간이 증가하면서 짧은 가뭄기간을 가지는 가뭄의 수가 줄어들어 발생건수도 감소하여 2014년, 2015년 같은 큰 규모의 가뭄만 발생함을 확인할 수 있다. 2014년의 가뭄현상을 확인해본 결과 지속기간이 증가함에 따라 SDI의 가뭄 시작점은 다른 가뭄지수와 동일하나 가뭄 지속기간이 증가하는 것을 볼 수 있다.

SDI를 이용한 가뭄분석 결과 SPI와 SPEI의 가뭄이 발생하지 않은 경우에도 SDI의 가뭄이 발생한 경우가 있다. 지속기간 60일 2006년 9월부터 2007년 2월까지 발생한 SDI의 경우 SPI와 SPEI의 가뭄은 2006년 10월에 종료되었다. 하지만 수문학적 가뭄은 가뭄이 종료된 시점부터 4개월 후에 가뭄이 종료되었다. 기상학적 가뭄이 일정수준으로 해소될 강우량임에도 수문학적 가뭄 해소에는 영향을 주지 못한 경우가 발생함을 정량적으로 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 다양한 지속기간에 따른 기상학적 가뭄지수 중 강수량을 변수로 하는 SPI와 강수량과 증발산량을 함께 고려하는 SPEI, 유출량을 이용하는 수문학적 가뭄지수인 SDI를 바탕으로 청미천 유역의 1985년부터 2015년까지의 침투 가뭄심도 발생시간을 평가하였다. 이 때 SDI의 경우 SWAT 모형 모의를 통해 산정된 일 유출량 결과를 이용하여 산정하였으며, 기상 자료는 기상청 관할 이천 관측소의 자료를 이용하였다.

가뭄지수 산정결과 SPI의 경우 대부분의 지속기간별 극한 가뭄지수가 2015년도에 몰려있음을 확인할 수 있다. 평균 극한 가뭄지수의 경우 2015년도에 가장 극심한 가뭄이 발생함을 나타내며, 2001년, 2014년 순서이다. SPEI의 경우 2014년도에 지속기간별 극한 가뭄지수 몰려있으며, 평균 극한 가뭄지수의 경우 2014년도에 가장 극심한 가뭄이 발생했으며, 2015년, 2001년 순이다. SDI의 경우 2015년도에 극한 가뭄지수가 몰려있다. 평균 극한 가뭄지수의 경우 2015년도에 가장 극심한 가뭄을 보였으며, 2014년, 2001년 순서로 나타났다. 가뭄지수 분석결과, 2015년에 가장 가뭄에 취약한 연도로 확인되며, 강수의 변화를 확인한 결과 2015년, 2014년도에 현재

히 적은양의 강수가 온 것을 확인할 수 있다. 최근 기후변화로 인한 기온 상승이 증발산량에 영향을 미쳐 가뭄을 더욱 심하게 만들고 있다. 가뭄지수의 SDI에 대한 SPI, SPEI의 침투 가뭄심도 시간을 비교하였다. 효과적인 비교를 위하여 SDI의 가뭄심도가 -1.5 이하로 발생할 경우에 대하여 평가를 하였다. 그 결과 침투 가뭄심도의 발생시기는 SPI, SPEI의 발생 후에 SDI가 발생하는 양상을 보였으며 평균적으로 SDI와 SPI는 0.59개월, SPEI는 0.72개월의 차이를 보인다. 최대 발생지체 시간은 SPI, SPEI 모두 2개월을 보인다. 또한 기상학적 가뭄이 해결될 수 있는 강우량임에도 수문학적 가뭄을 해결하지 못하는 경우가 발생함을 확인하였다. 이는 일정수준 이상의 누적 강우량이 발생해야 수문학적 가뭄을 해결할 수 있다는 것을 의미 한다.

가뭄의 침투 가뭄심도 시간을 확인하였듯이, 기상학적 가뭄이 수문학적 가뭄에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 본 연구에 사용된 기상학적 가뭄지수인 SPI와 SPEI, 수문학적 가뭄지수인 SDI 외에도 다양한 기상학적, 수문학적, 농업학적 가뭄지수들이 있으므로 이들을 포함하는 연구가 필요하다. 또한 청미천 유역은 2016년 이후에도 적은 강수량이 지속되고 있는 상태이므로 이를 포함한 추가 분석이 필요하다. 그리고 본 연구 이후에 다양한 유역에 위의 방법을 적용할 예정이며, 유역의 규모의 변화에 따른 침투가뭄지수의 발생 시기의 변화에 대하여 연구할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Beven, K. (1989). "Changing ideas in hydrology-the case of physically-based models." *Journal of Hydrology*, Vol. 105, pp. 157-172.
- Beven, K. (2002). "Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system." *Hydrological Processes*, Vol. 16, pp. 189-206.
- Blenkinsop, S., and Fowler, H. J. (2007). "Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models." *Journal of Hydrology*, Vol. 342, No. 1-2. pp. 50-71.
- Correia, F. N., Santos, M. A., and Rodrigues, R. P. (1991). "Reliability in regional drought studies." *Water Resources Engineering Risk*

Assessment, pp. 63-72.

- Dagon, S., Berktaç, A., and Singh, V. P. (2012). "Comparison of multi-monthly rainfall-based drought severity indices, with application to semi-arid Konya closed basin, Turkey." *Journal of Hydrology*, Vol. 470-417, pp. 255-268.
- Du Pisani, C. G., Fouché, H. J., and Venter, J. C. (1998). "Assessing rangeland drought in South Africa." *Agricultural Systems*, Vol. 57, No. 3, pp. 367-380.
- Edossa, D. S., Babel, M. S., and Gupta, A. D., (2010). "Drought analysis in the awash river Basin, Ethiopia." *Water Resour. Manage*, Vol. 24, pp. 1441-1460.
- Heim, R. R. (2002). "A review of twentieth-century drought indices used in the United States." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1149-1165.
- Jain, V. K., Pandey, R. P., Jain, M. K., and Byun, H. I. (2015). "Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin." *Weather and Climate Extremes*, Vol. 8, pp. 1-11.
- Keyantash, J., and Dracup, J. (2002). "The quantification of drought: an evaluation of drought indices." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 83, No. 8, pp. 1167-1180.
- 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*, Vol. 48, No. 1, pp. 69-78.
- McKee, T. B., Doeskin, N. J., and Kleist, J. (1993). "Drought monitoring with multiple time scales." Proceeding of 9th Conference on Applied Climatology, *American Meteorological Society*, pp. 233-236.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2012). Report of Cheongmicheon river master plan.
- Nalbantis, I. (2008). "Evaluation of a hydrological drought index." *European Water*, Vol. 23, No. 24, pp. 67-77.
- Shiau, J. T., and Modarres, R. (2009). "Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran." *Meteorological application*, Vol. 16, No. 4, pp. 481-489.
- Sorooshian, S., and Gupta, V. (1995). "Chapter 2: Model calibration." *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh VP, Publications, LLC, Highlands Ranch, CO, pp. 23-68.
- Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., and Vogt, J. (2014). "World drought frequency, duration and severity for 1951-2010." *International Journal of Climatology*, Vol. 34, No. 8, pp. 2792-2804.
- Sung, J., and Chung, E. S. (2014). "Development of stream drought severity-duration-frequency curves using the threshold level method." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 18, pp. 3341-3351.
- Tate, E. L., and Gustard, A. (2000). "Drought definition: A hydrological perspective." *Drought and Drought Mitigation in Europe*, Vol. 14, pp. 23-48.
- Vicente-Serrano, S. M., Begueria, S., and Lopez-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.
- Willhite, D. A., and Glantz, M. H. (1985). "Understanding: the drought phenomenon: The role of definitions." *Water International*, Vol. 10, No. 3, pp. 111-120.
- 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*, Vol. 49, No. 6, pp. 509-518.
- 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.
- Won, K. J., Sung, J. H., and Chung, E. S. (2015). "Parametric assessment of water use vulnerability of South Korea using SWAT model and TOPSIS." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 48, No. 8, pp. 657-657.
- Zhao, L., Lyn, A., Wu, J., Hayes, M., Zhenghong, T., and He, B. (2014). "The impact of meteorological drought on streamflow drought in the Jinghe river basin of China." *Chinese Geographical Science*, Vol. 24, No. 6, pp. 694-705.