



Analysis of peak drought severity time and period using meteorological and hydrological drought indices

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

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

Paper number: 17-111

Received: 27 December 2017; Revised: 6 February 2018 / 28 February 2018; Accepted: 28 February 2018

Abstract

This study analyzed the peak time of drought severity and drought period using meteorological and hydrological drought indices. Standardized Precipitation Index (SPI) using rainfall data was used for meteorological drought and Streamflow Drought Index (SDI) and Standardized Streamflow Index (SSI) using streamflow data were used for the hydrological drought. This study was applied to the Cheongmicheon watershed which is a mixture area for rural and urban regions. The rainfall data period used in this study is 32.5 years (January of 1985~June of 2017) and the corresponding streamflow was simulated using SWAT. After the drought indices were calculated using the collected data, the characteristics of drought were analyzed by time series distribution of the calculated drought indices. Based on the results of the this study, it can be seen that hydrological drought occurs after meteorological drought. The difference between SDI and SPI peak occurrence time, difference in drought start date and average drought duration is greater than SSI and SPI. In general, SSI shows more severe than SDI. Therefore, various drought indices should be used at the identification of drought characteristics.

Keywords: Peak drought severity time, Meteorological drought index, Hydrological drought index, SWAT

기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수를 이용한 침도가뭄심도 발생시점 및 가뭄기간 분석

김수현^a · 정은성^{a*}

^a서울과학기술대학교 건설시스템공학과

요 지

본 연구는 기상학적 및 수문학적 가뭄지수를 이용하여 가뭄사상의 침도 심도 발생시점과 가뭄발생 기간에 대한 연구를 수행하였다. 연구를 수행하기 위해 사용한 가뭄지수로 기상학적 가뭄지수는 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)를 사용하였으며, 수문학적 가뭄지수는 하천가뭄지수(Streamflow Drought Index, SDI)와 표준하천유량지수(Standardized Streamflow Index, SSI)를 이용하였다. 연구 대상지역은 농촌과 도시가 공존하는 청미천 유역을 선택하였으며, 평가기간은 1985년 1월부터 2017년 6월까지 32.5년을 평가하였다 하천유량은 SWAT 모형을 이용하여 산정하였다. 수집한 데이터를 이용하여 가뭄지수를 산정한 후에 시계열을 토대로 가뭄의 특성을 분석하였다. 그 결과 수문학적 가뭄은 기상학적 가뭄이 발생한 후에 발생하는 것을 확인할 수 있다. SDI가 SSI보다 SPI와의 침도 발생시점, 가뭄 시작일의 차이와 평균 가뭄기간이 더 크게 나지만, 가뭄지수의 심도를 비교해보면 일반적으로 SSI가 SDI 보다 심각한 심도를 나타내고 있다. 그러므로 가뭄의 특성을 확인하기 위해서는 기상학적, 수문학적 가뭄지수 등 다양한 가뭄지수를 검토해야 한다.

핵심용어: 침도가뭄심도시점, 기상학적 가뭄지수, 수문학적 가뭄지수, SWAT

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

1. 서론

기후변화의 영향으로 극심한 가뭄이 빈번하게 발생하고 있는 상황이다. 오랜 기간 강수의 부족으로 인하여 장기간의 가뭄이 발생하고, 사회 경제적으로도 큰 피해를 주고 있다. 또한 가뭄은 대한민국에 국한된 자연재해가 아닌 세계적인 자연재해이므로 국내외에서 가뭄의 피해를 줄이려는 많은 연구가 진행되고 있다.

근래 가뭄 연구의 대부분은 가뭄의 정도를 시간적, 공간적으로 정량화하고 있다. 정량화 방법으로 다양한 가뭄지수(Drought Index)를 개발하여 다양한 가뭄을 심도(severity)로 수치화하고 있다(Du Pisani *et al.*, 1998; Heim, 2002; Keyantash and Dracup, 2002). 가뭄의 분류는 일반적으로 농업적(agricultural), 기상학적(meteorological), 수문학적(hydrological), 생태학적(ecological) 및 사회·경제학적(socio-economic) 가뭄 등으로 구분된다(Wilhite and Glantz, 1985; Correia *et al.*, 1991; Tate and Gustard, 2000).

표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI; McKee *et al.*, 1993)는 산출방법이 간단하며 강수량만을 변수로 가뭄 심도를 정량화하기 때문에 가장 대표적인 기상학적 가뭄지수이다. 강수량뿐만 아니라 증발산량을 동시에 고려하여 가뭄을 평가할 수 있는 표준강수증발산지수(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI; Vicente-Serrano *et al.*, 2010)도 빈번하게 이용되고 있는 기상학적 가뭄지수이다(Lee *et al.*, 2015). 수문학적 가뭄지수인 하천수가뭄지수(Streamflow Drought Index, SDI)는 월 유량으로 수문학적 가뭄의 심도와 지속기간을 구분해 내는 방법이다(Nalbantis, 2008).

국내외 가뭄지수를 이용한 연구동향을 분석한 결과 다양한 가뭄지수를 정량화하여 가뭄의 정도를 표현하는 연구 혹은 다양한 가뭄지수간의 영향을 분석하는 연구가 중심을 이룬다. 특히 다양한 가뭄이 서로 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 국가별로 다른 가뭄의 특성을 분석하는 연구가 활발하며(Edossa *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2014), 특히 가뭄심도(drought severity)는 핵심 연구대상이다. 하지만 이러한 연구들은 가뭄 심도의 크기에 따른 빈도(Shiau and Modarres, 2009; Spioni *et al.*, 2014; Sung and Chung, 2014), 지역별 차이(Blenkinsop and Fowler, 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 가뭄발생기간 또는 최대가뭄심도가 발생하는 시점의 차이 등에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. Kim and Chung (2017)은 기상학적 가뭄지수인 SPI 및 SPEI

와 수문학적 가뭄지수인 SDI를 이용하여 침투가뭄심도 시점을 결정하여 비교하였으나 월 단위 지수를 이용하여 정확한 차이를 확인하지 못했다.

따라서 본 연구는 기상학적 가뭄지수인 SPI와 수문학적 가뭄지수인 SDI와 표준하천유량지수(Standardized Streamflow Index, SSI)의 가뭄 발생 시기 및 침투발생 시점에 대하여 일 단위 분석을 하였다. 가뭄지수간의 침투 발생시점의 차이에 대하여 연구하였다. 연구 대상유역은 청미천 유역이며 1985년부터 2017년 6월까지에 대하여 60일, 90일, 120일, 150일의 지속기간을 분석하였다. 연구에서 사용한 가뭄지수는 기상학적 가뭄지수인 SPI와, 수문학적 가뭄지수인 SDI와 SSI를 이용하였으며, 이때 사용한 기상자료는 이천 기상관측소 자료이고, 유출량 자료는 SWAT 모형을 이용하여 모의한 결과이다.

2. 이론적 배경

기상학적 가뭄지수가 수문학적 가뭄지수의 침투 시점에 미치는 영향에 대한 평가하였다. 기상학적 가뭄지수는 SPI를 사용하였으며, 수문학적 가뭄지수는 SDI와 SSI를 사용하였다. 평가기간은 1985년 1월부터 2017년 6월까지이며 지속기간 60일, 90일, 120일, 150일에 대하여 가뭄을 일 단위로 정량화하여 평가하였다. 산정한 기상학적, 수문학적 가뭄지수간의 침투 가뭄심도의 발생시점에 대하여 비교분석하였다.

2.1 SWAT 모형

물 순환 분석을 위해 강우-유출모형은 오랜 기간 동안 사용되어 왔다. 특히 공간분석 기술의 발전은 유역의 특성을 반영하는 다양한 매개변수로 이루어지고 있는 강우-유출모형의 전·후처리에 많은 기여를 했다(Won *et al.*, 2015). 이러한 기술을 바탕으로 분포형(distributed) 및 준분포형(semi-distributed) 모형이 수자원 관리에서 복잡한 문제를 해석하는데 사용되고 있다(Beven, 1989; Beven, 2002). 그 중에서도 SWAT 모형은 토양의 특성과 토지이용 그리고 다양한 기후 조건을 고려하여 유역의 유출량 산정에 효과적으로 사용되고 있다.

SWAT 모형은 작은 셀 단위로 일 단위의 모의가 가능한 분포형 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 등이 있다. 이를 통해 각 수문응답단위(Hydrological Response Unit, HRU) 별로 독립적으로 유출

량이 계산되며 하도추적을 통해 해당 유역의 출구지점에서의 유출량이 계산한다. SWAT 모형에서 수문 부모형은 Eq. (1) 과 같은 물수지 방정식에 근거를 두고 있다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_{surf} - ET_i - W_{secp} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t 는 t 일의 토양수분함량(mm), t 는 시간으로써 일 단위이며, R_i 는 i 일의 강우량(mm), Q_{surf} 는 일의 유출량(mm), ET_i 는 i 일의 증발산량(mm), W_{secp} 은 i 일의 침투량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 환원유출(mm)이다.

2.2 표준강수지수

기상학적 가뭄지수인 SPI는 Mckee *et al.* (1993)에서 발표되었으며, 시간 단위별 누가강수 시계열의 작성, Pearson Type-III (PT-III) 분포를 이용한 매개변수추정, 누가분포함수(cumulative distribution function) 산정 및 표준정규분포에 적용시킨 가뭄지수의 산정 등의 단계로 계산된다. Mckee는 SPI의 지수를 다음과 같이 7단계로 구분하였다. 가뭄은 SPI값이 -1.0 이하일 때 발생하며, 0보다 클 때 가뭄이 끝나게 된다. 가뭄 사상은 가뭄 시점과 종점 사이의 간격으로 정의된 지속 기간과 SPI 값으로 표현되는 가뭄 심도로 표현하며 누적된 가뭄의 총량도 구분할 수 있다. Mckee *et al.* (1993)은 가뭄심도가 -2.0 이하를 Extremely dry, -1.50부터 -1.99까지 Severely dry, -1.49부터 -1.0까지 Moderately dry, -0.99부터 0.99까지 Near normal, 1부터 1.5를 Moderately wet, 1.5부터 1.99를 Very wet, 2.0이상을 Extremely wet으로 구분하였다.

2.3 하천수가뭄지수와 표준하천유량지수

수문학적 가뭄지수인 SDI는 다음과 같이 계산되며, $Q_{i,j}$ 는 월 유량, 누적값 $V_{i,k}$ 는 Eq. (2)와 같이 계산된다(Nalbantis, 2008).

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

$$i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, 12, k = 1, 2, 3, \dots, 12$$

하지만 본 연구는 일 단위 SDI를 사용하므로 다음 Eq. (3)이 이용된다.

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

$$i = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots, 365, k = 60, 90, 120, 150$$

여기서, $V_{i,k}$ 는 i 번째 연도에서 k 기간 동안 누가한 유량이다. 예를 들어 $k = 60$ 이면 특정 년도의 1일부터 60일, $k = 90$ 이면 1일부터 90일, $k = 120$ 이면 1일부터 120일까지 기간을 의미한다.

누가한 유량 $V_{i,k}$ 를 이용하여 SDI는 특정 i 번째 연도의 k 기간에 대하여 Eq. (4)와 같이 정의할 수 있다.

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{s_k} \quad (4)$$

여기서, \bar{V}_k 와 s_k 는 각각 누적한 하천수량의 평균과 표준편차를 나타낸다. 임계수준은 주로 평균인 \bar{V}_k 가 사용된다. 작은 규모의 하천에는 유량이 Gamma 분포형에 근사하게 되어 확률분포형이 왜곡되므로 유량을 정규분포에 적합하게 변환해야 한다(Yeh *et al.*, 2015). 2변수 대수정규(log-normal) 분포형으로 변환하면, SDI는 최종적으로 Eq. (5)와 같으며, y 는 Eq. (6)과 같이 하천수량에 자연로그를 취한 값이다.

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \bar{y}_k}{s_{y,k}}, \quad i = 1, 2, \dots, k = 60, 90, 120, 150 \quad (5)$$

$$y_{i,k} = \ln(V_{i,k}), \quad i = 1, 2, \dots, k = 60, 90, 120, 150 \quad (6)$$

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.

SSI는 Vicente-Serrano *et al.* (2011)에 소개되어 있으며, 일 유량의 누적 확률함수인 $F(x)$ 와 표준단위 정규화과정을 거쳐 가뭄지수를 산출한다. 누적 확률함수인 $F(x)$ 는 SSI 산출에 필수 과정이다. 6가지의 분포형식(log-normal, Pearson type III, log-logistic, General Extreme Value, Generalized Pareto and Weibull) 중에서 일 유량 자료에 가장 적합한 분포를 찾아낸다.

3. 연구대상 지역

청미천은 남한강 하류에 속하며, 청미천 유역은 행정구역 상 여주, 이천, 안성, 용인, 음성의 전체 혹은 부분으로 구성되

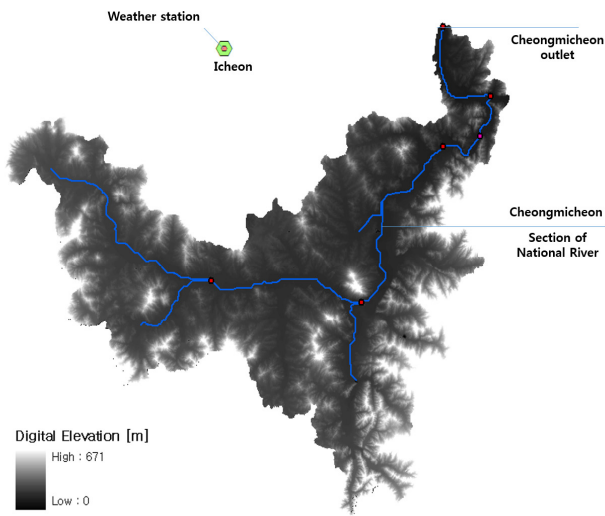


Fig. 1. Description of Chungmicheon watershed including DEM, weather station and stream network

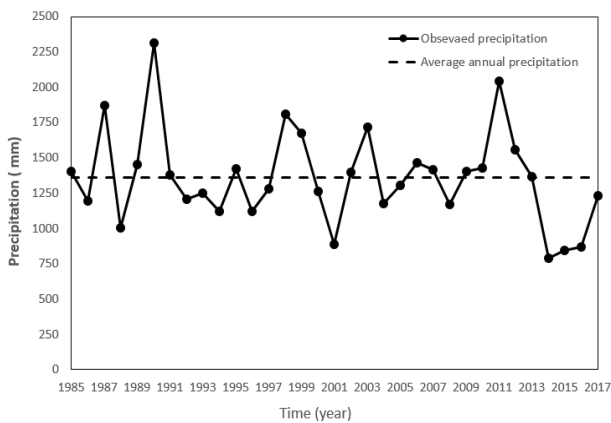


Fig. 2. Time series of annual precipitation and average annual precipitation (1985~2017)

어있다. 총 유역면적은 596.13 km²이며 농경지 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. Fig. 1은 청미천의 유역도이다. 유역 내에 위치한 기상관측소가 없어 가장 가까운 기상청 관할 관측소인 이천 기상관측소의 자료를 이용하였다. 본 연구에서는 이천 기상관측소의 1985년 1월부터 2017년 6월까지의 일강수량 자료를 이용하였는데 이 기간의 연평균 강수량은 Fig. 2와 같다. 1985년부터 2017년의 평균 연 강수량은 1,358.6 mm이며, 1990년에는 2,313.3 mm로 가장 많았으며 2001년에는 884.9 mm로 적었다. 근래에는 2014년에 791.5 mm, 2015년에 841.5 mm, 2016년에 870.3 mm로 연속 3년간 매우 적은 강수량을 보여서 장기간 가뭄피해가 있었다.

4. 연구결과

가뭄을 평가하기 위하여 기상학적 가뭄지수로는 SPI를, 수문학적 가뭄지수는 SDI와 SSI를 이용하였다. SPI의 강수량 자료는 1985년 1월부터 2017년 6월까지 이천기상관측소에서 수집하였으며, SDI와 SSI에 대한 일 유출량을 SWAT 모형을 모의하여 산정하였다. 가뭄지수를 평가하면서 지속기간 60일, 90일, 120일, 150일에 대한 일 단위 가뭄지수를 산출하였다.

4.1 일 가뭄지수 평가

일 가뭄지수의 지속시간별 각 가뭄지수의 심각한 심도순서로 정리한 결과를 Table 1과 같이 정리하였다. SPI의 경우 모든 지속기간에 대하여 2001년 6월 17일에 가장 극심한 가뭄

Table 1. Three most severe drought events based on SPI, SDI and SSI

Duration		60 days		90 days		180 days		270 days	
Drought	Rank	Date (yy-mm-dd)	Drought severity	Date (yy-mm-dd)	Drought severity	Date (yy-mm-dd)	Drought severity	Date (yy-mm-dd)	Drought severity
SPI	1	01-06-17	-4.58	01-06-17	-4.41	01-06-16	-3.06	01-06-17	-2.92
	2	00-03-25	-4.30	00-04-18	-3.61	00-05-18	-2.91	00-06-20	-2.58
	3	17-06-18	-3.43	17-06-20	-2.81	17-06-30	-2.69	17-06-20	-2.57
SDI	1	15-11-24	-1.91	89-01-16	-2.10	15-10-31	-1.95	15-11-24	-1.91
	2	16-12-08	-1.87	01-06-17	-2.00	00-06-22	-1.91	16-12-08	-1.87
	3	14-07-25	-1.86	17-06-20	-1.86	89-02-09	-1.85	14-07-25	-1.86
SSI	1	01-06-17	-4.01	01-06-17	-3.30	00-05-26	-2.67	00-06-21	-2.55
	2	17-06-23	-2.92	00-05-25	-2.73	17-06-30	-2.35	17-06-30	-1.99
	3	00-05-06	-2.80	17-06-20	-2.57	01-06-29	-1.91	15-11-06	-1.83

Table 3. Results of drought periods and peak time from SPI, SDI and SSI

No.	SPI (yy-mm-dd)			SDI (yy-mm-dd)			SSI (yy-mm-dd)		
	Period		Peak time	Period		Peak time	Period		Peak time
	Start	End		Start	End		Start	End	
Duration - 60 days									
1	88-05-13	88-05-30	88-05-20	88-04-25	88-07-08	88-05-28			
2	88-09-17	89-01-06	88-11-12	88-12-12	89-03-02	89-02-23	88-10-22	89-02-02	89-01-04
3	95-06-20	95-07-09	95-06-30				95-06-20	95-07-09	95-07-07
4	97-10-03	97-11-11	97-10-03				97-10-08	97-12-11	97-11-24
5	99-01-08	99-03-17	99-03-12				99-02-15	99-03-18	99-03-13
6	00-03-06	00-06-23	00-03-25	00-05-13	00-07-21	00-06-21	00-03-23	00-07-21	00-05-06
7	01-04-20	01-06-28	01-06-17				01-04-28	01-06-29	01-06-17
8	01-12-08	02-01-14	01-12-11				01-12-08	02-01-26	02-01-14
9	07-01-26	07-02-01	07-01-28	07-02-06	07-04-01	07-03-03	06-12-02	07-02-28	07-01-28
10	14-04-02	14-04-27	14-04-26				14-04-09	14-06-02	14-04-26
11	14-06-29	14-09-12	14-07-11	14-06-29	15-01-11	14-07-25	14-06-29	14-10-20	14-08-09
12	15-06-30	15-10-28	15-09-24	15-07-16	16-02-03	15-11-24	15-07-05	15-12-05	15-10-25
13	16-08-03	16-10-10	16-09-14	16-08-21	17-02-28	16-12-08	16-08-11	16-12-21	16-09-21
14	17-04-23	17-06-30	17-06-18	17-05-21	17-06-30	17-06-20	17-05-03	17-06-30	17-06-23
Duration - 90 days									
1	88-10-12	89-01-10	88-10-21	88-10-18	89-02-26	89-01-16	88-10-20	89-02-25	89-01-19
2	00-04-01	00-07-21	00-04-18	00-04-10	00-07-21	00-06-20	00-04-10	00-07-21	00-05-25
3	01-04-21	01-06-29	01-06-17	01-05-19	01-07-26	01-06-17	01-05-19	01-07-23	01-06-17
4	02-01-07	02-01-16	02-01-13	01-12-19	02-02-17	02-01-14			
5	06-11-07	06-12-16	06-11-25	06-12-19	07-02-28	07-02-09	06-12-20	07-03-11	07-02-09
6	14-05-02	14-10-14	14-07-30	14-05-02	14-11-12	14-09-24	14-05-02	14-11-09	14-09-02
7	15-07-03	15-11-12	15-09-24	15-07-15	15-12-27	15-10-25	15-07-14	15-12-24	15-11-01
8	16-08-01	16-11-07	16-10-04	16-08-09	17-01-15	16-10-16	16-08-16	17-01-11	16-10-16
9	17-04-28	17-06-30	17-06-20	17-05-13	17-06-30	17-06-20	17-05-14	17-06-30	17-06-20
Duration - 120 days									
1	88-11-11	89-01-19	88-11-20	88-11-17	89-02-28	89-02-09	88-11-17	89-03-02	89-02-09
2	00-04-01	00-06-28	00-05-18	00-05-04	00-07-21	00-06-22	00-05-04	00-07-21	00-05-26
3	01-05-07	01-06-16	01-06-16	01-05-20	01-07-29	01-06-28	01-05-20	01-06-16	01-06-16
4	01-06-29	01-07-23	01-06-29				01-06-29	01-07-28	01-06-29
5	06-11-25	07-01-27	06-11-26	07-01-09	07-02-28	07-02-12	07-01-13	07-03-28	07-03-03
6	14-06-01	14-11-10	14-07-22	14-06-01	14-12-12	14-07-25	14-06-29	14-12-08	14-07-25
7	15-07-10	15-12-01	15-10-25	15-07-16	16-01-13	15-10-31	15-07-18	16-01-12	15-10-26
8	16-08-06	16-12-13	16-11-03	16-08-18	17-02-05	16-11-08	16-08-21	17-02-01	16-11-13
9	17-04-21	17-06-30	17-06-30	17-05-19	17-06-30	17-06-23	17-05-24	17-06-30	17-06-30
Duration - 150 days									
1	88-04-22	88-07-08	88-05-29	88-04-25	88-07-08	88-05-28	88-04-25	88-07-08	88-05-30
2	88-12-10	89-02-24	88-12-20	88-12-12	89-03-02	89-02-23	88-12-16	89-03-02	89-02-23
3	00-03-29	00-07-21	00-06-20	00-05-13	00-07-21	00-06-21	00-05-15	00-07-21	00-06-21
4	01-05-10	01-06-29	01-06-17				01-06-05	01-06-29	01-06-17
5	06-12-25	07-02-26	06-12-26	07-02-06	07-04-01	07-03-03			
6	14-06-29	14-12-11	14-07-22	14-06-29	15-01-11	14-07-25	14-06-29	15-01-03	14-07-25
7	15-07-09	15-12-12	15-09-29	15-07-16	16-02-03	15-11-24	15-07-17	16-02-02	15-11-06
8	16-08-03	17-01-03	16-12-08	16-08-21	17-02-28	16-12-08	16-08-27	17-02-27	16-12-08
9	17-05-18	17-06-30	17-06-20	17-05-21	17-06-30	17-06-20	17-05-22	17-06-30	17-06-30

Table 4. Time differences of peak and starting dates of severe drought events between meteorological and hydrological indices

No. of Event	SDI		SSI	
	Peak	Start	Peak	Start
Duration - 60 days				
1	8	-18		
2	103	86	53	35
3			7	0
4			52	5
5			1	38
6	88	68	42	17
7			0	8
8			34	0
9	34	11	0	-55
10			0	7
11	14	0	29	0
12	61	16	31	5
13	85	18	7	8
14	2	28	5	10
Average	49.38	26.13	20.08	6.00
Duration - 90 days				
1	87	6	90	8
2	63	9	37	9
3	0	28	0	28
4	1	-19		
5	76	42	76	43
6	56	0	34	0
7	31	12	38	11
8	12	8	12	15
9	0	15	0	16
Average	36.22	11.22	35.88	16.25
Duration - 120 days				
1	81	6	81	6
2	35	33	8	33
3	12	13	0	13
4			0	0
5	78	45	97	49
6	3	0	3	28
7	6	6	1	8
8	5	12	10	15
9	-7	28	0	33
Average	26.63	17.88	22.22	20.56
Duration - 150 days				
1	-1	3	1	3
2	65	2	65	6
3	1	45	1	47
4			0	26
5	67	43		
6	3	0	3	0
7	56	7	38	8
8	0	18	0	24
9	0	3	10	4
Average	23.88	15.13	14.75	14.75

였고, 평균 가뭄기간은 111일, 최대 194일, 최소 48일을 보이고 있다. SPI와의 가뭄 시작은 평균 11일 차이를 보이고 있으며, 침투 발생시기의 차이는 36일의 차이를 보인다. SSI는 8번의 가뭄이 발생하였고, 평균 가뭄기간은 116일, SPI와의 가뭄 시작일 차이는 평균 16일, 침투 발생일 차이는 SDI와 같은 36일을 보이고 있다.

지속기간 120일의 경우 SDI는 8번의 가뭄이 발생하였고, SDI의 평균 가뭄기간은 111일을 보이고 있다. SDI와 SPI의 가뭄 시작일의 차이는 평균 18일, 침투 발생일의 차이는 평균 27일을 보인다. SSI 기준으로는 9번의 가뭄이 발생하였다. SSI의 평균 가뭄기간은 95일이며 최대 178일, 최소 29일의 가뭄기간을 보인다. SSI의 SPI와의 가뭄 시작일의 차이는 평균 21일, 침투 발생일의 차이는 22일을 보인다.

지속기간 150일의 경우 SDI는 8번의 가뭄이 발생하였으며, 평균 가뭄기간은 113일이다. 최대 가뭄기간은 202일로 2015년에 발생하였으며, SPI와의 가뭄 시작일 차이는 15일, 침투 가뭄발생일의 차이는 24일이다. SSI의 경우 8번의 가뭄이 발생하였고, 평균 107일의 가뭄기간을 보인다. SPI와의 가뭄 시작일과 침투 발생일은 각각 15일씩 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 지속기간이 증가함에 따라 소규모의 가뭄지수의 빈도가 낮아져 전체적인 발생 빈도가 감소하였으며, SPI와의 평균 가뭄 시작일과 침투 발생 시기의 차이는 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 청미천 유역의 2017년 6월까지의 강우량 자료를 이용하여 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수 간의 침투 가뭄지수 발생시점의 차이에 대하여 일 단위로 분석하였다. 기상학적 가뭄지수는 강수량만을 고려한 SPI를 선택하였으며, 수문학적 가뭄지수는 유출량을 변수로 하는 SDI, SSI를 사용하였다. 수문학적 가뭄지수를 산정하는데 필요한 일 유출량 자료는 SWAT을 이용하여 산정하였다. 지속기간 60일, 90일, 120일, 150일에 대하여 분석을 하였으며, 효과적인 분석을 위해 수문학적 가뭄지수가 심도 -1.5 이하의 가뭄사상에 대하여 조사하였다.

정량화한 각 가뭄지수에 대한 분석결과 SPI는 지속기간의 변화에 상관없이 비슷한 시기에 극심한 가뭄이 발생하였음을 알 수 있다. 모든 지속기간에 대하여 2001년이 가장 극심한 기상학적 가뭄이 발생하였다. SDI는 지속기간의 변화에 따라 가뭄지수의 극심함 순위가 변동되지만 2014년부터 2017년

까지 심각한 가뭄이 빈번하게 발생함을 확인할 수 있었다. SSI는 SPI와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 SSI와 SPI가 비슷한 방법을 이용하여 산출되었기도 하지만, 기상학적 가뭄이 수문학적 가뭄과 관련성이 매우 높기 때문으로 볼 수 있다.

가뭄지수간의 영향을 분석하기 위하여 각 가뭄지수간 발생 횟수, 가뭄기간, 침투가뭄 발생시점을 비교하였다. 다양한 형태의 가뭄지수를 분석하여 모든 지속기간의 가뭄사상의 평균 가뭄기간을 분석한 결과 33번의 SDI 평균 가뭄기간은 112.1일을 38번의 SSI 평균 가뭄기간은 96.8일, 38번의 SPI의 평균 가뭄기간은 80.3일을 보이고 있다. 또한 전체 지속기간의 가뭄사상 시작시점은 SDI와 SPI는 17.4일의 차이를 보였고 SSI와의 차이는 13.4일을 보였다. SPI와의 침투 가뭄의 발생시점의 차이는 SDI가 34.1일, SSI가 22.8일을 보였다. 이러한 SDI와 SSI의 차이가 발생하는 이유는 가뭄지수를 산정하는 방법에 따른 차이로 발생한다. SDI의 경우 log-normal 분포를 자연지수화 하고, SSI는 정규분포를 따른다. 가뭄지수마다의 산정 방법에 따른 결과가 다르듯이 가뭄에 대한 결과를 도출할 때 한 가지 가뭄지수로 결정하는 것에는 무리가 있다고 판단된다.

이러한 결과를 바탕으로 수문학적 가뭄지수는 기상학적 가뭄과 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있으며, SDI가 SSI보다 SPI와의 침투 발생시점, 가뭄 시작일의 차이와 평균 가뭄기간이 더 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 하지만 두 가뭄지수의 심도를 비교해보면 SSI가 SDI 보다 심각한 심도를 나타내고 있다. 이러한 연구를 바탕으로 다양한 유역을 대상으로 가뭄지수간의 특성을 비교 분석함에 있어 유역의 경사, 유역의 개발상태, 유역의 규모 등 다양한 유역의 특성변화에 따른 가뭄지수의 변화에 대하여 연구할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- Beven, K. (1989). "Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models." *Journal of Hydrology*, Vol. 105, No. 1-2, pp. 157-172.
- Beven, K. (2002). "Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system." *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 2, 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. 43-62.
- 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. 470-471, 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 Resources Management*, Vol. 24, No. 7, 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.
- Kim, S. H., and Chung, E. S. (2017). "Peak drought index analysis of Cheongmicheon watershed using meteorological and hydrological drought index." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 1, pp. 65-73.
- 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." *Proceedings 9th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society, pp. 233-236.
- 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, No. 5, pp. 881-897.
- 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.
- 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.
- Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., and Morán-Tejeda, E. (2011). "Accurate computation of a streamflow drought index." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 318-332.
- Wilhite, 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 Cheongmi-cheon 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.
- Yeh, C.-F., Wang, J., Yeh, H.-F., and Lee, C.-H. (2015) "SDI and Markov chains for regional drought characteristics." *Sustainability*, Vol. 7, No. 8, pp. 10789-10808.
- 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.