



Characteristics of the Han River Basin drought using SPEI and RDI

Won, Kwang Jai^a · Chung, Eun-Sung^{a*} · Lee, Bo-Ram^b · Sung, Jang Hyun^c

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

^bMinistry of Public Safety and Security, National Disaster Management Institute, Disaster Information Research Division

^cMinistry of Land, Infrastructure and Transport, Geum River Flood Control Office

Paper number: 15-084

Received: 8 October 2015; Revised: 17 December 2015 / 14 January 2016; Accepted: 14 January 2016

Abstract

Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) considering evapotranspiration and precipitation is generally used to quantify the drought severity. Also, Reconnaissance Drought Index (RDI) has been frequently used in the arid regions which is suffering severe droughts, but drought analysis in association with RDI has been the focus of few studies in South Korea. Therefore, this study compared two meteorological drought indices based on precipitation and evapotranspiration using Thornthwaite, Hargreaves, and Blaney-Criddle evapotranspiration calculation methods. Meteorological data of sixteen weather stations which are operated by Korea Meteorological Administration (KMA) were used to quantify drought and to compare characteristics of drought for the Han River Basin from 1992 to 2015. As a result, in case of Han River Basin, severe drought sharply increased in recent years. While the correlation coefficients are relatively high between the SPEIs and RDIs, the drought severity and year of severe drought are partially different. Therefore, it is necessary that RDI will be also measured to quantify severity and occurrence year of drought.

Keywords: Drought severity, Evapotranspiration, Han River Basin, RDI, SPEI

SPEI와 RDI를 이용한 한강유역 가뭄의 특징 분석

원광재^a · 정은성^{a*} · 이보람^b · 정장현^c

^a서울과학기술대학교 건설시스템공학과, ^b국민안전처 국립재난안전연구원 재난정보연구실, ^c국토교통부 금강홍수통제소 예보통제과

요 지

증발산량과 강수량을 변수로 하는 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)는 보편적으로 기상학적 가뭄심도를 정량화 하는데 이용되고 있다. 또한 RDI (Reconnaissance Drought Index)는 가뭄의 피해를 받고 있는 지역에 활용도가 높은 가뭄지수이지만 이를 이용한 국내 적용사례는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Thornthwaite, Hargreaves, Blaney-Criddle 증발산량 산정 방법을 이용하여 증발산량과 강수량을 변수로 하는 SPEI와 RDI를 비교하였다. 1992년부터 2015년까지 한강 유역에 대한 가뭄 정량화 및 특징 비교를 위해 기상청 관할 16개 지점의 기상자료를 이용하였다. 연구결과, 한강유역의 경우 최근 들어 급격히 극한 가뭄이 발생하고 있는 지점들이 증가하였다. 두 가뭄지수 사이에 상관정도는 비교적 높았으나 가뭄의 심도 및 극한가뭄의 발생 연도 사이에는 일부 차이를 보였다. 따라서 가뭄 심도와 발생 시기의 정량화를 위해 RDI 또한 활용이 필요함을 확인하였다.

핵심용어: 가뭄 심도, 증발산량, 한강유역, RDI, SPEI

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

1. 서론

최근 지구온난화에 따른 기후시스템의 변화로 과거에 경험하지 못했던 규모의 기상재해가 빈번히 발생하고 있으며, 피해규모도 전 지구적으로 증가하고 있다. 그 중에서 가뭄은 홍수와 더불어 우리나라에서 빈번히 발생하는 기상재해 중 하나로서 그 양상이 복잡하고 특히, 광역적으로 발생하고 있어 발생 시기, 장소, 원인을 규명하는 것이 쉽지 않다(Bae *et al.*, 2013). 이러한 가뭄으로 인한 하천 유량의 부족은 생태계 기능 및 서비스 유지를 어렵게 하여 생태계 파괴로 이어질 수 있으므로(Falkemark, 2003), 미래 충분한 물 공급을 보장하는 것은 인간과 생태계의 공존을 위해 필수적 가치로 볼 수 있겠다(Oki and Kanne, 2006).

가뭄은 일반적으로 농업적(agricultural), 기상학적(meteorological), 수문학적(hydrological) 및 사회·경제학적(socio-economic) 가뭄으로 구분된다(Wilhite and Glantz, 1985; Corrcia *et al.*, 1991; Tate and Gustard, 2000). 각각의 가뭄은 목적에 따라 여러 지수들로 분석되고 있다. 가뭄에 따른 피해에 대응하고 관리하기 위하여 전 세계적으로 SPI (Standardized Precipitation Index; Mckee *et al.*, 1993), SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index; Vicente-Serrano *et al.*, 2010), SDI (Streamflow Drought Index; Nalbantis, 2008), PDSI (Palmer Drough Severity Index; Palmer, 1965), SWSI (Surface Water Supply Index; Shafer and Dezman, 1982), Streamflow drought severity-duration-frequency (SDF) curve (Sung and Chung, 2014) 등과 같은 다양한 가뭄지수가 개발되어 가뭄의 심도(severity)를 정량화하려는 연구가 진행 중이며, 관심분야에 따라 각기 다른 변수들을 이용한 가뭄지수로 가뭄의 심도와 지속기간 또한 분석되고 있다(Du Pisani *et al.*, 1998; Heim, 2002; Keyantash and Dracup, 2002; Lee, *et al.*, 2015).

그중 가장 빈번하게 연구되고 있는 기상학적 가뭄은 강수량 규모에 의존하여 구분되며 전 세계적으로 이용한 다양한 지수들이 개발되어 활용되고 있다(Keyantash and Dracup, 2002; Hernandez and Uddameri, 2013). SPI는 계산과정이 쉽고, 강수의 부족만으로 가뭄을 직관적으로 판단할 수 있어 가장 빈번하게 이용되고 있다. 최근에는 강수량과 증발산량을 함께 고려하여 조금 더 물리적으로 가뭄을 평가할 수 있는 SPEI가 많은 주목을 받고 있다(Lee *et al.*, 2015).

Lee *et al.* (2015)는 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수 간의 가뭄의 정도를 비교하였는데, 기상학적 가뭄의 평가에 SPI와 SPEI를, 수문학적 가뭄의 평가에는 SDI를 사용하여

상관정도를 분석하였다. Nam *et al.* (2015)은 과거 30년(1981-2010)년과 RCP (Representative Concentration Pathways) 기후변화 시나리오를 바탕으로 한 2011년부터 2100년까지의 가뭄에 기상학적 가뭄지수인 SPEI를 적용하였다. 강수의 부족이 가뭄 발생에 직접적인 영향을 미치므로 여전히 대부분의 가뭄 연구에서 기상학적 가뭄지수의 활용도는 매우 높은 편이며, 기상학적 가뭄지수 중 기온 자료를 이용하여 증발산량을 반영하는 SPEI에 대한 관심과 활용이 커지고 있다. 수요와 공급이 고려된 물리적인 지수임에는 분명하지만 적용에 앞서 유사한 지수들과의 검토를 통하여 성능을 검토할 필요가 있다.

또한 가뭄 피해의 내재된 복잡성(complexity)으로 인하여 하나의 가뭄지수가 모든 지역 또는 평가에 이상적이지 않음을 내재하고 있다. 따라서 특정한 연구 및 수자원 관리 목적에 따라 적절한 지수들의 민감도와 정확성을 판단하기 위해 여러 개의 가뭄지수를 동시에 고려하고 서로 어떻게 나타나는지 분석하는 연구는 매우 필요하다(Morid *et al.*, 2006; Smakhtin and Hughes, 2007; Banimahd and Khalili, 2013). 본 연구에서는 SPEI와 같이 강수량과 증발산량을 변수로 최근 들어 다양한 연구에서 활용(Farajalla and Ziade, 2010; Khalili *et al.*, 2011; Vangelis *et al.*, 2013)되고 있지만 국내의 경우 관련 연구가 전무한 RDI (Reconnaissance Drought Index; Tsakiris, 2004) 가뭄 지수와 기존에 흔히 사용되고 있는 SPEI를 적용하여 가뭄의 특징 및 상관정도를 비교하였다. 연구 대상 지역은 최근 가뭄에 대한 피해가 증가되고 있는 한강유역으로써 1991년부터 2015년까지의 기상자료를 이용하여 SPEI와 RDI를 계산하였고, 각 가뭄지수를 통하여 과거 가뭄의 특징을 알아보았다.

2. 이론적 배경

2.1 SPEI

강수량과 잠재 증발산량인 PET (Potential Evapo-Transpiration)의 차이에 의해 계산되는 SPEI의 가뭄심도는 SPI의 분류 기준과 같다(Table 1). Eq. (1)과 같이 증발산량 계산이 간단하며, 자료 획득이 쉬운 Thornthwaite (Thornthwaite, 1948)방법을 사용하였으며, 산정 과정은 다음과 같다(Vicente-Serrano, 2010).

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (1)$$

Table 1. Ranges for drought condition according to SPEI (Mckee et al., 1993)

SPEI range	Drought condition
> 2.00	Extremely wet
1.50 ~ 1.99	Very wet
1.00 ~ 1.49	Moderately wet
-0.99 ~ 0.99	Near normal
-1.00 ~ -1.49	Moderately dry
-1.50 ~ -1.99	Severely dry
< -2.00	Extremely dry

여기서 T 는 월평균 기온으로 단위는 $^{\circ}\text{C}$, I 는 열지수(heat index)로 월(monthly) 열지수를 합하여 구한 연(annual) 열지수를 의미한다. m 은 월단위이다.

각기 다른 시간 규모에 따라 Eq. (2)와 같이 강수량과 증발산량의 차로 산정되는 D_i 는 시간 규모에 따라 합성되며, Eq. (3)으로부터 합성된 D_i 의 확률분포는 Log-logistic 분포를 이용하여 매개변수 산정한 후, 표준정규분포로 변환하여 가뭄지수를 산정하게 된다.

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

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

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

2.2 RDI

Tsakiris (2004)가 MEDROPLAN (Mediterranean Drought Preparedness and Mitigation Planning)에서 처음 선보인 가뭄지수인 RDI는 시계열 α_k 를 이용하여 계산된다. i 월에 해당하는 강수량과 잠재증발산량(PET)의 비의 시계열 α_k 는 Eq. (4)와 같다(Tigkas et al., 2011).

$$\alpha_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}} \quad i=1(1)N \text{ and } j=1(1)k \quad (4)$$

여기서 P_{ij} 와 PET_{ij} 는 i 번째 년도의 j 번째 월의 강수량 및 증발산량이며 N 은 사용가능 한 연도수이다.

α_k 값은 가뭄을 판단하려는 지역의 다른 시간규모(time

Table 2. Ranges for drought condition according to RDI (Tsakiris, 2004)

RDI range	Drought condition
> 2.00	Extremely wet
1.50 ~ 1.99	Severely wet
1.00 ~ 1.49	Moderately wet
0.01 ~ 0.99	Mild wet
0.01 ~ -0.99	Mild dry
-1.00 ~ -1.49	Moderately dry
-1.50 ~ -1.99	Severely dry
< -2.00	Extremely dry

scale)와 다양한 지점들에 대한 Lognormal과 Gamma 분포 모두를 만족한다. Lognormal 분포를 적용할 경우, 표준화된(standardized) RDI_{st} 는 Eq. (5)와 같다.

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^{(i)} - \bar{y}}{\hat{\sigma}_y} \quad (5)$$

여기서 $y^{(i)}$ 는 $\ln(a_k^{(i)})$ 이며, \bar{y} 는 산술평균이며 $\hat{\sigma}_y$ 는 표준편차이다.

Gamma 분포를 적용할 경우, 표준화된 RDI_{st} 는 주어진 빈도 분포에 대한 Gamma 확률밀도함수(PDF, Probability Density Function)에 의해 계산된다(Tigkas 2008; Tsakiris et al., 2008). 무강우를 포함하는 월별 기간에 대한 RDI_{st} 산정 문제를 해결할 수 있고 대부분의 연구에서 적용성이 높은 Gamma 분포를 이용하였다(Tsakiris et al., 2008; Asadi Zarch et al., 2011). RDI 값에 대한 가뭄의 분류는 Table 2와 같다.

3. 연구결과

3.1 대상지역

한국수자원공사 가뭄 관리 모니터링 체계 수립 보고서 KWRC (2005)에 따르면 2001년의 주요 가뭄 지역을 한강 유역으로 구분하였고, KEI (2011)의 연구에서도 2001년의 가뭄 지역을 경기, 강원, 충북, 충남 및 경북 지역으로 정하였으며 당시 평년 강수량의 32% 수준을 보였으며, 가뭄 면적은 190 km^2 , 관측 이래 90년만의 극심한 가뭄임을 밝혔다. 2008년과 2009년의 강원 산간 지역을 가뭄 발생지역으로 구분하였는데 당시 2008년 8월부터 2009년 초까지 강수량은 평년 대비 29% 수준으로 299 mm에 불과하였다. 따라서 본 연구에서는

Fig. 1과 Table 3과 같이 한강 유역의 기상청 관할 16개의 강우 관측소인 속초, 철원, 대관령, 춘천, 강릉, 서울, 인천, 원주, 수원, 충주, 강화, 양평, 이천, 인제, 홍천, 제천을 바탕으로 1992년부터 2015년까지의 24년간 월 강우 및 평균기온 자료를 사

용하여 가뭄의 심도를 계산하였다.

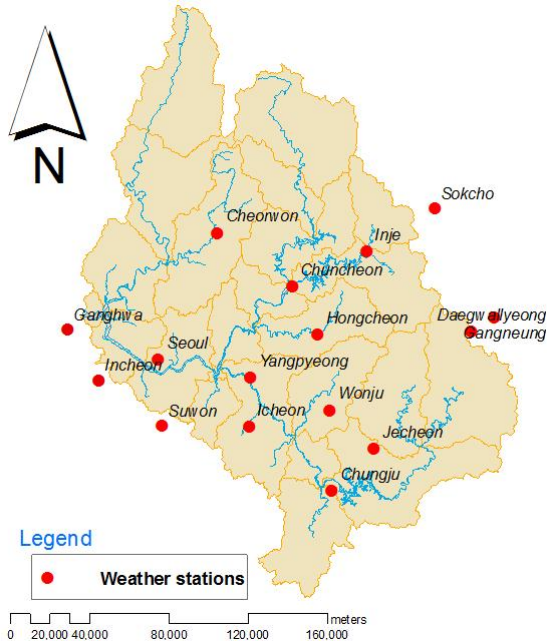


Fig. 1. Location of selected weather stations in the Han River Basin

3.2 SPEI 산정

각 지점의 지속기간별(3개월, 6개월, 9개월) SPEI 산정 결과, 지점별 극한가뭄의 발생연도 및 심도(severity)는 Table 3과 같다. 각 지속기간에 대한 지점별 극한 가뭄의 형태를 살펴 보면, 1) 지속기간이 3개월일 경우, 2001년에 상대적으로 많은 지점에서 극한가뭄의 형태를 보였으며, 충주 -2.55, 강화 -2.41, 제천 -2.32 순으로 가장 극심한 가뭄을 나타냈으며, 2) 지속기간이 6개월일 경우, 2014년과 2015년이 다른 연도에 비해 가장 극심한 가뭄을 보이는 지점들이 많았으며, 그 중 강화 -2.64, 충주 -2.63, 대관령 -2.54 순을 보였으며, 3) 지속기간이 9개월일 경우, 지속기간 6개월과 마찬가지로 2014년과 2015년에 상대적으로 많은 지점에서 극한가뭄의 형태를 보였으며, 강화 -3.28, 대관령 -2.65, 홍천 -2.50 순으로 가장 극심한 가뭄이 나타났다.

3.3 RDI 산정

잠재증발산량 산정 방법에 따라 RDI 가뭄지수의 변화를 확인하였다. 잠재증발산량 산정 방법에는 증발산량은 이론과 기온에 비례한다는 가정하에 평균기온이 적용되는 Thornthwaite, 최대, 최소, 평균기온이 적용되는 Hargreaves, 평균기온과 온도보정계수를 바탕으로 산정되는 Blaney-Criddle 방법이 사

Table 3. Occurrence years and maximum drought severities of extreme drought according to durations (SPEI)

Weather station	Duration 90-day		Duration 180-day		Duration 270-day	
	Occurrence year	Drought severity	Occurrence year	Drought severity	Occurrence year	Drought severity
Sokcho	2001	-2.03	2015	-2.06	1997	-2.27
Cheorwon	2001	-2.22	2014	-2.09	2014	-2.17
Daegwallyeong	2015	-1.89	2015	-2.54	2015	-2.65
Chuncheon	2014	-2.14	2014	-2.27	2014	-2.29
Gangneung	1995	-1.84	2014	-2.21	1997	-1.85
Seoul	1998	-2.17	2015	-2.21	2015	-2.22
Incheon	2001	-1.97	2015	-2.31	2015	-2.41
Wonju	2014	-2.36	2014	-2.40	2014	-2.39
Suwon	2015	-2.34	2015	-2.45	2015	-2.34
Chungju	1992	-2.55	2014	-2.63	2014	-2.40
Ganghwa	2006	-2.41	2015	-2.64	2015	-3.28
Yangpyeong	2015	-2.09	1999	-2.25	2015	-1.92
Icheon	2006	-2.26	2015	-2.17	2014	-2.19
Inje	2001	-2.06	2014	-2.20	2014	-1.90
Hongcheon	2001	-1.95	2015	-2.25	2015	-2.50
Jecheon	1999	-2.32	2014	-2.27	2002	-1.99

용되었다.

3.3.1 Thornthwaite 방법

첫 번째로 Thornthwaite 방법의 적용을 통한 각 지점의 지속기간별(3개월, 6개월, 9개월) RDI 산정 결과, 지점별 극한 가뭄의 발생연도 및 심도는 Table 4와 같다. 각 지속기간에 대한 지점별 극한 가뭄의 형태를 살펴보면, 1) 지속기간이 3개월일 경우, 2001년에 상대적으로 많은 지점에서 극한가뭄의 형태를 보였으며, 서울 -3.04, 양평 -3.03, 이천 -3.00 순으로 가장 극심한 가뭄을 나타냈으며, 2) 지속기간이 6개월일 경우, 2015년이 다른 연도에 비해 극심한 가뭄을 보이는 지점들이 많았으며, 그 중 수원 -3.09, 인천 -2.92, 강화 -2.72 순을 보였으며, 3) 지속기간이 9개월일 경우, 2015년에 상대적으로 많은 지점에서 극한가뭄이 확인되었는데, 그 중에서도 수원 -2.85, 서울 -2.77, 철원 -2.76 순으로 가장 극심한 가뭄이 나타났다.

3.3.2 Hargreaves 방법

최고/최저 기온을 바탕으로 산정되는 Hargreaves 방법의 적용을 통한 각 지점의 지속기간별(3개월, 6개월, 9개월) RDI 산정 결과, 지점별 극한가뭄의 발생연도 및 심도는 Table 5와 같다. 각 지속기간에 대한 지점별 극한가뭄의 형태를 살펴보면, 1) 지속기간이 3개월일 경우, 2000년과 2001년에 대부분의 지점에서 극한가뭄의 형태를 보였으며, 서울 -2.99, 이천

-2.98, 양평 -2.96 순이었으며, 2) 지속기간이 6개월일 경우, 2015년이 다른 연도에 비해 가장 극심한 가뭄을 보이는 지점들이 많았으며, 그 중 수원 -3.12, 춘천 -2.75, 강화 -2.74 순을 보였으며, 3) 지속기간이 9개월일 경우, 2015년에 상대적으로 많은 지점에서 극한가뭄이 확인되었는데, 그 중에서도 수원 -2.94, 철원 -2.71, 인천 -2.68 순으로 가장 극심한 가뭄이 나타났다.

3.3.3 Blaney-Criddle 방법

월 평균 기온을 통해 산정되는 Blaney-Criddle 방법의 적용을 통한 각 지점의 지속기간별(3개월, 6개월, 9개월) RDI 산정 결과, 지점별 극한가뭄의 발생연도 및 심도는 Table 6과 같다. 각 지속기간에 대한 지점별 극한가뭄의 형태를 살펴보면, 1) 지속기간이 3개월일 경우, 2001년에 상대적으로 많은 지점에서 극한가뭄의 형태를 보였으며, 서울 -3.05, 양평 -3.00, 이천 -3.00 순으로 가장 극심한 가뭄을 나타냈으며, 2) 지속기간이 6개월일 경우, 2015년이 다른 연도에 비해 가장 극심한 가뭄을 보이는 지점들이 많았으며, 그 중 수원 -3.09, 인천 -2.93, 강화 -2.72 순을 보였으며, 3) 지속기간이 9개월일 경우, 2015년에 상대적으로 많은 지점에서 극한가뭄이 확인되었는데, 그 중에서도 수원 -2.92, 철원 -2.87, 인천 -2.85 순으로 가장 극심한 가뭄이 나타났다.

Table 4. Occurrence years and maximum drought severities of extreme drought according to durations (Thornthwaite RDI)

Weather station	Duration 90-day		Duration 180-day		Duration 270-day	
	Occurrence year	Drought severity	Occurrence year	Drought severity	Occurrence year	Drought severity
Sokcho	2001	-2.45	2015	-2.06	2015	-2.15
Cheorwon	2001	-2.95	2014	-2.70	2014	-2.76
Daegwallyeong	2015	-2.25	2015	-1.82	2015	-1.90
Chuncheon	2001	-2.60	2015	-2.72	2015	-2.41
Gangneung	2004	-2.28	2000	-1.99	2015	-1.99
Seoul	2001	-3.04	2015	-2.44	2015	-2.29
Incheon	2001	-2.85	2015	-2.92	2015	-2.77
Wonju	2014	-2.61	2014	-2.58	2001	-2.30
Suwon	2001	-2.76	2015	-3.09	2015	-2.85
Chungju	2001	-2.51	2015	-2.33	2015	-2.16
Ganghwa	2001	-2.77	2015	-2.72	2015	-2.59
Yangpyeong	2001	-3.03	2015	-2.55	2015	-2.32
Icheon	2001	-3.00	2015	-2.66	2015	-2.38
Inje	2001	-2.43	2014	-2.13	2015	-1.86
Hongcheon	2014	-2.48	2015	-2.64	2015	-2.47
Jecheon	2001	-2.73	2015	-2.25	2015	-2.08

Table 5. Occurrence years and drought severities of extreme drought according to duration (Hargreaves RDI)

Weather station	Duration 90-day		Duration 180-day		Duration 270-day	
	Occurrence year	Drought severity	Occurrence year	Drought severity	Occurrence year	Drought severity
Sokcho	2001	-2.41	2015	-2.18	2015	-2.43
Cheorwon	2001	-2.88	2014	-2.56	2014	-2.71
Daegwallyeong	2015	-2.12	2015	-1.91	2015	-1.94
Chuncheon	2000	-2.67	2015	-2.75	2015	-2.49
Gangneung	1995	-2.37	2000	-2.14	2015	-1.99
Seoul	2001	-2.99	2015	-2.48	2015	-2.40
Incheon	2001	-2.93	2015	-2.73	2015	-2.68
Wonju	2000	-2.49	2014	-2.44	2001	-2.33
Suwon	2000	-2.88	2015	-3.12	2015	-2.94
Chungju	2001	-2.49	2015	-2.32	2015	-2.14
Ganghwa	2001	-2.78	2015	-2.74	2015	-2.67
Yangpyeong	2001	-2.96	2015	-2.45	2015	-2.28
Icheon	2000	-2.98	2015	-2.65	2015	-2.39
Inje	1994	-2.51	2015	-2.09	2015	-1.96
Hongcheon	2014	-2.25	2015	-2.62	2015	-2.46
Jecheon	2001	-2.70	2015	-2.23	2015	-2.08

Table 6. Occurrence years and maximum drought severities of extreme drought according to durations (Blaney–Criddle RDI)

Weather station	Duration 90-day		Duration 180-day		Duration 270-day	
	Occurrence year	Drought severity	Occurrence year	Drought severity	Occurrence year	Drought severity
Sokcho	2001	-2.42	2015	-2.16	2015	-2.42
Cheorwon	2001	-2.88	2014	-2.71	2014	-2.87
Daegwallyeong	2015	-2.09	2015	-1.86	2015	-1.91
Chuncheon	2000	-2.65	2015	-2.69	2015	-2.43
Gangneung	2004	-2.40	2000	-2.08	2015	-2.06
Seoul	2001	-3.05	2015	-2.44	2015	-2.34
Incheon	2001	-2.86	2015	-2.93	2015	-2.85
Wonju	2000	-2.59	2014	-2.52	2001	-2.32
Suwon	2000	-2.94	2015	-3.09	2015	-2.92
Chungju	2001	-2.48	2015	-2.33	2015	-2.16
Ganghwa	2001	-2.80	2015	-2.72	2015	-2.65
Yangpyeong	2001	-3.00	2015	-2.53	2015	-2.35
Icheon	2001	-3.00	2015	-2.67	2015	-2.40
Inje	2001	-2.41	2014	-2.13	2015	-1.95
Hongcheon	2014	-2.34	2015	-2.64	2015	-2.50
Jecheon	2001	-2.72	2015	-2.26	2015	-2.11

3.4 가뭄지수 비교

3.4.1 지점 및 연도별 가뭄 비교

지점 및 연도별 지속시간에 따른 극한가뭄의 평균에 따른 순위 산정 결과 Table 7과 Fig. 2와 같다. 지점에 따른 순위 산정

결과, SPEI의 경우 수원이 가뭄에 가장 취약함을 나타냈으며, 철원, 이천 순서였다. Thornthwaite 방법으로 산정한 RDI_T의 경우 강릉이 가뭄에 가장 취약함을 나타냈으며, 속초, 수원 순서였다. Hargreaves 방법으로 산정한 RDI_H의 경우 속초가 평

Table 7. Rankings for year among extreme values of SPEI and three RDIs

Year	SPEI	Thornthwaite RDI	Hargreaves RDI	Blaney-Criddle RDI	The most severe drought
1992	Chungju	Chungju	Chungju	Chungju	Chungju
1993	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon
1994	Sokcho	Sokcho	Inje	Inje	Sokcho
1995	Icheon	Gangneung	Gangneung	Gangneung	Gangneung
1996	Suwon	Suwon	Suwon	Suwon	Suwon
1997	Sokcho	Seoul	Seoul	Seoul	Sokcho
1998	Seoul	Jecheon	Wonju	Wonju	Jecheon
1999	Yangpyeong	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon
2000	Incheon	Yangpyeong	Yangpyeong	Yangpyeong	Yangpyeong
2001	Cheorwon	Wonju	Wonju	Wonju	Wonju
2002	Gangneung	Incheon	Incheon	Incheon	Incheon
2003	Incheon	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon
2004	Sokcho	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon
2005	Icheon	Ganghwa	Incheon	Incheon	Icheon
2006	Ganghwa	Ganghwa	Ganghwa	Ganghwa	Ganghwa
2007	Cheorwon	Daegwallyeong	Seoul	Seoul	Seoul
2008	Jecheon	Jecheon	Jecheon	Jecheon	Jecheon
2009	Daegwallyeong	Daegwallyeong	Daegwallyeong	Daegwallyeong	Daegwallyeong
2010	Gangneung	Gangneung	Gangneung	Gangneung	Gangneung
2011	Daegwallyeong	Daegwallyeong	Daegwallyeong	Daegwallyeong	Daegwallyeong
2012	Ganghwa	Inje	Daegwallyeong	Inje	Inje
2013	Gangneung	Gangneung	Daegwallyeong	Gangneung	Gangneung
2014	Wonju	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon	Cheorwon
2015	Ganghwa	Suwon	Suwon	Suwon	Suwon

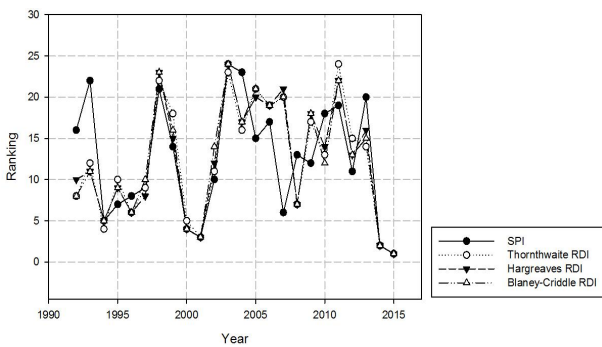


Fig. 2. Rankings for among extreme values of SPEI and RDIs

극한 가뭄의 크기가 가장 컸으며, 강릉, 수원 순이었으며, Blaney-Criddle로 산정한 RDI_B의 경우 RDI_H와 마찬가지로 속초가 가장 취약했으며, 강릉, 수원 순이었다. 각 가뭄지수의 극한가뭄에 대한 지점별 순위 산정결과, 수원이 가뭄에 가장 취약했으며, 그 다음은 인천, 강릉 순이었다..

연도에 따른 최대 극한 가뭄이 발생하는 지점 산정 결과, SPEI의 경우 강화가 가뭄의 빈도가 잦았으며, RDI_T의 경우 철원이 가뭄의 빈도가 잦았으며, RDI_H와 RDI_B의 경우도 RDI_T와 마찬가지로 철원이 가뭄의 빈도가 잦았으며, 모든 가뭄지수에서 2015년, 2014년, 2001년 순으로 가뭄이 극심하였다. 또한 SPEI와 RDI의 극한가뭄에 대한 연도별 평균 순위 산정결과 역시 2015년, 2014년, 2001년 순이었다.

3.4.2 가뭄의 상관계수 산정

Table 8과 Table 9와 같이 지속기간에 따른 SPEI와 RDI의 월별 가뭄 평균의 상관정도와 월별 극한가뭄 평균의 상관정도를 선정하였다. 비교 결과, 두 가뭄지수간 가뭄의 상관정도는 비교적 높은 것으로 확인되었다. 월별 가뭄 평균의 상관정도에서는 RDI_H와 RDI_B 사이의 상관정도가 상당히 높았으며, SPEI9와 RDI_{H3} 사이의 상관정도는 0.756으로 다른 가뭄지수의 상관정도에 비해 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다.

Table 8. Correlation coefficients of determination between of SPEI and three RDIs

	SPEI3	SPEI6	SPEI9	RDI _{T3}	RDI _{T6}	RDI _{T9}	RDI _{H3}	RDI _{H6}	RDI _{H9}	RDI _{B3}	RDI _{B6}	RDI _{B9}
SPEI3	-	0.883	0.804	0.819	0.893	0.824	0.902	0.921	0.845	0.909	0.913	0.835
SPEI6		-	0.947	0.793	0.958	0.948	0.790	0.958	0.957	0.803	0.955	0.955
SPEI9			-	0.789	0.916	0.918	0.756	0.906	0.930	0.766	0.903	0.928
RDI _{T3}				-	0.853	0.819	0.879	0.809	0.817	0.883	0.806	0.816
RDI _{T6}					-	0.945	0.837	0.987	0.947	0.853	0.989	0.949
RDI _{T9}						-	0.796	0.940	0.995	0.814	0.941	0.998
RDI _{H3}							-	0.862	0.820	0.997	0.848	0.806
RDI _{H6}								-	0.948	0.877	0.998	0.946
RDI _{H9}									-	0.832	0.944	0.998
RDI _{B3}										-	0.867	0.822
RDI _{B6}											-	0.946
RDI _{B9}												-

Table 9. Correlation coefficients of determination between extreme value of SPEI and three RDIs

	SPEI3	SPEI6	SPEI9	RDI _{T3}	RDI _{T6}	RDI _{T9}	RDI _{H3}	RDI _{H6}	RDI _{H9}	RDI _{B3}	RDI _{B6}	RDI _{B9}
SPEI3	-	0.760	0.551	0.783	0.620	0.590	0.771	0.651	0.599	0.782	0.652	0.594
SPEI6		-	0.872	0.700	0.773	0.746	0.714	0.815	0.769	0.722	0.809	0.763
SPEI9			-	0.601	0.833	0.807	0.593	0.830	0.826	0.593	0.824	0.820
RDI _{T3}				-	0.714	0.730	0.969	0.745	0.747	0.973	0.735	0.732
RDI _{T6}					-	0.930	0.740	0.987	0.938	0.741	0.991	0.936
RDI _{T9}						-	0.705	0.917	0.995	0.715	0.922	0.998
RDI _{H3}							-	0.791	0.733	0.998	0.775	0.712
RDI _{H6}								-	0.936	0.789	0.997	0.928
RDI _{H9}									-	0.739	0.935	0.998
RDI _{B3}										-	0.777	0.721
RDI _{B6}											-	0.932
RDI _{B9}												-

월별 극한가뭄 평균의 상관정도에서는 월별 가뭄의 평균 상관 정도에서와 마찬가지로 RDI_H와 RDI_B 사이의 상관정도가 상당히 높았으며, SPEI9와 RDI_{H3} 사이의 상관정도는 0.593으로 두 가뭄지수 간에는 상관정도가 낮은 편이었다. 또한 잠재 증발산량 산정 방법에 따른 월별 가뭄 평균의 상관정도에서는 Thornthwaite 방법으로 산정한 RDI_H와 RDI_B 간의 상관정도가 높았으며, 반대로 SPEI와 RDI_H 사이의 상관정도가 상대적으로 낮았다. 월별 극한가뭄에서는 월별 가뭄 평균과 마찬가지로 RDI_H와 RDI_B 간의 상관정도가 높았으며, 월별 가뭄 평균과 마찬가지로 SPEI와 RDI_H 사이의 상관정도가 상대적으로 낮았다.

4. 결 론

일반적으로 사용되던 기상학적 가뭄지수 중에서도 증발산이 고려된 가뭄이 좀 더 지구시스템의 물리·역학적 근거를 잘 반영하고 있다고 알려져 있다. 이에 증발산량이 고려된 가뭄지수의 활용도가 높아지고 있어 본 연구에서는 증발산량을 변수로 사용하는 두 개의 기상학적 가뭄지수인 SPEI와 RDI를 이용하여 한강유역의 가뭄을 평가하였으며, 산정방법에는 Thornthwaite 방법으로 산정한 SPEI와 RDI, Hargreaves 방법으로 산정한 RDI, Blaney-Criddle 방법으로 산정한 RDI 간의 가뭄지수를 정량적으로 비교하였다.

SPEI와 RDI의 산정 결과, 지속기간이 짧을수록 2001년, 지속기간이 길어질수록 2014년과 2015년에 극한 가뭄이 확인되었다. 그 중 지속기간이 3개월일 경우, SPEI는 충주, 강화,

제천, RDI_T는 서울, 양평, 이천, RDI_H는 서울, 이천, 양평, RDI_B는 서울, 양평, 이천, 6개월일 경우 SPEI는 강화, 충주, 대관령, RDI_T는 수원, 인천, 강화, RDI_H는 수원, 춘천, 강화, RDI_B는 수원, 인천, 강화, 9개월일 경우 SPEI는 강화, 대관령, 홍천 RDI_T는 수원, 서울, 철원, RDI_H는 수원, 철원, 인천, RDI_B는 수원, 철원, 인천 순으로 가뭄이 극심하였다. 또한 극한가뭄에 대한 지점 및 연도별 평균 순위 산정 결과, 지점별 순위에서는 수원, 인천, 강릉 순으로 가뭄에 취약함을 보였으며, 연도별 결과는 2015년, 2014년, 2001년 순으로 가뭄에 취약하였다. 그 중 RDI는 지속기간이 길수록 2015년이 대부분의 기상 관측 지점에서 극심한 가뭄으로 나타냈으며, SPI의 경우 2014년과 2015년이 극심한 가뭄을 나타냈다. 이는 기후변화로 과거에 비해 기온이 상승하였고 이로 인한 강수의 상당 부분이 증발산량으로 손실되었으며, 평년 강수량 대비 감소한 강수량을 보이는 지점들이 점점 늘어나고 있기 때문이다.

이러한 두 가뭄지수별 산정방법에 따른 상관정도를 산정한 결과 월별 가뭄 및 극한가뭄에 대한 상대적으로 높은 상관계수를 나타냈지만 가뭄지수의 산정방식에 따라 가뭄의 정도 및 빈도의 차이가 있었다. 따라서 증발산량을 변수로 하는 기상학적 가뭄분석에서는 단일 지수보다는 여러지수의 상호보완이 필요함을 확인할 수 있었다.

증발산량이 고려된 기상학적 가뭄지수의 활용에는 모두가 공감하고 있지만 관측자료의 길이가 짧고 불확실성이 큰 관측 자료는 제한적으로 사용되고 있어, 주로 증발산량의 추정치가 이용되고 있다. 최근 들어 증발산량 계측기술이 급속히 발전하고 있고, 관측지점도 꾸준히 증가하고 있어 자료의 활용도가 높아지리라 예상되고 있다. 관측 증발산량의 가뭄지수에 대한 직접적 활용에 앞서 증발산이 고려된 대표적인 가뭄지수들을 비교하였다는데 본 연구의 의의가 있으며, 향후 관측 증발산량의 가뭄지수 활용의 비교 연구로써 활용되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Asadi Zarch, M.A., Malekinezhad, H., Mobin, M.H., Dastorani, M.T., and Kousari, M.R. (2011). "Drought monitoring by Reconnaissance Drought Index (RDI) in Iran." *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 13, pp. 3485-3504.
- Bae, D.H., Son, K.H., and Kim, H.A. (2013) "Derivation and evaluation of drought threshold level considering hydro-meteorological data on South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 3, pp. 287-299.
- Banimahd, S.A., and Khalili, D. (2013) "Factors influencing Markov Chains Predictability characteristics, utilizing SPI, RDI, EDI and SPEI drought indices in different climatic zones." *Water Resources Management*, Vol. 27, No. 11, pp. 3911-3928.
- Correia, F.N., Santos, M.A., and Rodrigues, R.P. (1991). "Reliability in regional drought studies." *Water Resources Engineering Risk Assessment*, pp. 63-72.
- Du Pisani, C.G., Fouche, H.J., and Venter, J.C. (1998). "Assessing rangeland drought in South Africa." *Agricultural Systems*, Vol. 57, No. 3, pp. 367-380.
- Falkenmark, M. (2003). "Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges." *Philos. T. Roy. Soc. Lond.*, Vol. 358, pp.2037-2049.
- Farajalla, N., and Ziade, R. (2010). "Drought frequency under a changing climate in the Eastern Mediterranean: the Bekaa Valley, Lebanon." *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 12.
- 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.
- Hernandez, E.A., and Uddameri, V. (2013). "Standardized precipitation evaporation index (SPEI)-based drought assessment in semi-arid south Texas." *Environmental Earth Sciences*, pp. 1-11.
- Khalili, T., Farnoud, T., Jamshidi, H., Kamgar-Haghighi, A.A., and Zand-Parsa, S. (2011). "Comparability analyses of the SPI and RDI meteorological drought indices in different climatic zones." *Water Resources Management*, Vol. 25, No. 6, pp. 1737-1757.
- 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.
- Korea Environment Institute(KEI). (2011). *Water resource status and influence factors: climate change centrally*.
- Korea Water Resources Corporation(KWRC). (2005) *Report on drought management monitoring system*.
- 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(1), pp. 69-78.
- Morid, S., Smakhtin, V.U., and Moghadasi, M. (2006) "Comparison of seven meteorological indices for drought monitoring in Iran." *Int Journal or Climatol*, Vol. 26, pp.971-985.
- 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.
- Nalbantis, I. (2008). "Evaluation of a hydrological drought index." *European Water*, Vol. 23, No. 24, pp. 67-77.
- Nam, W.H., Michael, J.H., Donald, A.W., and Mark, D.S. (2015) "Projection of temporal trends on drought characteristics using the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in South Korea." *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 1, pp. 37-45.
- Oki, T., and Kanae, S. (2006). "Global hydrological cycles and world water resources." *Science*, Vol. 5790, pp. 1068-1072.
- Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought, Research paper, No. 45, U.S. Weather Bureau.
- Shafer, B.A., and Dezman, L.E. (1982). "Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas." *Proceedings of the Western Snow Conference*, Reno, NV, pp. 164-175.
- Smakhtin, V.U., and Hughes, D.A. (2007). "Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data." *Environment Modelling Software*, Vol. 22, pp. 880-890.
- Sung, J.H., and Chung, E.S. (2014) "Development of streamflow 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." *Springer*, Netherlands.
- Tigkas D. (2008). "Drought Characterisation and Monitoring in Regions of Greece. *European Water*." 23/24: 29-39.
- Tigkas, D., Vangelis H., and Tsakiris, G. (2011). "DrinC: a software for drought analysis based on drought indices." *Springer*, Vol. 8, No. 3, pp. 697-709.
- Thornthwaite, C.W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate." *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1, pp. 55-94.
- Tsakiris, G. (2004). *Meteorological drought assessment. the needs of the European Research Program MEDROPLAN*.
- Tsakiris G, Nalbantis I, Pangalou D, Tigkas D, Vangelis H. (2008). "Drought meteorological monitoring network design for the reconnaissance drought index (RDI)." In: Franco Lopez A. (ed.), *Proceedings of the 1st International Conference drought Management: scientific and technological innovations Zaragoza*, Spain: Option Méditerranéennes, Series A, No. 80, 12 - 14 June 2008; 2008. pp. 57-62.
- Vangelis, H., Tigkas, D., and Tsakiris, G. (2013). "The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index(RDI) calculation." *Journal of Arid Environment*, Vol. 88, pp. 130-140.
- 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.
- 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.