

태백, 속초 과거 가뭄사례를 이용한 기상학적 가뭄지수의 비교 고찰

강동호* · 남동호** · 김병식***

Kang, Dong Ho*, Nam, Dong Ho**, Kim, Byung Sik***

Comparison of Meteorological Drought Indices Using Past Drought Cases of Taebaek and Sokcho

ABSTRACT

Drought is a social phenomenon in which the degree of perception varies depending on the affected factors, and is defined as various relative concepts such as meteorological drought, hydrological drought, agricultural drought, and climatological drought. In this study, a comparative analysis of meteorological drought among variously defined droughts was conducted and the applicability of the drought index was examined by comparing the actual drought cases and the results of meteorological drought index analysis. In order to compare the drought index, we used standardized Precipitation Index (SPI), China-Z Index (CZI), Modified CZI (MCZI) and Z-Score Index Respectively. Four drought indices were used for the Taebaek and Sokcho areas. The drought index was analyzed using the meteorological data from 1986 to 2015 for a duration of 3 months. As a result of the analysis, the SPI drought index was analyzed to be highly reproducible for the case of drought with past limited water series. In the case of CZI and MCZI drought indices, the number of extreme dry occurrences is similar to that of the past cases, but the reproducibility is low for the actual drought years. In the case of ZSI drought index, it is analyzed that the number of occurrences and the comparison with the past cases are inferior in reproducibility. For the meteorological drought index using precipitation, it would be effective to use the SPI drought index with the highest reproducibility and the past drought case.

Key words : Meteorological drought index, SPI, CZI, MCZI, ZSI

초 록

가뭄은 영향을 받는 인자에 따라 체감정도가 달라지는 사회적 현상으로 기후학적 가뭄, 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄 등 다양한 상대적 개념으로 정의되고 있다. 본 연구에서는 다양하게 정의되는 가뭄 중에서 기상학적 가뭄을 나타내는 지수에 대한 비교 분석을 실시하고자 하였으며, 실제 과거 가뭄사례와 기상학적 가뭄지수 분석결과의 비교를 통하여 가뭄지수의 적용성을 검토하고자 하였다. 가뭄지수의 비교를 위하여 기상학적 가뭄을 판단하기 위해 일반적으로 가장 많이 사용되는 SPI (Standardized Precipitation Index)와 일반적으로 사용되지는 않지만 강수량만을 이용하여 가뭄분석이 가능한 CZI (China-Z Index), MCZI (Modified CZI), ZSI (Z-Score Index) 지수를 이용하였다. 대상지역으로는 최근까지도 가뭄이 발생하였던 태백과 속초지역을 대상으로 선정하였으며 1986년부터 2015년 기상 자료를 이용하여 지속시간 3개월로 가뭄지수 분석을 실시하였다. 분석 결과 SPI 가뭄지수가 과거 제한급수발생 가뭄사례에 대하여 높은 재현성을 나타내는 것으로 분석되었으며 CZI와 MCZI 가뭄지수의 경우 Extreme Dry 발생 횟수는 과거사례와 유사하나 실제 가뭄이 발생했던 년도에 대해서는 낮은 재현성이 나타났다. ZSI 가뭄지수의 경우 발생횟수, 과거사례와의 비교 모두 재현성이 떨어지는 것으로 분석되었다. 가뭄지수의 비교결과 강수량을 이용한 기상학적 가뭄지수의 경우 과거 가뭄사례와 가장 높은 재현성을 보이는 SPI 가뭄지수를 이용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

검색어 : 기상학적 가뭄지수, SPI, CZI, MCZI, ZSI

* 정희원 · 강원대학교 방재전문대학원 도시환경방재전공 박사과정 (Kangwon National University · kdh@kangwon.ac.kr)

** 강원대학교 방재전문대학원 도시환경방재전공 연구원 (Kangwon National University · skahdghkk@kangwon.ac.kr)

*** 정희원 · 교신저자 · 강원대학교 방재전문대학원 도시환경재난관리전공 부교수

(Corresponding Author · Kangwon National University · hydrokbs@kangwon.ac.kr)

Received October 16, 2019/ revised October 31, 2019/ accepted November 7, 2019

1. 서론

가뭄은 과거부터 현재까지 국내뿐만 아니라 국외에서도 지속적으로 발생하고 있으며 가뭄피해를 줄이기 위하여 많은 연구가 과거에 수행되었고 현재까지도 진행되고 있다. 일반적으로 가뭄은 기후학적 가뭄, 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄으로 피해를 받는 인자에 따라 다양하게 정의되고 있으며, 각각의 가뭄에 따라 여러 지수들로 분석되고 있다. 기후학적 가뭄은 사용 가능한 물로 전환된 강수량이 기후학적 평균에 미달정도로 가뭄을 평가하며 기상학적 가뭄은 주어진 기간 동안의 강수량을 이용하여 가뭄의 정도를 평가한다. 농업적 가뭄은 농작물에 직접적으로 관계되는 토양수분량으로 가뭄을 평가하며 수문학적 가뭄은 강수의 부족으로 발생하는 하천, 저수지, 지하수 등의 부족으로 가뭄을 평가한다. 국내외로 가뭄을 평가하기 위하여 다양한 연구가 진행되었고 가뭄을 평가하기에는 그 양상이 복잡하고 광역적으로 발생하여 시기, 장소, 원인을 규명하는 것이 쉽지 않다(Bae et al., 2013).

국내 및 국외 연구동향에 대해서 Kim(2011)은 가뭄빈도해석을 통한 한반도 가뭄을 평가하였으며 Kim et al.(2013)은 표준강수증발산량지수(SPEI)와 대표농도 경로를 이용하여 미래가뭄의 변화양상을 분석하였다. Lee et al.(2015)은 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수의 비교를 통한 기상학적 가뭄과 수문학적 가뭄의 상관정도를 분석하였다. Nam et al.(2015)은 과거 30년(1981-2010)과 RCP (Representative Concentration Pathways) 기후변화 시나리오를 바탕으로 2011년부터 2100년까지의 가뭄에 기상학적 가뭄지수인 SPEI를 적용하였다. Jang(2016)은 PMDI지수를 이용하여 강원지역의 가뭄에 대한 기상학적 분석을 실시하였다.

국내뿐만 아니라 국외에서도 많은 연구가 진행되었다. Hisdal and Tallaksen(2003)은 기상학적, 수문학적 가뭄 특성을 모두 고려하는 덴마크의 지역적 가뭄 특성을 분석하였다. Khadr et al.(2009)은 지속기간에 따라 SPI를 계산하여 Ruhr강 유역의 가뭄경향성을 분석하였다. Hosseinzadeh et al.(2012)은 수문학적 가뭄지수를 이용하여 이란 서부의 가뭄 수자원 대해 분석하였고, Tigkas et al.(2012)은 RDI와 SDI 가뭄지수를 이용하여 기상학적 가뭄지수가 수문학적 가뭄을 얼마만큼 평가 할 수 있는지를 분석하였다. Jain et al.(2015)는 SPI, EDI, CZI, RD, RDDI 가뭄지수를 이용하여 인도 Ken강 유역의 기상학적 가뭄에 대하여 분석하였다.

본 연구에서는 다양한 가뭄지수 중 강수량을 이용한 기상학적 가뭄지수와 실제 과거 가뭄사례의 비교를 통하여 기상학적 가뭄지수의 적용성을 검토하고자 하였다. 비교를 위하여 기상학적 가뭄지수로 널리 사용되고 있는 SPI (Standardized Precipitation Index)와 비교적 잘 알려지지 않은 기상학적 가뭄지수인 CZI (China-Z Index), MCZI (Modified CZI), ZSI (Z-Score Index) 지수들과의 비교를 통하여 SPI 가뭄지수 뿐만이 아닌 다른 가뭄지수들의 적용성에 대해서 함께 분석하고자 하였으며, Fig. 1은 본 연구의 연구흐름도이다.

2. 이론적 배경

2.1 SPI (Standardized Precipitation Index)

SPI 가뭄지수는 상대적으로 물의 필요에 비해 물의 부족을 유발하는 강수량의 감소에 의해 시작된다는 생각에 착안하여 Mckee et al.(1993)에 의해 개발되었으며 가뭄분석에서 가장 많이 쓰이는 지수이다. SPI 가뭄지수는 시간 단위별 누가강수시계열을 구성하여야 하며, 이는 이동누가에 의한 방법으로 월 강수량을 시간단위에 따라 연속적으로 중첩하여 구한다. 즉, 각 월을 기준으로 하여 시간단위별에 해당하는 누가강수 시계열을 산정하게 되며, 이는 누가된 월수로 나누어 고려해준 월에 따른 이동평균 강수계열을 획득하면 된다. 지속시간별 시계열이 구성되면 이 시계열을 월별로 분석하여 적정 확률분포형을 선정하는데 일반적으로는 강수형태는 Gamma 분포를 따른다. SPI가뭄지수 산정방법은 Abromowits and Stegun(1964)가 제시한 Eqs. (1)~(5)와 같으며 가뭄지수의 범위와 상태는 Table 1과 같다.

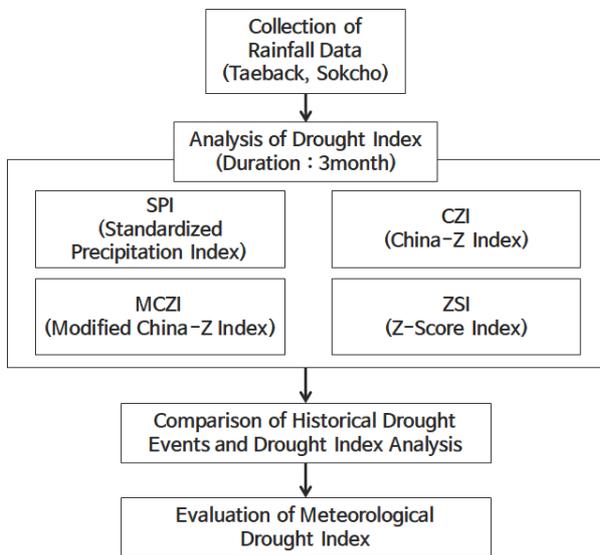


Fig. 1. Flow Chart of Study

Table 1. Classification Range of SPI Value

SPI	Classifications
0 ~ -0.99	Normal
-1.0 ~ -1.5	Moderately dry
-1.5 ~ -2.0	Severely dry
< -2.0	Extremely dry

$$SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 t^2 + c_2 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (1)$$

$$SPI = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 t^2 + c_2 t^3}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right) \text{ for } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \quad (2)$$

여기서, $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_0 = 1.432788$, $d_1 = 0.189267$, $d_2 = 0.001308$

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad q = m/n \quad (3)$$

$$t = \sqrt{\lim\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \text{ for } 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (4)$$

$$t = \sqrt{\lim\left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2}\right)} \text{ for } 0.5 < H(x) \leq 1.0 \quad (5)$$

여기서, $H(x)$: 누확률, $G(x)$: Gamma 함수, m : 무강수일수, n : 강수관측일수

2.2 CZI (China-Z Index) and MCZI (Modific CZI)

CZI 가뭄지수는 중국 국립 기후센터(National Climate Center of China)에서 전국적으로 가뭄 상황을 감시하기 위하여 개발한 지수로 SPI 가뭄지수의 대안으로 1995년 CZI 지수를 개발(Ju et al., 1997)하였으며 기본적으로 Pearson Type 3 분포에 따라 분석된다. 월 강수량 자료의 평균값을 이용하여 분석하여 계산은 Eq. (6)과 같다.

Table 2. Classification Range of CZI, MCZI Value

CZI, MCZI	Classifications
0 ~ -0.99	Normal
-1.0 ~ -1.5	Moderately dry
-1.5 ~ -2.0	Severely dry
< -2.0	Extremely dry

Table 3. Classification Range of ZSI Value

CZI, MCZI	Classifications
0 ~ -0.99	Normal
-1.0 ~ -1.5	Moderately dry
-1.5 ~ -2.0	Severely dry
< -2.0	Extremely dry

$$CZI_{ij} = \frac{6}{C_{si}} \left(\frac{C_{si}}{2} \varphi_{ij} + 1\right)^{1/3} - \frac{6}{C_{si}} + \frac{C_{si}}{6} \quad (6)$$

여기서, i 는 분석기간(1, 2, 3, ..., 72 개월), j 는 현재의 달, C_{si} 는 비대칭 계수, φ_{ij} 는 표준화 변량을 의미한다. 비대칭 계수와 표준화 변량을 산정 방법은 Eqs. (7)~(8)과 같다.

$$C_{si} = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^3}{n^* \sigma_i^3} \quad (7)$$

$$\varphi_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_i}{\sigma_i} \quad (8)$$

여기서, x_{ij} 는 분석기간 i 기간 동안의 j 월 강수량, n 은 분석개월 수를 의미한다. \bar{x}_i 는 i 기간 동안의 평균 강수량을 의미한다. MCZI 가뭄지수는 CZI와 산정방법이 같으나, CZI에서 사용하는 강수량 평균 대신 중앙값을 사용하며 CZI와 MCZI의 가뭄지수의 범위와 상태를 Table 2와 같다.

2.3 ZSI (Z-Score Index)

ZSI 가뭄지수는 CZI와 유사하지만 강수량 자료를 감마 분포 또는 Pearson Type III 분포에 맞추지 않아도 되는 점이 다르다. 계산식은 Eq. (9)와 같으며, ZSI의 가뭄지수 범위와 상태는 Table 3과 같다.

$$ZSI = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (9)$$

여기서, \bar{P} 는 월 평균 강수량(mm), P_i 는 특정 월 강수량(mm), SD는 분석기간을 의미한다.

3. 대상 지역 및 분석 결과

3.1 대상지역

분석대상지역으로 Fig. 2와 같이 태백과 속초지역으로 선정하였다. 태백지역의 경우 광동댐이 위치해있으나 용수공급 능력의 한계 점 등 제 기능을 못하고 있으며 속초지역의 경우 댐이 위치해 있지 않은 지역이다. 따라서 두 지역은 강수에 직접적인 영향을 미치는 기상학적 가뭄에 민감한 지역이다. 분석을 위하여 집중호우나 국지성호우 등에 따른 지표변화에 대하여 빠르게 반영이 되는 지속기간 3개월에 대한 가뭄분석을 실시하였다. 태백지역의 경우 과거 5회(1987, 1994, 1995, 2001, 2008) 제한급수를 실시하였으

며, 속초지역의 경우 6회(1995, 1996, 2001, 2005, 2011, 2015) 제한급수를 실시하였다. 태백지역은 빈번한 가뭄을 대비하기 위해 2009년 가뭄백서를 발간하였으며 속초지역은 2015년 8월 동안 제한급수를 실시하는 등 두 지역 모두 가뭄의 빈도나 심도가 높아 본 연구에서 대상지역으로 선정하였다. 가뭄분석을 위하여 태백, 속초 지역의 종관기상관측소 30년(1986~2015)기간의 강수량을

이용하여 분석을 실시하였으며, 두 지역 강수특성의 경우 아래 Fig. 3과 같이 태백은 1986~2015년까지 연강수량은 큰 변화는 없었으나 속초의 경우 약간 감소하는 경향을 보였다. 제한급수가 시행되었던 년도와 해당년도의 연강수량을 Table 4에 정리하였다. 태백지역의 30년 평균강수량은 1,319 mm로 제한급수가 실시되었던 년도에 연강수량이 적은 것을 확인할 수 있으며 특히 2001년은 강수가 심각하게 부족했던 것을 볼 수 있다. 속초지역의 30년 평균강수량은 1,389 mm이며 2011년을 제외한 나머지 년도에서 강수가 부족함을 볼 수 있다.

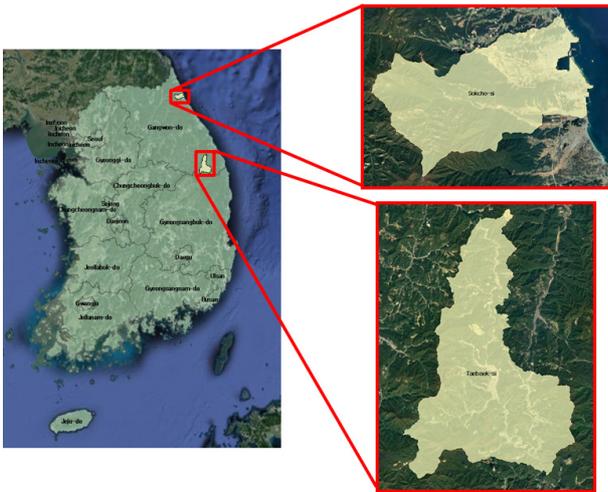
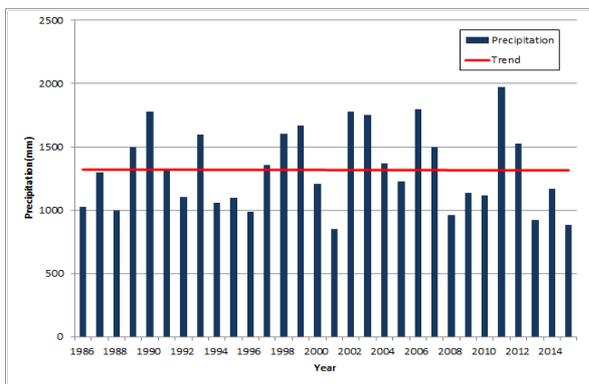


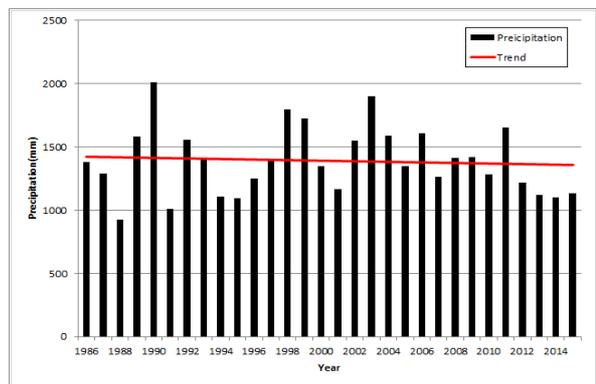
Fig. 2. Study Area

3.2 분석 결과

본 연구에서는 기상학적 가뭄지수인 SPI, CZI, MCZI, ZSI 가뭄지수와 과거 가뭄사례를 이용하여 지속기간 3개월로 분석을 실시하였다. Figs. 4 and 5는 가뭄지수별 가뭄 분석 결과를 나타내는 그림이며 제한급수 년도와 비교 전에 가뭄지수별 분석된 가뭄 정도에 대하여 확인하고자 하였다. 노란색 부분은 Moderate Drought로 -0.5~1.0에 해당되는 가뭄, 주황색 부분은 Severe Drought로 -1.5~2.0, 붉은색 부분은 Extreme Drought로 -2.0 이상이 발생한 가뭄이다. 가뭄지수별 분석된 가뭄정도만 보았을 때 다른 가뭄지수에 비해 ZSI 가뭄지수가 극심한 가뭄으로 분류된 횟수가 적은 것으로 나타났다.



(a) Taebaek



(b) Sokcho

Fig. 3. Annual Precipitation (Taebaek, Sokcho)

Table 4. Year of Limited Water Supply and Drought Index (Taebaek)

Year of limited water supply (Taebaek)	Precipitation (Taebaek)	Year of limited water supply (Sokcho)	Precipitation (Sokcho)
1987	1,299 mm	1995	1,098 mm
1994	1,058 mm	1996	1,250 mm
1995	1,095 mm	2001	1,164 mm
2001	850 mm	2005	1,349 mm
2008	960 mm	2011	1,656 mm
		2015	1,134 mm

본 연구에서는 제한급수가 시행되었던 년도는 극한가뭄이 발생한 것으로, 가뭄지수 분석결과가 -2이하의 값으로 분석되었을 때 극한가뭄이 발생한 것으로 판단하였다. 제한급수 실시년도와 가뭄 분석 결과와의 비교결과 태백지역에서는 SPI, CZI, MCZI, ZSI지수 모두 2001년 -2.742, -2.281, -2.385, -2.105로 심각한 가뭄으로

나타났다. 실제 과거 2001년 태백지역에서 25일간 제한급수를 실시하였던 때와 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 속초지역에서는 SPI지수와 CZI지수, MCZI지수의 경우 1995년 -2.879, -2.103, -2.284로 극한 가뭄이 나타났으며 2001년에 -2.679, -2.278, -2.7로 분석되었다. Figs. 6 and 7은 두 지역의 가뭄지수 분석 결과를

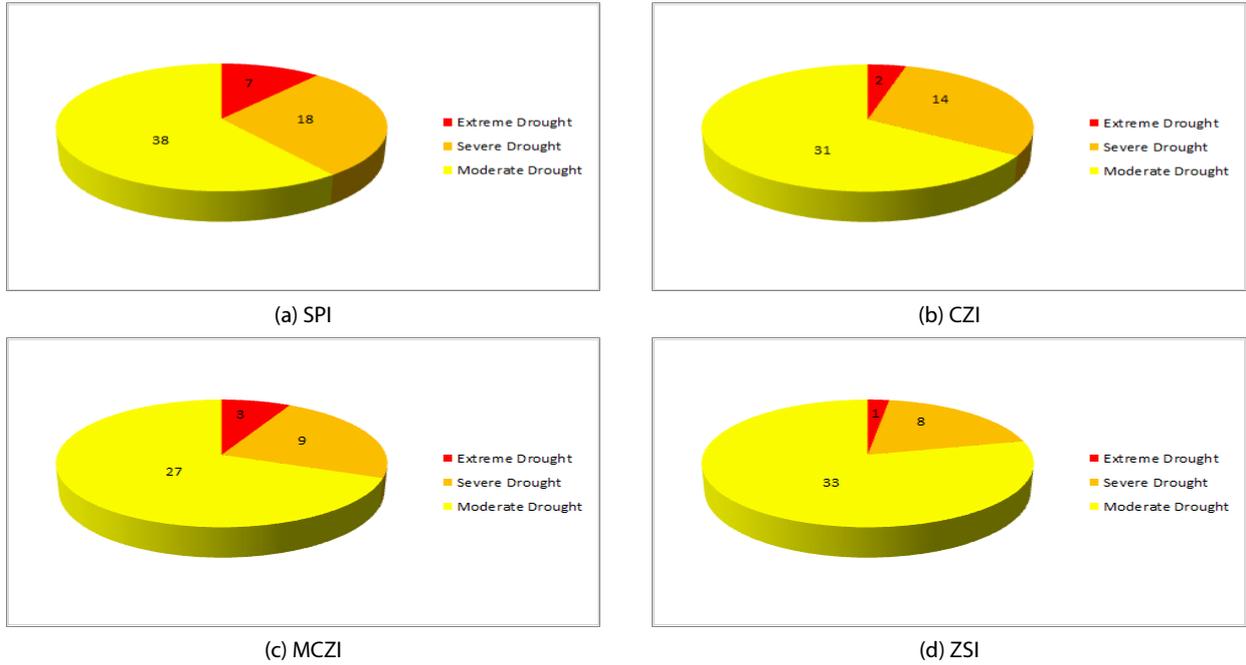


Fig. 4. Comparison of Drought Index and Number of Limited Water Supply (Taebaek)

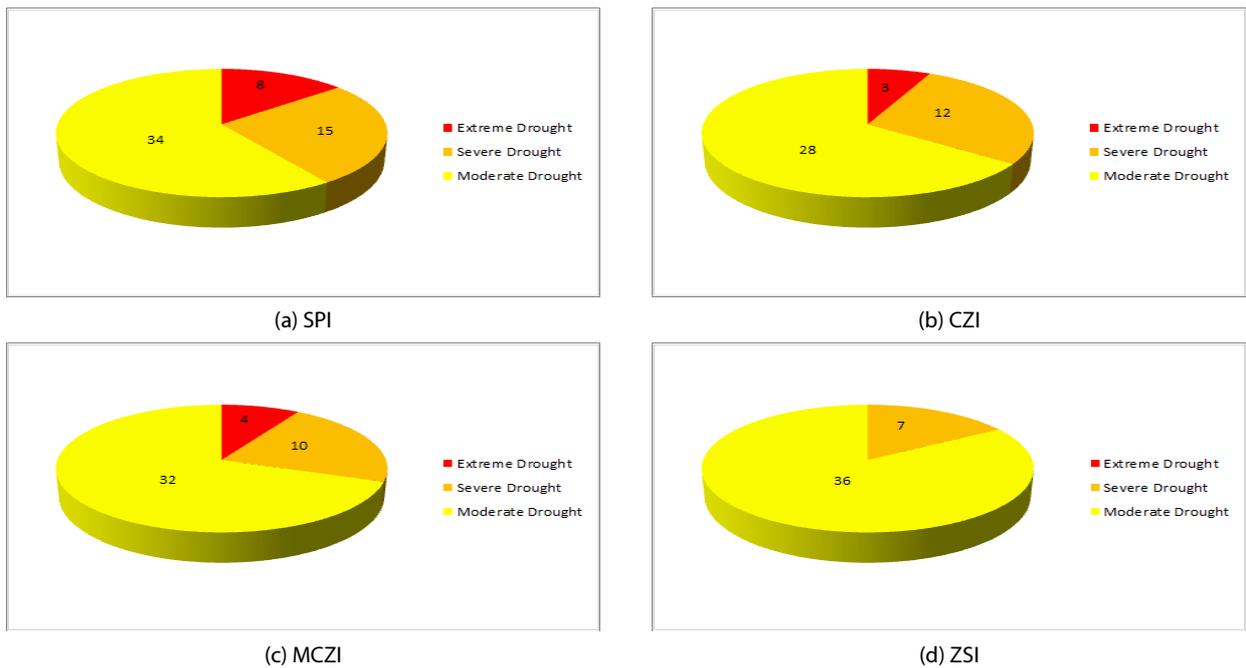


Fig. 5. Comparison of Drought Index and Number of Limited Water Supply (Sokcho)

시계열로 나타내었으며 Tables 5 and 6은 제한급수가 시행되었던 년도와 가뭄지수 분석결과를 나타내었다. 태백의 경우 5번의 제한급수년도 중 SPI 가뭄지수가 94년, 01년, 08년에 극한가뭄이 나타

나는 것으로 분석되었으며 네가지 가뭄지수 중 가장 높은 재현성을 보였다. 속초의 경우 6번의 제한급수년도 중 태백과 마찬가지로 SPI 가뭄지수가 95년, 01년, 15년에 극한가뭄이 발생한 것으로

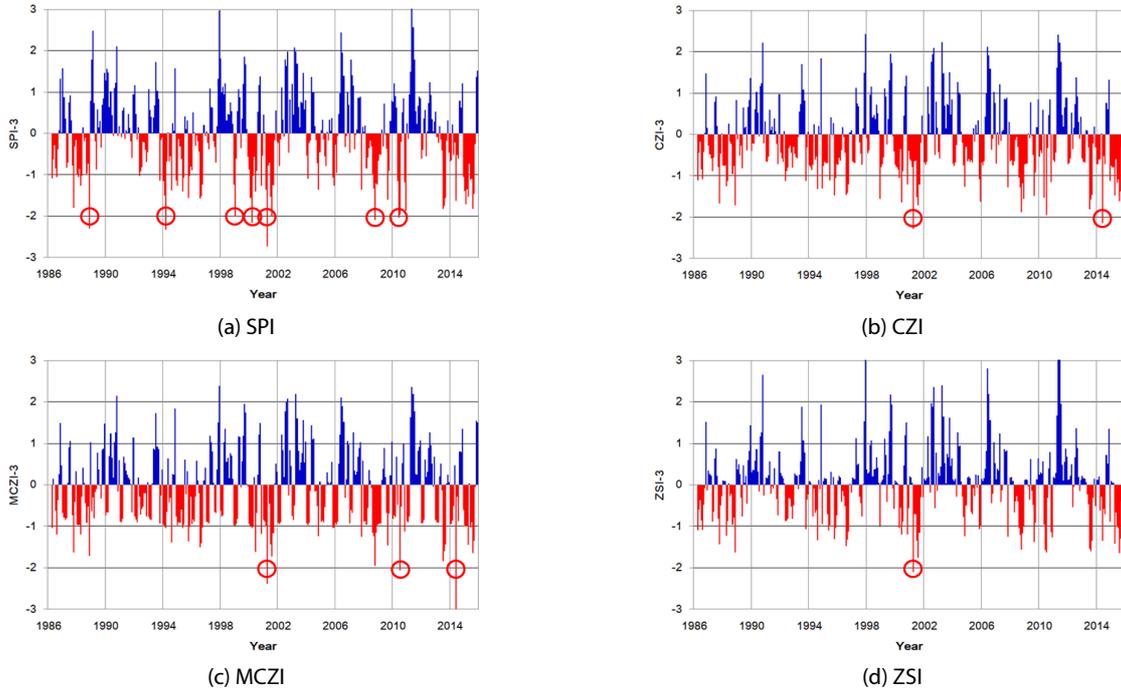


Fig. 6. Timeseries of Drought Index (Taebaek)

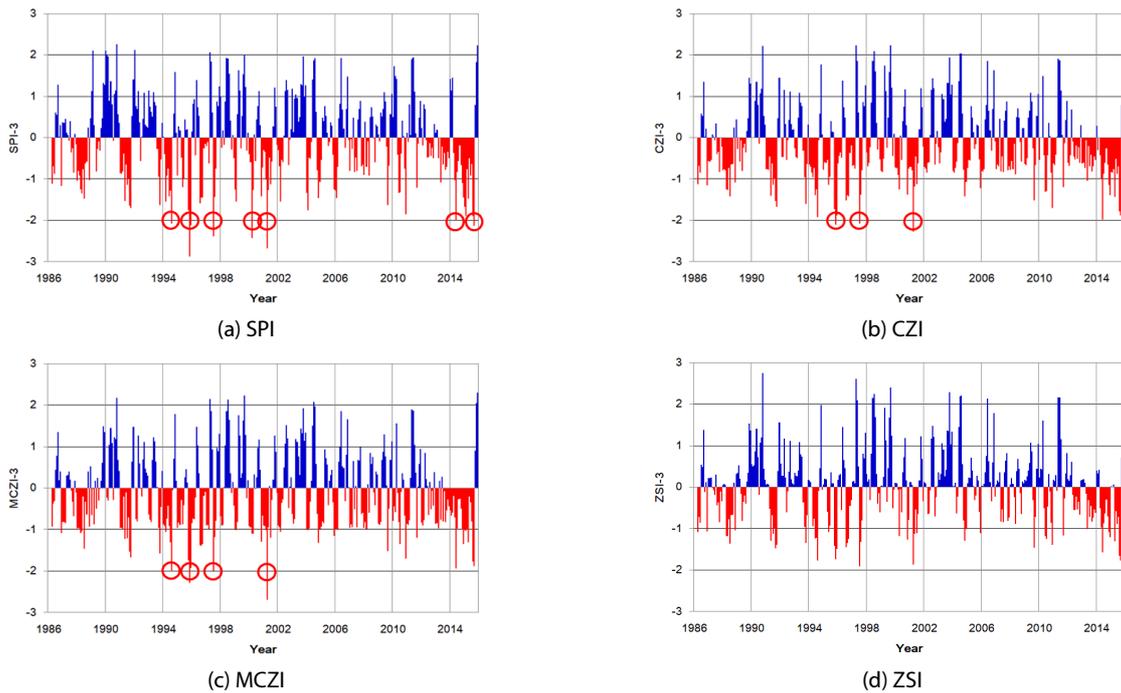


Fig. 7. Timeseries of Drought Index (Sokcho)

Table 5. Year of Limited Water Supply and Drought Index (Taebaek)

Year of limited water supply	SPI	CZI	MCZI	ZSI
1987	-1.801	-1.666	-1.626	-1.434
1994	-2.326	-1.321	-1.396	-1.334
1995	-1.562	-1.478	-1.368	-1.314
2001	-2.742	-2.281	-2.385	-2.105
2008	-2.093	-1.879	-1.956	-1.562

Table 6. Year of Limited Water Supply and Drought Index (Sokcho)

Year of limited water supply	SPI	CZI	MCZI	ZSI
1995	-2.879	-2.103	-2.284	-1.741
1996	-1.588	-1.522	-1.386	-1.442
2001	-2.679	-2.278	-2.7	-1.862
2005	-1.247	-1.221	-1.158	-1.112
2011	-1.211	-1.193	-1.191	-1.173
2015	-2.131	-1.877	-1.877	-1.774

분석되었으며 가장 높은 재현성을 보였으며 CZI와 MCZI 가뭄지수가 95년과 01년에 극한가뭄이 발생하는 것으로 분석되었다. ZSI 가뭄지수의 경우 제한급수 년도에 극한가뭄이 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 연구의 목적은 기상학적 가뭄과 실제 가뭄피해 사례와의 비교를 통하여 각 가뭄지수들의 재현정도를 비교하고자 하였다. 분석을 위하여 강수량을 이용하여 분석을 실시하는 기상학적 가뭄지수 SPI, CZI, MCZI, ZSI 네 가지 지수를 비교하였으며 지속기간 3개월 분석을 실시하였다. 대상지역으로 강수에 직접적인 영향을 미치는 기상학적 가뭄에 민감한 지역인 강원도지역 태백과 속초 지역으로 선정하였으며 종관기상관측소 30년 기상자료(1986~2015)를 이용하였다.

제한급수 년도와 관계없이 극한가뭄에 대한 가뭄분석 결과를 보았을 때 태백의 경우 SPI는 7회, MCZI는 3회, CZI는 2회, ZSI는 1회로 분석되었으며 속초지역의 경우 SPI는 8회, MCZI는 4회, CZI는 3회, ZSI는 0회로 분석되었다. 제한급수 년도와 가뭄지수 분석 결과를 보았을 때 태백지역의 경우 분석기간(1986~2015) 동안 제한급수를 5회(1987, 1994, 1995, 2001, 2008) 실시하였으며 SPI 가뭄지수는 1994년, 2001년, 2008년 극한가뭄이 발생하는 것으로 가장 재현성이 높은 것으로 분석되었다. MCZI, CZI, ZSI 가뭄지수의 경우 2001년도에만 극한가뭄이 발생하는 것으로 분석되었다. 속초지역의 경우 6회(1995, 1996, 2001, 2005, 2011,

2015) 제한급수를 실시하였으며 태백지역과 마찬가지로 SPI 가뭄지수가 가장 높은 재현성을 보였으며 1995년, 2001년, 2015년 극한가뭄이 발생하는 것으로 분석되었다. MCZI, CZI 가뭄지수의 경우 1995년과 2001년에 극한가뭄이 발생하는 것으로 분석되었으며 ZSI 가뭄지수의 경우 극한가뭄이 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 강수량만을 이용하여 가뭄분석이 가능한 가뭄지수에 대하여 분석하고자 하였으며 일반적으로 사용되는 SPI 가뭄지수 뿐만 아니라 MCZI, CZI, ZSI 가뭄지수에 대해서도 적용성을 검토하고자 하였다. 태백과 속초지역의 과거 제한급수 년도와 비교하였을 때 Gamma 확률분포형을 적용한 SPI 가뭄지수가 가장 높은 재현성을 보였으며 Pearson Type 3 확률분포형과 평균강수량을 적용한 CZI와 중앙값을 이용한 MCZI 가뭄지수는 SPI 가뭄지수에 비해 다소 떨어지는 재현성을 보였다. 단순 강우자료만을 이용한 ZSI 가뭄지수는 극한가뭄에 대하여 재현성이 가장 떨어지는 것으로 분석되었으며 강수량만을 이용한 네 가지 가뭄지수를 보았을 때 SPI 가뭄지수가 가뭄분석에 사용하기에 적합한 것으로 분석되었다. 추가적으로 미래 기후변화시나리오를 이용하여 태백과 속초 지역에 기상학적 가뭄분석을 실시한다면 미래 두 지역에서 발생할 수 있는 기상학적 가뭄대책에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리사업(83091)의 지원을 받아 수행되었습니다. 또한 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업의 연구비 지원(2019-MOIS31-010)

에 의해 수행되었으며, 2017년도 강원대학교 대학회계 학술연구조성비(관리번호-620170154)의 지원에도 감사드립니다.

References

- Abromowitz, M. and Stegun, I. A. (1964). *Handbook of mathematical function with formulas, graphs, and mathematical tables*, U.S. Dept. of Commerce, National Bureau of Standards Applied Mathematics Series 55, Washington, D.C.
- Bae, D. H., Son, K. H. and Kim, H. A. (2013). "Derivation & evaluation of drought threshold level considering hydro-meteorological data on South Korea." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 3, pp. 287-299 (in Korea).
- Hisdal, H. and Tallaksen, L. M. (2003). "Estimation of regional meteorological and hydrological drought characteristics: a case study for Denmark." *Journal of Hydrology*, Vol. 281, No. 3, pp. 230-247.
- Hosseinzadhe, P., Hossein, T. and Sobhan, S. (2012). "Hydrological drought in the west of Iran and Possible association with large-scale atmospheric circulation patterns." *Hydrological Processes*, Vol. 28, No. 3, pp. 764-773.
- Jain, V. K., Pandey, R. P., Jain, M. K. and Byun, H. R. (2015). "Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin." *Weather and Climate Extremes*, Vol. 8, pp. 1-11.
- Jang, I. K. (2016). *Study on drought of Kangwon-do using SPEI and PMDI*, Master's thesis, Kangwon National University (in Korea).
- Ju, X. S., Yang, X. W., Chen, L. J. and Wang, Y. M. (1997). "Research on determination of indices and division of regional flood/drought grades in China (in Chinese)." *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, Vol. 8, No. 1, pp. 26-33.
- Khadr, M., Morgenschweis, G. and Schlenkhoff, A. (2009). "Analysis of meteorological drought in the rhur basin by using the standardized precipitation index." *Journal of Environmental and Ecological Engineering*, Vol. 3, No. 9, pp. 291-300.
- Kim, B. S., Sung, J. H., Lee, B. H. and Kim, D. J. (2013). "Evaluation on the impact of extreme droughts in South Korea using the SPEI and RCP 8.5 climate change scenario." *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, KSHM, Vol. 13, No. 2, pp. 97-109 (in Korea).
- Kim, S. S. (2011). *Drought assessment in the Korean peninsula through drought frequency analysis*, Master's thesis. University of Seoul (in Korea).
- Lee, B. R., Sung, J. H. and Chung, E. S. (2015). "Comparison of meteorological drought and hydrological drought index." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, KWRA, Vol. 48, No. 1, pp. 69-78 (in Korea).
- McKee, T. B., Doeskin, N. J. and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." *Proc. 8th Conf. on Applied Climatology*, January 17-22, 1993, American Meteorological Society. Boston, Massachusetts, pp. 179-184.
- 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 the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 57, No. 1, pp. 37-45 (in Korea).
- Tigkas, D., Vangelis, H. and Tsakiris, G. (2012). "Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds." *Science of the Total Environment*, Vol. 440, pp. 33-41.