

An Analysis of Spatio-temporal Characterisrice of Drought Using Non-stationary Time Dependent-standardized Precipitation

Se Jin Jeung^{1#}, Dong ho Kang², Byung Sik Kim^{2*}

¹ Kangwon Institute of Inclusive Technology, Kangwon National University, 1 Chuncheon-si, Gangwon-do, Korea

² Department of Urban Environment & Disaster Management School of Disaster Prevention, Kangwon National University, 346 Joogang-ro, Samcheok-si, Gangwon-do, Korea

Abstract

The SPI index was developed based on the fact that when drought occurs when reduced precipitation causes water shortage relative to the required water demand. However, the SPI index works under the assumption of stationarity or normality in which the probabilistic properties of the time series data do not change over time. It has limitations in reflecting information changing over time sufficiently, such as climate change. In this study, we used SPIt, a new frequency analysis method considering non-stationarity, which is different from the existing SPI index calculation. We first used daily precipitation data to construct the time series data of 7-day precipitation. For the duration of drought, both SPI and SPIt indices for 3 months were calculated on a monthly and weekly basis, and the reproducibility of each index was assessed for the areas experiencing restricted water supply. In addition, both indices were calculated for all national meteorological stations in South Korea, which was used to create a spatial distribution map and confirm their spatial reproducibility.

Key words: non-stationarity, SPIt, SPI, drought, limited water supply

1. 서론

최근 지구온난화로 인한 기후변화와 기후 변동은 인간의 삶에 악영향을 미칠 것으로 예측되고 있으며 전 세계적으로 많은 논의가 이루어 지고 있다(IPCC, 2014). 또한 우리나라는 1990년대를 기준으로 강수량의 변동이 약 30%이며, 한반도의 기후대는 고온다습한 아열대 기후와 몬순의 영향을 받는 습한 대륙성 기후의 지대 면적이 점차 넓어질 것이라는 연구결과도 있다

(Jeung, *et. al.*, 2019). 이처럼 현재 그리고 미래의 기후는 정상성(Stationarity)이 아닌 비정상성(Non-stationarity)이 존재 할 것이라 전망된다. 이러한 기후변화는 인간의 생활 기반, 생태계의 악화, 물부족, 식량고갈, 해안 및 저지대의 침수위험, 산업 및 건강 등 다양한 부문에서 광범위하게 영향을 미치고 있다. 기후변화로 인한 기온의 상승은 증발산량의 증가를 야기하며, 이는 극한 가뭄 발생 가능성을 증가시키게 된다. 가뭄은 크게 4가지(기후학적, 기상학적, 농업적, 수문학적 가뭄)로 구분

The 1st author: Se Jin Jeung, Tel. +82-33-570-6458, Fax. +82-33-570-6459, e-mail. climate@kangwon.ac.kr

* Corresponding author: Byung Sik Kim, Tel. +82-33-570-6819, Fax. +82-33-570-6819, e-mail. hydrokbs@kangwon.ac.kr

되며, 기후학적 가뭄은 가용수량으로 전환된 강수량이 평년 강우량에 미달하는 것을 의미한다. 기상학적 가뭄은 기후학적 가뭄과 유사한 의미를 가지지만, 기온에 따른 증발산량 등이 영향을 미친다는 차이가 있다. 농업적 가뭄은 농작물의 생육에 필수적인 토양수분이 부족해지는 것을 의미하며, 유출량, 저수지 수위 등의 자료를 통해 산정한다. 수문학적 가뭄은 강수량의 부족으로 인해 하천의 물이 고갈되어 물부족의 피해의 가능성이 예상되는 것을 말하며 다양한 수문학적 요소(지하수의 고갈, 하천 유속증가등)과 인위적인 요소(용수 사용의 증가 등)가 포함된다. 따라서 4가지의 가뭄의 의미는 서로 다르다.

앞서 언급하였듯이 가뭄은 강수량이 평균보다 적을 시 발생한다. 이러한 가뭄의 원인을 명확하게 파악하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 주요 연구사례로 Na, *et. al.*(2016)은 수문학적 가뭄지수인 RDI(Reconnaissance Drought Index)를 다양한 기후변화시나리오 모델에 적용하여 앙상블기법을 통한 가뭄 발생 시나리오를 추정하였다. Nam, *et. al.*(2008)는 SPI(Standardized Precipitation Index), PDSI(Palmer Drought Severity Index), PDI(Phillips Drought Index) 등 총 5개의 가뭄지수를 이용하여 북한지역의 가뭄지수 분석결과를 비교하여 각 가뭄지수들이 과거 가뭄을 얼마나 재현하는지 확인하였다. Kim, *et. al.*(2013)은 SPEI(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)의 적용성을 입증하고 RCP8.5기후변화 시나리오를 기반한 미래가뭄의 변화양상을 평가하였다. Hisdal, *et. al.*(2003)은 기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄 특성을 모두 고려하여 덴마크의 지역적 가뭄 특성에 대하여 연구를 진행하였다. Lee, *et. al.*(2015)는 기상학적 가뭄지수인 SPI 지수를 이용하여 5대강 권역을 대상으로 과거 가뭄사상을 규모적 관점에서 정략적 평가를 실시하였다. Tigkas, *et. al.*(2012)은 SDI와 RDI와 같은 수문학적 가뭄 가뭄지수를 이용하여 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수의 상관성 여부를 평가하였다. Hosseinzadeh, *et. al.*(2012)은 이란 서부를 대

상으로 수문학적 가뭄지수를 통한 부존 수자원 대해 분석하였고 Jain, *et. al.*(2015)는 SPI, EDI(Effective Drought Index), CZI(China-Z Index), RD(Rainfall Departure), RDI 지수를 이용하여 인도의 Ken강 유역을 대상으로 기상학적 가뭄의 영향에 대해 평가하였다.

연구사례를 검토한 결과 기상학적 가뭄지수로 SPI 지수를 가장 많이 사용하고 있다. SPI 지수는 1993년 Mckee, *et. al.*(1993, 1995)이 강수량이 감소하면 필요한 물수요에 비해서 상대적인 물부족을 야기하게 되고, 이는 가뭄발생의 원인이 된다는 것에 착안하여 개발하였다. 하지만 다른 가뭄지수와 마찬가지로 수문시계열을 표준정규분포로 산정하기 때문에 정상성을 기본 가정으로 설정하고 있다. 하지만 현재의 기후는 정상성이 아닌 비정상성의 특성을 띄고 있기 때문에 가뭄지수의 산정에 있어서 비정상성을 고려해야 한다. 이에 본 연구에서는 Gamlss 기반의 비정상성 가뭄지수인 SPIt(Time Dependent-Standardized Precipitation Index)의 산정법을 제시하고 실제 가뭄이 발생하여 제한급수를 시행한 지역에 대해 검증을 수행하였다.

II. 방법론 및 자료

1. 방법론

1) 개요

본 연구에서는 기존의 정상성 가정에 근거한 SPI 지수 산정과는 달리 비정상성(Non-stationarity)을 고려할 수 있는 빈도분석 방법인 SPIt를 사용하고자 한다. 먼저 일 강수량자료를 이용하여 7일 지속기간의 강수 시계열을 구축하였다. 가뭄지속기간은 SPI와 SPIt 모두 7일 단위를 기준으로 3개월과 6개월의 SPI와 SPIt를 계산하고 과거 긴급제한급수지역을 대상으로 각 지수의 재현성을 확인하였다. 또한 전국 기상관측소를 기준으로 SPI 지수와 SPIt 지수를 산정하고 공간분포도를 작성하여 공간적인 재현성을 확인하였다. <Figure 1>에 본 연구의 연구흐름도를 도시하였다.

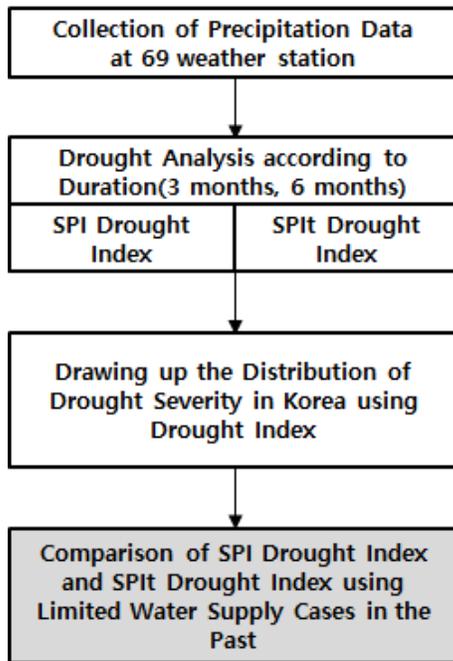


Figure 1. Flow chart of study

2) Standardized Precipitation Index(SPI)

SPI 가뭄지수는 강수량의 상대적인 감소에 의해 시작된다는 논리에 착안하여 개발되었으며 기상학적 가뭄분석에서 일반적으로 사용하고 있는 지수이다 (Mckee, et. al., 1993). SPI 지수는 시간별 누가강수시계열을 구성하고, 이는 이동누가에 의한 방법으로 주단위의 강수량을 시간에 따라 연속적으로 누가하여 구한다. 즉, 각 주를 기준으로 하여 시간에 해당하는 누가강수 시계열을 산정하고, 이는 누가된 주수로 나누어 고려된 주에 따른 이동평균 강수계열을 구성하게 된다. 지속시간별 강수 시계열이 구성되면 이 시계열을 주별로 분석하여 Gamma 분포형에 적용시켜 산정한다(Mckee, et. al., 1993). SPI 가뭄지수 산정방법은 <Eq. (1) ~ (5)>와 같다.

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

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

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

3) Time Dependent-Standardized Precipitation Index(SPIt)

GAMLSS(Generalized Additive Model for Location, Scale and Shape)는 통계 모델링 및 학습에 대한 회귀분석에 현대적 분포 기반의 접근법이다. 모수 변수는 분포형의 매개변수를 통해 가정되고, 분포의 매개변수는 선형, 비선형 또는 Smooth functions를 통해 산정되며 설명 변수에 따라 변화한다. 특히 GAMLSS 통계 프레임워크는 사용하면 Flexible regression 및 Smoothing models을 데이터에 적용시킬 수 있게 한다. GAMLSS 모델은 반응 변수가 heavy or light-tailed 하고 양수 또는 음수로 치우친 모수 분포로 가정한다. 또한, 분포의 모든 매개변수(location (e.g., mean), scale (e.g., variance) and shape (skewness and kurtosis) 는 설명 변수의 선형, 비선형 또는 smooth functions로 모델링할 수 있다. Location, Scale and Shape에 대한 GAMLSS 모델은 자주 쓰이는 일반화된 선형 모델(GLM) 및 일반화된 첨가 모델(GAM)의 한계점을 극복하기 위해 Rigby & Stasinopoulos(2007)가 개발한 통계 모델이다. 이러한 한계에 대한 개요는 Nelder & Wedderburn(1972)과 Hastie's & Tibshirani(1990)를 통해 알 수 있다.

GAMLSS에서 반응 변수에 대한 지수 분포 가정은 완화되고 highly skew and or kurtotic continuous를 포함하는 일반 분포군으로 대체되며, 모델의 체계적인 부분은 설명 변수 및 평균(location) 뿐만 random effects의 선형 또는 비선형, 파라메트릭 또는 추가 비모수 함수로서 y 분포의 다른 모수를 모델링할 수 있도록

확장된다. GAMLSS는 특히 leptokurtic 또는 platykurtic 및 양 또는 음으로 왜곡된 반응 변수를 모델링하는데 적합하다. 개수 유형 반응 변수 데이터는 적절한 분산, 이산 분포를 사용하여 과분산으로 처리한다. 또한 Heterogeneity은 설명 변수를 사용하여 척도 또는 모양 매개 변수를 모델링하여 처리된다. GAMLSS 모델의 구성은 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 g_1(\mu) &= \eta_1 = X_1\beta_1 + \sum_{j=1}^{J_1} h_{j1}(x_{j1}) \\
 g_2(\mu) &= \eta_2 = X_2\beta_2 + \sum_{j=1}^{J_2} h_{j2}(x_{j2}) \\
 g_3(\mu) &= \eta_3 = X_3\beta_3 + \sum_{j=1}^{J_3} h_{j3}(x_{j3}) \\
 g_4(\mu) &= \eta_4 = X_4\beta_4 + \sum_{j=1}^{J_4} h_{j4}(x_{j4})
 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 μ, σ, ν, τ 는 η_k 는 n 의 길이 벡터, $\beta_k^T = (\beta_{1k}, \beta_{2k}, \dots, \beta_{jk})$ 는 J_k 의 매개변수 벡터, X_k 는 설계 행렬 순서, $n \times J_k$ 와 h_{jk} 는 설명변수의 Smooth 비모수 함수 $x_{jk}, j = 1, 2, 3, \dots, J_k$ 와 $k = 1, 2, 3, 4$ 이다.

GAMLSS 모델과 관련된 R에 몇 가지 패키지가 작성되어 있다(Stasinopoulos, et. al., 2007).

GAMLSS를 이용하여 산정되는 SPIt 지수는 SPI지수와 동일한 범위를 가지며, 가뭄지수의 범위와 상태는 <Table 1>과 같다.

2. 대상유역 현황 및 자료

본 연구의 대상지점은 기상청 산하 60개 기상관측소

Table 1. Classification Range of SPI & SPIt Value

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

이며, 1973년부터 2019년 12월 까지 총 47년간의 주 단위 강수량 자료를 사용하였다(<Figure 2>, <Table 2>). 또한 우리나라 기후특성을 고려하여 각 지점별로 7일 단위 지속시간 3개월, 6개월의 SPIt 지수를 산정하였

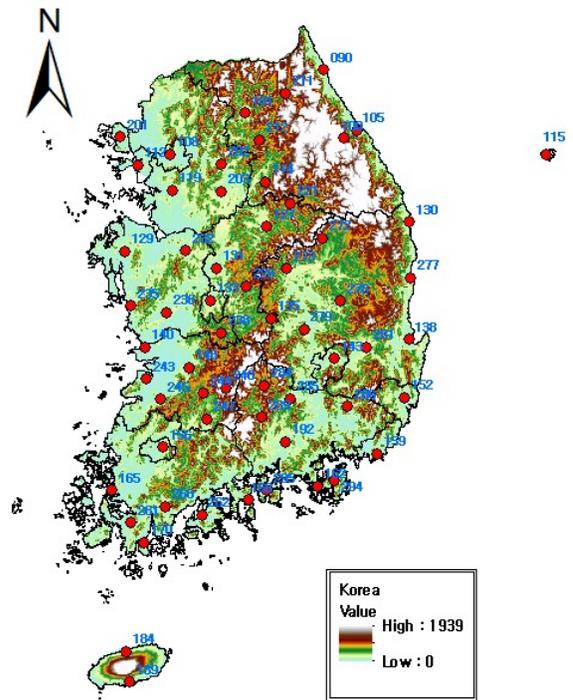


Figure 2. Location information for observation sites

Table 2. Information on observation locations used in the present study(ID: indentification number)

ID	Name	Lon	Lat	Elev.	ID	Name	Lon	Lat	Elev.
90	Sokcho	128.5	38.25	17.8	127	Chungju	127.9	36.9	25.9
100	Daegwallyeong	128.8	37.7	842.5	129	Seosan	126.5	36.8	49.4
101	Chuncheon	127.7	37.9	76.8	130	Uljin	129.4	37	57.4
105	Gangneung	128.9	37.7	25.9	131	Cheongju	127.4	36.6	68.3
108	Seoul	126.9	37.6	86	133	Daejeon	127.4	36.4	242.5
112	Incheon	126.6	37.5	68.9	135	Chupungryung	128	36.2	140.1
114	Wonju	127.9	37.3	149.8	138	Pohang	129.4	36	1.9
115	Ulleungdo	130.9	37.5	33.6	140	Gunsan	126.7	36	25.6
119	Suwon	126.9	37.3	114.1	143	Daegu	128.6	35.9	57.6

Table 2. Information on observation locations used in the present study(ID: indentigation number)(continued)

ID	Name	Lon	Lat	Elev.	ID	Name	Lon	Lat	Elev.
146	Jeonju	127.2	35.8	53.5	236	Buyeo	126.9	36.3	11.3
152	Ulsan	129.3	35.6	34.7	238	Gumsan	127.5	36.1	171.3
156	Gwangju	126.9	35.2	70.5	243	Buan	126.7	35.7	10.7
159	Busan	129	35.1	69.2	244	Imsil	127.3	35.6	246.9
162	Tongyeong	128.4	34.8	31.7	245	Jeongeup	126.9	35.6	44.1
165	Mokpo	126.4	34.8	37.9	247	Suncheon	127.2	35.1	74.4
168	Yeosu	127.7	34.7	66.1	260	Jangheung	126.9	34.7	45.2
170	Wando	126.7	34.4	35.2	261	Haenam	126.6	34.6	13.7
184	Jeju	126.5	39	19.9	262	Gohung	127.3	34.6	53.3
188	Seongsan	16.8	33.4	17.7	272	Yongju	128.5	36.8	210.2
189	Seogwipo	126.6	33.2	50.4	273	Mungyeong	128.1	36.6	170.4
192	Jinju	128.1	35.2	21.3	277	Youngdeok	129.4	36.5	41.2
201	Ganghwa	126.4	37.7	45.7	278	Uisung	128.7	36.4	81.1
202	Yangpyeong	127.5	37.5	47	279	Gumi	128.3	36.1	47.9
203	Icheon	127.5	37.3	77.8	281	Yeongcheon	129	36	94.1
211	Inje	128.1	38.1	198.6	284	Geocheong	127.9	35.7	220.9
212	Hongcheon	127.9	37.7	140.6	285	Hapcheon	128.2	35.6	32.7
221	Jecheon	128.2	37.2	363.2	288	Miryang	128.7	35.5	12.6
226	Boun	127.7	36.5	174.1	289	Sanchong	127.9	35.4	138.6
232	Cheonan	127.1	36.8	234.9	294	Geoje	128.6	34.9	45.3
235	Boryeong	126.6	36.3	15.3	295	Namhae	127.9	34.8	51.3

Table 3. Status of droughts in our country

Area	City	Release date	End date	Limited water supply period
Gangwon-do	Sokcho	1995-09	1995-12	4
		1996-02	1996-06	5
		2001-03	2001-06	3
		2005-10	2006-03	6
		2010-10	2011-02	5
		2014-11	2015-07	9
	Taebaek	1994-07	1994-07	1
		1995-01	1995-05	5
		2001-05	2001-06	2
		2008-12	2009-02	4
Jeollanam-do	Yeosu	1990-10	1990-12	3
		1995-03	1995-07	4
		2008-12	2009-04	5
		2017-04	2017-09	4
Jeollanam-do	Gohung	1992-09	1992-12	4
		1994-10	1994-11	2
		1995-09	1996-03	7

※ Sources: National Drought Information-analysis Center.

다. 또한 국가가뭄정보포털(NDIP)의 제한급수 정보를 이용하여 4개 지역(속초, 태백, 여수, 고흥)의 제한급수지역을 대상으로 SPIt 지수 결과를 검증하였다 (<Table 3>).

III. SPI 지수와의 비교를 통한 Gamiss Frame 기반의 SPIt 지수 검증

이 장에서는 기상청 산하 60개 기상관측소의 강수량 자료를 이용하여 7일단위의 지속기간 3개월, 6개월, 12개월, 의 SPIt지수를 산정하였으며 같은 방법으로 SPI지수를 산정 후 두 지수의 비교를 통해 SPIt 지수의 성능을 확인하였다. 또한 <Table 3>와 같이 제한급수가 시행되었던 지역을 가뭄이 발생한 지역으로 가정하고 대상기간에 가뭄지수가 ‘-2’ 이하로 떨어지는지 확인하여 해당 가뭄기간의 가뭄지속기간이 실제

가뭄지속기간을 잘 재현하는지 확인하였다. 또한 가뭄심도 분포도를 작성하여 공간적인 가뭄 재현도를 비교하여 SPIt 지수의 효용성을 검토하였다.

1. SPI 지수 및 SPIt 지수 산정

이 절에서는 기상학적 가뭄지수인 SPI 지수와 비정상 SPIt 지수를 산정하여 과거 제한급수 기간에 극한 가뭄(‘-2’)을 얼마나 정량적으로 재현하는지 검토하였다. Fig. 3~10은 SPI 지수와 SPIt 지수의 시계열 그림을 나타낸 그림이며, <Table 4>는 각 제한급수 기간 때의 각 시수의 정량적인 값과 최대지속기간을 정리한 표이다. 결과를 살펴보면 <Figure 3>은 속초지역의 SPI 지수의, <Figure 4>는 SPIt 지수의 시계열 그림이다. 속초지역의 경우 1995년, 1996년, 2001년, 2014년에 큰 가뭄이 발생한 지역으로 결과를 살펴보면 SPI의 경우 지속기간 3개월일 때 1991년부터 2006년까지 지수가 ‘-2’로 떨어지는 횟수가 많았고, 최근에는 -2로 떨어지지만 가뭄의 지속기간이 길어진 것을 확인할 수 있었다. SPIt의 경우 비슷한 결과를 나타내었으나 1991년부터 2006년의 기간동안 가뭄지수가 “-3”이하

로 떨어지는 경우가 발생하였다. 이는 극한가뭄의 재현성이 더 높은 것을 의미한다. 또한 지속기간 6개월의 경우 SPI와 SPIt가 서로 유사한 결과를 나타내었으나 SPIt가 극한가뭄을 잘 모사하는 것으로 분석되었다. <Figure 5>는 태백지역의 SPI 지수의, <Figure 6>은 SPIt 지수의 시계열 그림이다. 태백지역의 경우 1994년, 2008년에 큰가뭄이 발생한 지역으로 SPI 와 SPIt 지수의 시계열 그림이다. 결과를 살펴보면 SPI의 경우 지속기간 3개월일 때 1991년부터 2006년까지 지수가 “-2”로 떨어지는 횟수가 많았으나 최근에는 ‘-2’로 떨어지지만 가뭄의 지속기간이 길어진 것을 확인할 수 있었다. SPIt의 경우 비슷한 결과를 나타내었으나 1991년부터 2006년의 기간동안 가뭄지수가 ‘-3’이하로 떨어지는 경우가 발생하였다. 이는 극한가뭄의 재현성이 더 높은 것을 의미한다. 또한 지속기간 6개월의 경우 SPI와 SPIt가 서로 유사한 결과를 재현내었으나 SPIt가 극한가뭄을 잘 모사하는 것으로 분석되었다. <Figure 7>은 여수지역 SPI 지수의, <Figure 8>은 SPIt 지수의 시계열 그림이다. 여수지역의 경우 2008년, 2017년에 큰 가뭄이 발생한 지역으로 결과를 살펴

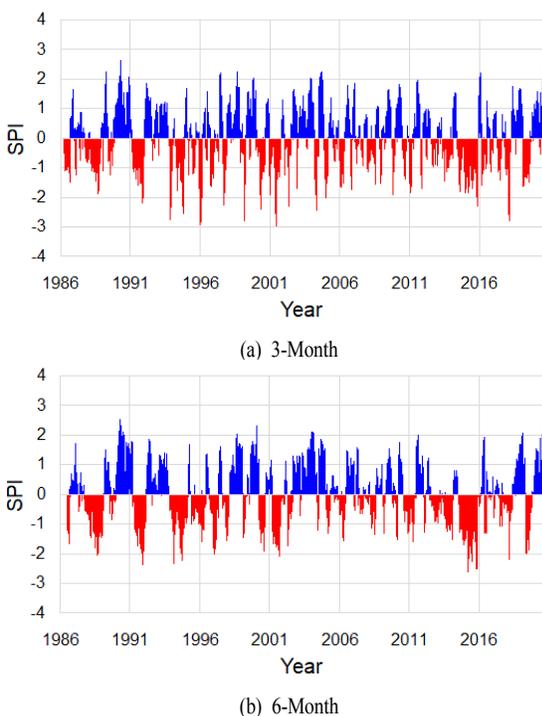


Figure 3. SPI drought index calculation result(Sokcho)

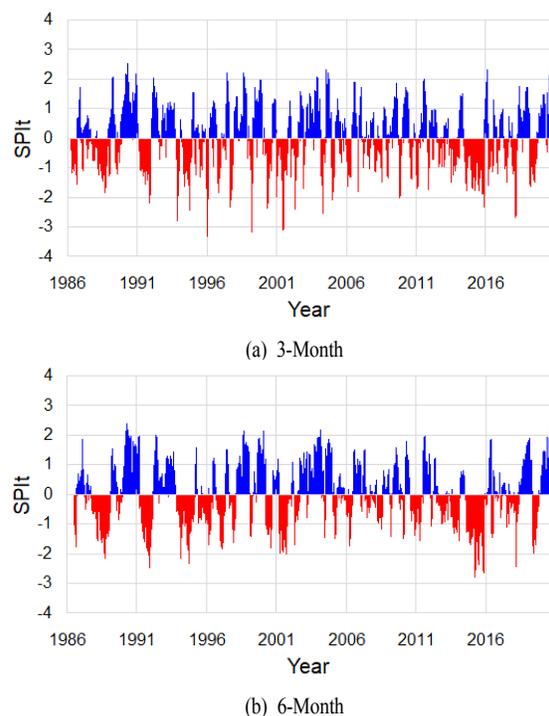


Figure 4. SPIt drought index calculation result(Sokcho)

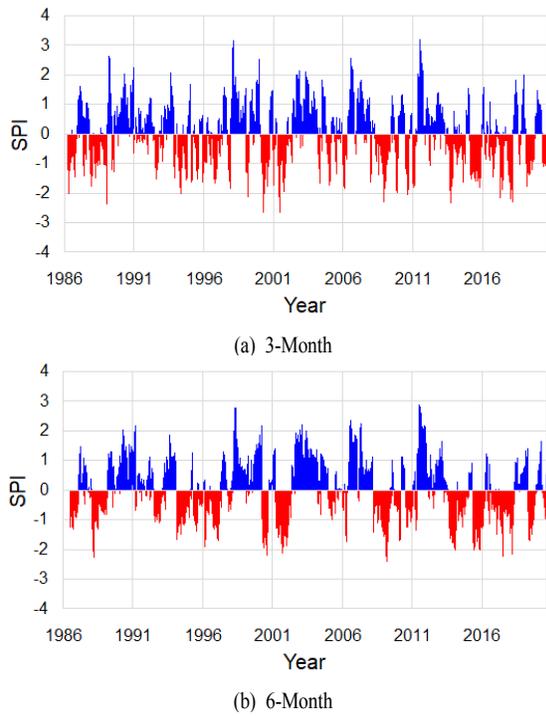


Figure 5. SPI drought index calculation result(Taebaek)

보면 앞선 지역의 분석결과와 같이 SPI의 경우 지속기간 3개월일 때 1990년대에서 2000년대 초반까지 '-2' 이하인 횟수가 많았으며 2010년대 후반까지도 '-2'이

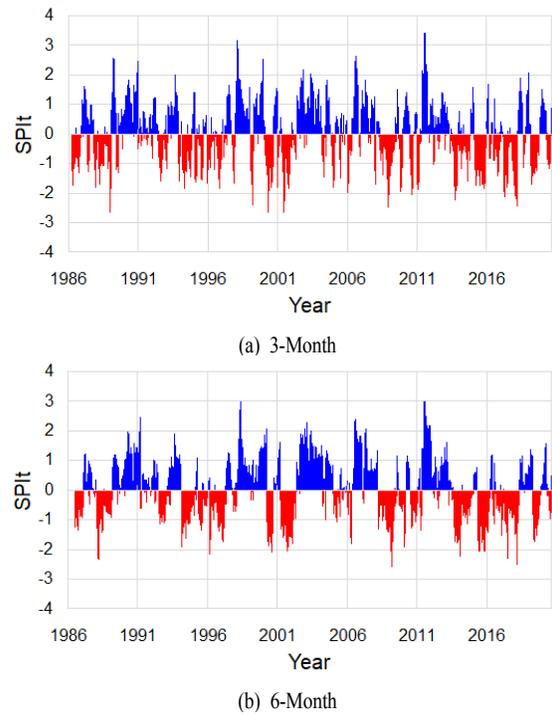


Figure 6. SPIt drought index calculation result(Taebaek)

하의 결과가 빈번하게 발생하는 것으로 분석되었다. SPIt의 경우 SPI 지수보다 실제 제한급수를 시행하였던 기간에 대하여 더 높은 재현성을 재현내었으며 극

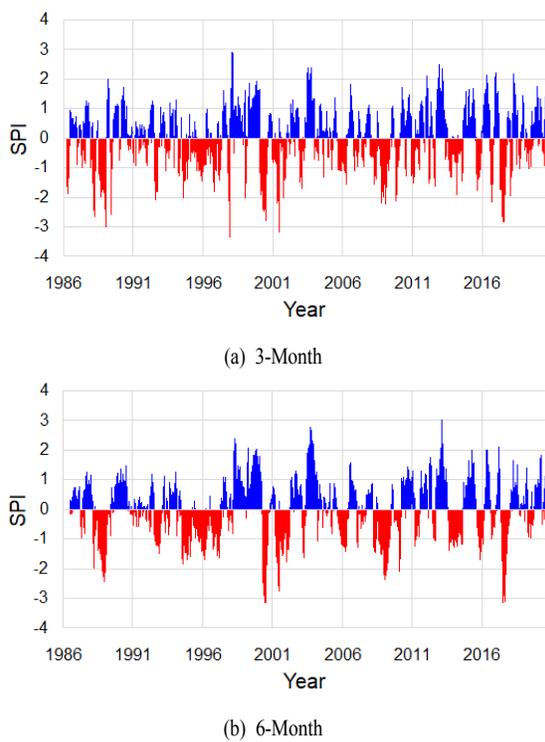


Figure 7. SPI drought index calculation result(Yeosu)

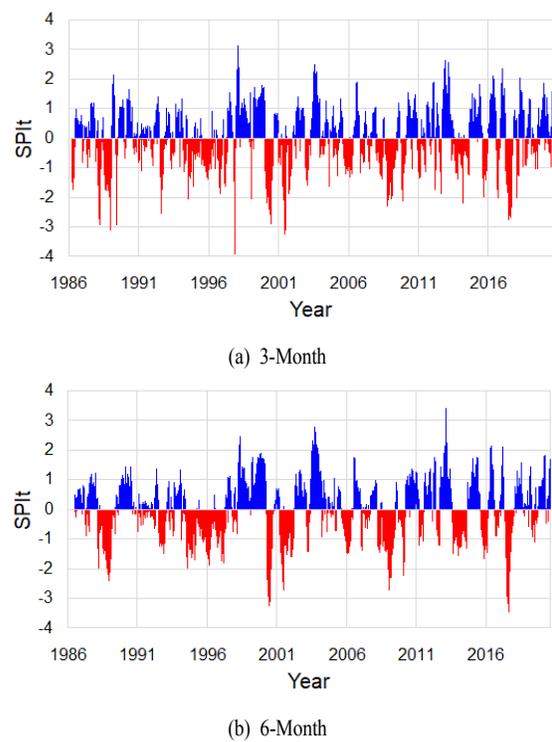
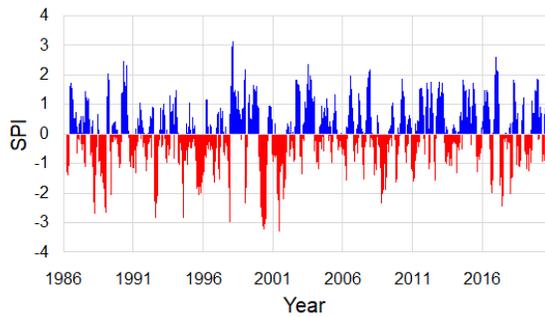
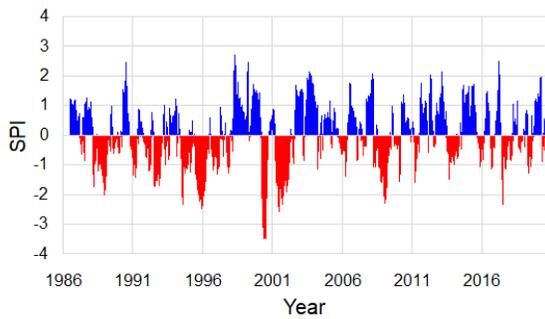


Figure 8. SPIt drought index calculation result(Yeosu)



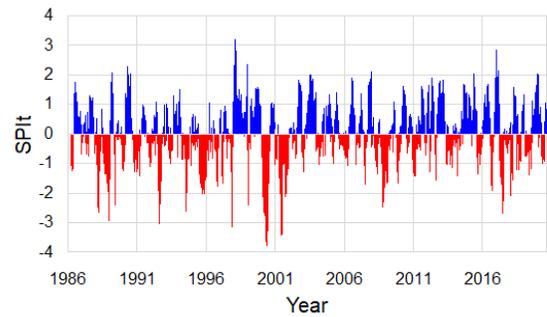
(a) 3-Month



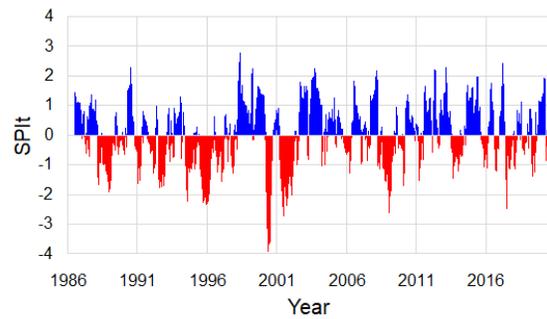
(b) 6-Month

Figure 9. SPI drought index calculation result(Goheung)

한가뭏또한 잘 모사하였다. <Figure 9>는 고흥지역 SPI 지수의, <Figure 10>는 SPIt 지수의 시계열 그림이며 고흥지역은 1990년대 초반에 실제 세 번의 제한급수를 실시하였다. SPI 지수와 SPIt 지수의 분석결과는



(a) 3-Month



(b) 6-Month

Figure 10. SPIt drought index calculation result(Goheung)

유사하게 분석되었으나 1994년 제한급수를 실시했던 시기의 경우 SPI 가뭏지수에서는 극한 가뭏을 의미하는 '-2'이하의 결과가 재현나지 않았으나 SPIt에서는 '-2'이하의 결과로 분석되어 SPI 가뭏지수보다 극한가

Table 4. Comparison result of SPI and SPIt

Area	City	Release date	End date	Limited water supply period	SPI	SPI < '-2'	SPIt	SPIt < '-2'
Gangwon-do	Sokcho	1995-09	1995-12	4	-2.9	1	-3.5	2
		1996-02	1996-06	5	-2.1	4	-3.1	5
		2001-03	2001-06	3	-2.8	4	-3.1	4
		2005-10	2006-03	6	-1.6	-	-1.7	-
		2010-10	2011-02	5	-1.7	-	-1.9	-
		2014-11	2015-07	9	-2.0	2	-2.1	6
Gangwon-do	Taebaek	1994-07	1994-07	1	-1.7	-	-1.9	-
		1995-01	1995-05	5	-1.4	-	-1.4	-
		2001-05	2001-06	2	-2.1	2	-2.7	4
		2008-12	2009-02	4	-2.3	4	-2.5	4
Jeollanam-do	Yeosu	1990-10	1990-12	3	-0.9	-	-1.2	-
		2008-12	2009-04	5	-2.1	2	-2.4	3
		2017-04	2017-08	4	-2.4	2	-2.8	3
		1992-09	1992-12	4	-2.1	3	-2.7	5
Jeollanam-do	Gohung	1994-10	1994-11	2	-1.8	-	-2.6	3
		1995-09	1996-03	7	-3.0	2	-3.2	2
		1995-09	1996-03	7	-3.0	2	-3.2	2

몹을 더 잘 나타내고 있다.

2. 관측자료 기반 기상학적 가뭄심도 분포도 작성

본 논문에서는 전국 기상관측소의 관측자료를 이용하여 SPI 지수와 SPIt 지수를 산정 하였으며 전 기간에 대해 가뭄지수가 '-2' 이하로 떨어지는 횟수를 산정하여 지속기간 3개월과 6개월에 대해 가뭄심도 분포도를 작성하였다. <Figure 11>은 SPI와 SPIt 지수가 '-2' 이하로 떨어지는 횟수를 대상으로 전국 공간분포한 그

립이다. 결과를 살펴보면 홍천군, 해남군, 함양군은 3개월 이내의 단기가뭄이 발생하였으며 SPIt 지수가 발생 횟수로 보았을 때 보다 높은 재현성을 보였다. 태백시는 단기적 가뭄이 극심한 지역이지만 SPI 지수는 SPIt 지수보다 과소평가 됨을 확인하였다. 속초시의 경우 5~6개월 기간동안 실제로 가뭄이 발생하였고, SPIt 지수의 '-2' 이하의 극한가뭄을 재현하는 것으로 분석되었다. 또한 경남 고성, 밀양과 경북 청도, 경산의 경우 가뭄이 발생하지 않았으나 SPI 지수는 극한가뭄이 발

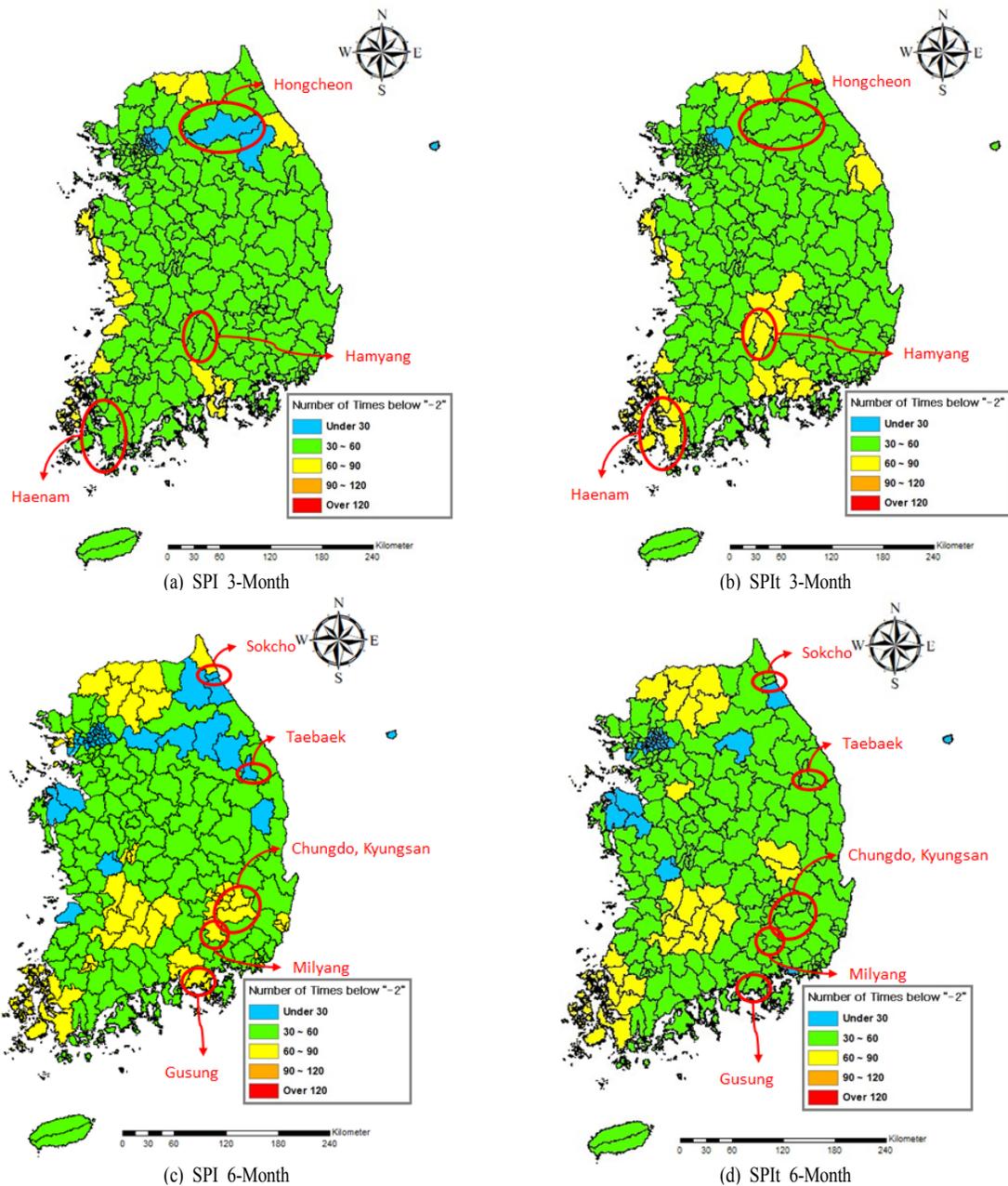


Figure 11. Drought depth distribution map based on observations

생하는 것으로 분석되었다.

III. 결론

본 연구에서는 현재의 기후의 트렌드에 맞는 비정상성 기반 가뭄지수(SPIt)를 제시하였다. 먼저 전국의 60개 기상관측소의 강수량자료를 이용하여 7일단위의 지속기간 3개월, 6개월 기간에 대해 SPI와 SPIt 지수를 산정하였으며 과거 긴급제한급수지역을 대상으로 각 지수의 재현성을 검토하였다. 재현성을 검토하기 위해 긴급제한급수기간에 가뭄지수가 '-2' 이하로 떨어지는지 확인하고 지수 값을 추출하여 심한 가뭄이 발생 하였는지 검토하였다.

각 대상지역의 검토 결과를 종합하여 SPIt 지수의 성능을 확인한 결과 SPI 지수보다 실제 제한급수를 시행하였던 기간에 대해 더 높은 재현성을 나타내었고, 극한가뭄 또한 잘 모사하는 것을 확인하였다. 또한 공간적인 가뭄 재현도를 확인하기 위해 SPI 지수와 SPIt 지수의 계산결과를 이용하여 전 기간에 대해 가뭄지수가 '-2'이하로 떨어지는 횟수를 산정하여 지속기간 3개월과 6개월에 대해 가뭄심도 분포도를 작성하였다. 가뭄 심도 분포도를 작성한 결과 실제로 가뭄이 발생하여 긴급제한급수를 한지역에서는 SPIt 지수가 더 잘 재현하는 것을 확인하였고, 실제로 가뭄이 발생하지 않았으나 SPI 지수는 가뭄이 심하게 발생한 것으로 분석된 반면 SPIt 지수는 가뭄이 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

이러한 결과는 정상성이 아닌 비정상성의 특성을 가지고 있는 현재의 기후 특성을 잘 모사하는 것으로 판단된다. 또한 기후변화시나리오를 적용하여 미래 극한가뭄의 전망시 SPIt 지수는 기후변화시나리오의 특성을 잘 반영 할 것으로 판단되며, 향후 SPIt 지수의 결과를 이용하여 극한가뭄 빈도분석 등을 통해 과거 또는 미래의 가뭄을 정량적으로 평가할 필요가 있을 것이라 판단된다.

본 연구는 기상학적 가뭄지수를 중점으로 진행되

었다. 이러한 기상학적 가뭄지수는 단지 기상학적인 특성을 반영하기 때문에 하천수, 생·농·공업 용수의 부족에 대해서는 간접적인 영향만 검토할 수 있다. 이러한 용수의 부족에 대해 검토하기 위해서는 수문학적인 개념의 가뭄지수의 적용이 필요하다. 향후 SPIt 지수와 수문학적인 가뭄지수를 혼합하여 가뭄을 검토하면 명확하게 하천수 등의 부족을 평가하게 된다면, 국가적 차원의 용수관리에 충분히 활용 될 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 극한재난대응기반기술개발사업의 연구비 지원(2019-MOIS31-010)에 의해 수행되었음.

References

- Choi, S. Y., K. Y. Han, and B. H. Kim. 2012. Comparison of Different Multiple Linear Regression Models for Real-time Flood Stage Forecasting. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers B*. 32(1): 9-20.
- Hastie, T. J. and R. J. Tibshirani. 1990. *Generalized Additive Models*. London: Chapman and Hall.
- Hisdal, H. and L. M. Tallaksen. 2003. Estimation of Regional Meteorological and Hydrological Drought Characteristics: A Case Study for Denmark. *Journal of Hydrology*. 281(3): 230-247.
- Hosseinzadhe, P., T. Hossein, and S. Sobhan Ardakani. 2012. Hydrological Drought in the West of Iran and Possible Association with Large-scale Atmospheric Circulation Patterns. *Hydrological Processes*. 28(3): 764-773.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer. eds. Geneva: IPCC.
- Jain, V. K., R. P. Pandey, M. K. Jain, and H. I. Byun. 2015.

- Comparison of Drought Indices for Appraisal of Drought Characteristics in the Ken River Basin. *Weather and Climate Extremes*. 8: 1-11.
- Jeung, S. J., J. H. Sung, and B. S. Kim 2019. Assessment of Climate Change Impacts on Climatic Zones over Korean Peninsular. *Hindawi Advances in Meteorology*.
- Kim, B. S., J. H. Sung, B. H. Lee, and D. J. Kim. 2013. Evaluation on the Impact of Extreme Droughts in South Korea Using the SPEI and RCP 8.5 Climate Change Scenario. *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*. 13(2): 97-109.
- Lee, S. Y. 2017. Estimation of Average Low Flow Using Base Flow Index for Ungauged Basin. Master Thesis. Inha University.
- Lee, T. H. 2016. Development of Regional Regression Model for Estimating Mean Low Flow in Ungauged Basins. Ph.D. Dissertation. Ajou University.
- McKee, T. B., N. J. Doeskin, and J. Kleist. 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Proc 8th Conference on Applied Climatology January 17-22. American Meteorological Society. Boston, Massachusetts. 179-184.
- Na, Ra, Sung Gwon Jo, Seung Hwan Yoo, Sang Hyun Lee, Jin Yong Choi, Kyung Hun Jeong, and Tae Seon Park. 2016. Analysis of Agricultural Reservoir Frought under Climate Change Using Multi-GCMs and RDI. *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*.
- Nam, W. H., S. H. Yoo, M. W. Jang, and J. Y. Choi. 2008. Application of Meteorological Drought Indices for North Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*. 50(3): 3-15.
- Nelder, J. A. and R. W. M. Wedderburn. 1972. Generalized Linear Models. *J. R. Stat. Soc. A*. 135(3): 370-384.
- Ryoo, K. S. and K. Y. Chong. 2008. Development of Multiple Regression Models for the Prediction of Reservoir Inflow in the Flood Season. Conference of Korean Society of Civil Engineers. 3500-3503.
- Stasinopoulos, D. Mikis and Robert A. Rigby. 2007. Generalized Additive Models for Location Scale and Shape(GAMLSS) in R. *Journal of Statistical Software*. 23(7): 1-46.
- Tigkas, D., H. Vangelis, and G. Tsakiris. 2012. Drought and Climatic Change Impact on Streamflow in Small Watersheds. *Science of the Total Environment*. 440: 33-41.
- Yoon. Y. N. 2007. *Hydrology*. Paju: Gyomoonsa.
- Korean References Translated from the English*
- 김병식, 성장현, 이병현, 김도정. 2013. 표준강수 증발산량지수 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)와 대표농도경로(Representative Concentration Pathways)를 이용한 남한지역 미래 가뭄의 변화전망. *한국방재학회논문집*. 13(2): 97-109.
- 김성실. 2011. 가뭄빈도해석을 통한 한반도의 가뭄 평가. 석사학위논문. 서울시립대학교.
- 나라, 조성권, 유승환, 이상현, 최진용, 정경훈, 박태선. 2018. Multi-GCMs과 RDI를 이용한 농업용 저수지 가뭄 대응 능력 분석. *한국농공학회 학술대회초록집*.
- 남원호, 유승환, 장민원, 최진용. 2008. 북한지역에 대한 기상학적 가뭄지수의 적용. *한국농공학회논문집*. 50(3): 3-15.
- 류경식, 정구열. 2008. 홍수기 저수지 유입량 예측을 위한 다중회귀모형 개발. *대한토목학회논문집*. 10: 3500-3503.
- 윤용남. 2007. 수문학. 파주: 교문사.
- 이시운. 2017. 기저유량비를 이용한 미계측 유역의 평균 갈수량 산정에 대한 연구. 석사학위논문. 인하대학교.
- 이태희. 2016. 미계측 유역 평균갈수량 산정을 위한 지역회귀모형의 개발. *대한토목학회논문집*. 36(3): 407-416.
- 최승용, 한건연, 김병현. 2012. 실시간 수위예측을 위한 다중선형회귀모형의 비교. *대한토목학회논문집*. 32(1): 9-20.

Received: Nov. 13, 2020 / Revised: Dec. 10, 2020 / Accepted: Dec. 10, 2020

비정상성 기반 SPIt를 이용한 가뭄의 시·공간적 특성 분석

국문초록 기상학적 가뭄지수 분석에 자주 이용되는 SPI지수는 정상성 기반 즉 시계열의 확률적인 성질들이 시간의 흐름에 따라 변하지 않는 정상성 기반으로 분석이 진행된다. 이는 기후변화와 기후변동 같은 시간이 지남에 따라 변화하는 정보를 충분히 반영하기에 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 정상성 가정에 근거한 SPI 지수 산정과는 다른 비정상성(Non-stationarity)을 고려할 수 있는 새로운 빈도분석 방법인 SPIt를 사용하고자 한다. 먼저 일 강수자료를 이용하여 7일 지속기간의 강수 시계열을 구축하였다. 가뭄지속기간은 월단위와 주단위를 기준으로 3개월의 SPI와 SPIt를 계산하고 과거 긴급제한급수지역을 대상으로 각 지수의 재현성을 확인하였다. 또한 전국 기상관측소를 기준으로 SPI지수와 SPIt지수를 산정하고 공간분포도를 작성하여 공간적인 재현성을 확인하였다.

주제어 : 비정상성, SPIt, SPI, 가뭄, 긴급제한급수

Profiles **Se Jin Jeung** : He received his Ph.D. from Kangwon National University in 2019. After receiving his doctorate, he is affiliated with the Kangwon Institute of Inclusive Technology. His major research fields are drought, hydrology, and climate change(climate@kangwon.ac.kr).

Dong ho Kang : He is a Ph.D. student in Kangwon National University. His major research fields are drought, Impact forecast and climate change(kdh@kangwon.ac.kr).

Byung Sik Kim : He received his Ph.D. from Inha University in 2005. he is a professor at the Graduate School of Disaster Prevention at Kangwon National University, which he has lectured since 2011. His research and education fields are disaster management, weather disaster prevention, and hydrology(hydrokbs@kangwon.ac.kr).