



주간위 표준강수증발산지수를 활용한 2014~2015년 북한의 극한 가뭄 평가

Assessment of the Extreme 2014~2015 Drought Events in North Korea Using Weekly Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

남원호* · 홍은미**·† · 최진용*** · 김태곤**** · Michael J. Hayes***** · Mark D. Svoboda*****

Nam, Won-Ho · Hong, Eun-Mi · Choi, Jin-Yong · Kim, Taegon · Michael J. Hayes · Mark D. Svoboda

Abstract

North Korea is one of the high vulnerable countries facing the threat of natural disaster and has experienced more frequent disasters in recent years. These disasters have significantly led to food shortages and large reductions in crop yields. In 2015, both North Korean officials and international agencies had identified the extreme drought event, the worst in one hundred years according to the North Korean government. The objective of this study was an assessment of the extreme drought events in 2014~2015, and to apply climatic drought indices for drought monitoring in North Korea. Characteristics of the extreme drought in North Korea are examined by using the weekly-based Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). The drought characteristics illustrated by the SPEI results are compared with a Standardized Precipitation Index (SPI) results and drought impact information to understand how these indices can explain the drought conditions within the country. These results demonstrated that the SPEI could be an effective tool to provide improved spatial and temporal drought conditions to inform management decisions for drought policy.

Keywords: Drought management, North Korea, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), Standardized Precipitation Index (SPI)

1. 서론

최근 전 지구적인 기상 이변으로 기상재해의 빈도 및 강도가 증가하고 있다(Zhang and Zhou, 2015). 미국에서는 1930년대 대가뭄(Megadrought) 이래 2012년부터 2015년까지 4년간 미국 서부지역인 캘리포니아 지역에서 극심한 가뭄이 지속되었으며, 특히 2014년은 1895년 이후 최저 강수량을 기록하였다(Mann and Gleick, 2015; Mao et al., 2015). 캘리포니아 주정부는 물 사용량의 25% 이상 감축하는 강제 절수

행정명령을 발표하였으며(EXECUTIVE ORDER B-29-15), 캘리포니아 수자원위원회(State Water Resources Control Board)는 강제급수 제한조치를 시행하였다. 우리나라의 경우 2014년의 강원, 경기, 일부 충청지역의 강우량이 평년대비 50~60% 수준으로 생활용수의 제한급수가 시행되었으며, 소양강댐 및 보령댐의 경우 2015년 기록적인 최저수위를 기록하였다(Yu et al., 2016).

북한의 연평균 강수량은 약 970 mm로서 남한의 연평균 강수량인 1,274 mm의 약 70~80% 정도에 불과하며(KEI, 2013), 북한의 과거 재난발생사례를 살펴보면 자연재난 중 풍수해 및 가뭄으로 인한 기상재해의 피해가 대다수를 차지하고 있다(Myeong et al., 2008; Park et al., 2010; Shin and Beak, 2014). 특히, 지난 20년(1991~2010) 동안 북한에서는 태풍, 홍수, 가뭄 등 총 33건의 기상재해가 발생하여 이로 인한 재산손실규모가 세계 9위로 자연재해에 취약한 국가이다(KMA, 2011).

2014~2015년 북한은 100년만의 유례없는 극심한 가뭄을 경험하였으며(Lee et al., 2015), 국내외 언론에서 가뭄으로 심각한 전력난과 식량난을 겪고 있다고 보도되었다. 북한 전력의 60% 이상을 수력발전에 의존하고, 관개를 위한 기반시설이 충분하게 갖춰져 있지 않기 때문에(KREI, 2013), 2012년에는 양강도, 자강도, 함경도 지역에서 농경지 28만 5400 ha, 2015년에는 황해남북도, 평안남도, 함경남도 지역에서

- * Department of Bioresources and Rural Systems Engineering, Hankyong National University, Anseong, Republic of Korea
- ** USDA-ARS Environmental Microbial & Food Safety Laboratory, Beltsville Agricultural Research Center, Beltsville, MD, USA
- *** Department of Rural Systems Engineering and Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea
- **** Institute on the Environment, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA
- ***** National Drought Mitigation Center, School of Natural Resources, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, USA

† Corresponding author

Tel.: +1-301-775-8520 Fax: +1-301-504-6608

E-mail: silbern7@snu.ac.kr

Received: November 23, 2016

Revised: July 18, 2017

Accepted: July 18, 2017

논의 30% 지역에서 가뭄 피해가 반복적으로 발생하고 있다. 국제연합식량농업기구 (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)는 2014년 이후에 지속된 가뭄으로 2015년 북한의 곡물 생산량이 18% 감소하였으며, 특히 가뭄 피해로 쌀 생산량은 전년 생산량 대비 21%로 낮아졌다고 보고하였다 (FAO, 2015). 농업용 저수지 등의 관개시설은 일시적인 한발에 대비하여 필요한 수자원을 확보할 목적으로 건설되는데, 북한은 이러한 기반 시설이 부족하여 수자원을 효과적으로 이용하기 어렵고, 가뭄 발생 시 농업용수는 물론 생활용수까지 부족한 실정이다. 2015년 발생한 가뭄은 2014년부터 갈수가 누적되면서 하천 및 댐의 수자원 가능량의 감소에 기인하며 (Kim et al., 2014), 당해 총 강수량 부족분에 의한 영향보다 누적된 수자원 가능량 부족분에 의해서 영향을 받은 것으로 판단된다. 이와 같은 재난 수준의 가뭄에 효과적으로 대응하기 위해서는 중앙정부 단위에서 가뭄대응에 대한 체계적인 준비가 필요하며, 우선적으로 가뭄 모니터링 및 가뭄 특성에 대한 정량적인 분석이 요구된다 (Wilhite et al., 2000; 2014; Hayes et al., 2004).

과거 북한의 기상, 수문, 통계자료에 관한 자료의 접근 및 품질의 제한성으로 인해 북한의 가뭄 평가 및 피해에 대한 체계적인 분석에 한계가 있었다 (Jang et al., 2007; Ahn and Yoon, 2010; Kim and Yun, 2011). 최근에는 기상청 (Korea Meteorological Administration, KMA)에서 북한의 위험기상과 기후변화로 인한 기상재해 예방을 위해 북한기상연보를 발행하고 있다 (KMA, 1995; 2011). 이를 활용하여 과우일수 (Dry-day Index), 십분위지수 (Deciles of Normal Precipitation, Deciles), Phillips 가뭄지수 (Phillips Drought Index, PDI), 표준강수지수 (Standardized Precipitation Index, SPI), 파머 가뭄심도지수 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)와 같은 다양한 가뭄지수를 북한에 적용하고 기상관측소 지점별 과거 주요 가뭄발생시기 및 가뭄심도를 비교하는 연구가 수행되었다 (Choi et al., 2008; Nam et al., 2008; Yoo et al., 2008; Kang and Moon, 2014). 그러나 북한에 대한 기존 가뭄 평가 연구는 주로 기상학적 가뭄지표를 중심으로 수행되었다.

기상학적 가뭄지표는 강수의 부족만으로 가뭄을 직관적으로 판단할 수 있어 가장 빈번하게 활용되고 있다. 그러나 최근에는 강수 및 기온의 변동성에 따른 공급량 (강수량)과 수요량 (증발산량)을 반영함으로써 가뭄판단에 활용되는 표준강수증발산지수 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI)가 주목을 받고 있다 (Vicente-Serrano et al., 2012; Kingston et al., 2015; Chen and Sun, 2015; Potopova et al., 2016; Zhao et al., 2017). 또한 가뭄 피해의 내재된 복잡성 (complexity)으로 인하여 단일의 가뭄지표가 모든 지역 및 관

련 분야의 가뭄 평가에 이상적이지 않음을 내재하고 있다 (Hayes et al., 2004; Won et al., 2016). 따라서 연구 목적에 따라 적절한 가뭄지표의 민감도 및 정확성을 판단하기 위하여 유사한 가뭄 지표들과의 검토를 통하여 가뭄 평가 및 성능을 검토할 필요가 있다.

본 연구에서는 기존의 월단위 SPEI를 수정한 주단위 SPEI를 활용하였으며, 미국에서 사용되고 있는 가뭄 판단 기준을 적용하고, 35년간 기상자료를 바탕으로 최근 10년간 가뭄지표 변화를 분석함으로써, 2014~2015년 발생한 북한의 극심한 가뭄 사상에 대한 정량적인 가뭄 평가를 수행하고자 하였다. 분석결과는 널리 이용되고 있는 SPI 가뭄 지표와 비교하여 SPEI 가뭄지표의 적용성 및 성능을 분석하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역 및 분석자료

기상청에서는 북한에서 운영 중인 기상관측소 중 자료 수집이 가능한 27개 지점의 기상자료를 WMO (World Meteorological Organization)의 세계기상통신망 (Global Telecommunication System, GTS)을 통해 구독하여 배포하고 있다. 본 연구에서는 북한에서 발생했던 2014년에서 2015년까지 발생한 가뭄의 정량적 평가를 수행하기 위하여, 최근 35년간 (1981~2015

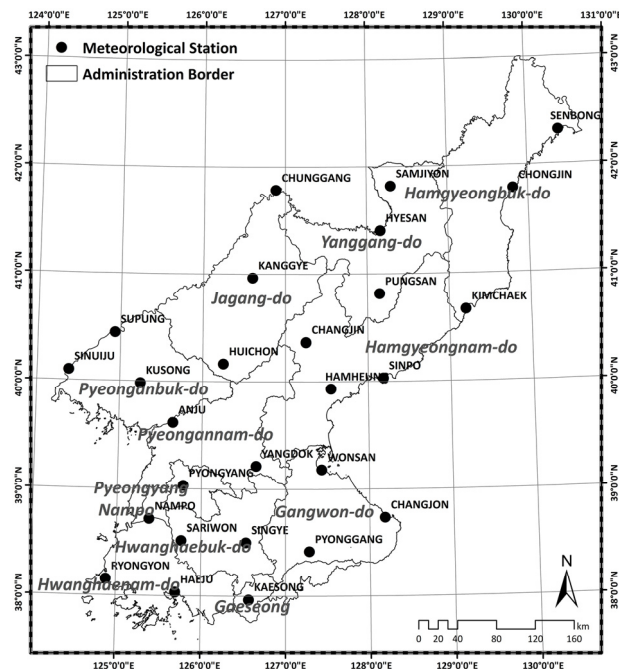


Fig. 1 Spatial distribution of the weather stations in North Korea

년)의 일강수량 및 일평균기온 자료를 수집하였으며, 1 개월 이상 누락 자료가 있는 구성, 김책, 신계, 장진, 평강, 희천 지점의 해당 년도는 분석에서 제외하였으며, 결측치의 보완은 북한기상연보의 일별 평년값을 활용하였다 (KMA, 1995; 2011; Nam et al., 2016). 분석에 사용한 기상관측소 지점의 위치를 Fig. 1과 같이 도시하였다.

2. 주단위 표준강수증발산지수 산정

가뭄 지표 (drought index)는 가뭄의 시공간적인 전개 과정 및 가뭄진행상황을 모니터링하고 가뭄심도의 정량적 평가 및 가뭄대응계획 수립을 위한 도구로서 다양하게 개발되어 활용되고 있다 (Hayes et al., 1999; Heim, 2002; Trnka et al., 2009). 현재 기상청의 종합가뭄정보시스템 (<https://drought.kma.go.kr>)과 한국농어촌공사의 농업가뭄지도의 활용가능성을 위하여 주단위 표준강수증발산지수를 활용하였다.

표준강수증발산지수 (SPEI)는 Vicente-Serrano et al. (2010)이 소개한 모델로 기존의 표준강수지수 (SPI)를 개량한 모델이다. 표준강수지수는 강수 이외의 기온과 관련된 변수를 고려하지 않기 때문에 증발산량의 영향을 해석하지 못하는 단점을 가지고 있었다. 또한 가뭄지수산정을 위한 강수 및 증발산량의 계산 시간 척도를 1 개월부터 3, 6, 9, 12, 24 개월 등과 같이 다양하게 설정함으로써 시간척도별 (지속시간별)로 단기가뭄 및 장기가뭄을 동시에 평가할 수 있는 SPI의 장점을 그대로 계승하였다 (Begueria et al., 2014; Nam et al., 2015a). 이와 같은 특징을 바탕으로 전 세계적으로 가뭄심도의 정량적 평가를 위한 가뭄 모니터링의 주요 가뭄판단정보로 활용하고 있다 (Hayes et al., 2012; Brazdil et al., 2015).

SPEI는 강수량과 잠재증발산량의 차가 유출 및 지하수와 토양수분에 따른 수분 저장의 합과 같아지는 물수지 (Water Balance)를 기본 구조로 설계되었다. 잠재증발산량 (Potential Evapotranspiration, PET)은 식 (1)과 같이 Thornthwaite 산정식 (Thornthwaite, 1948)을 사용한다.

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

여기서, PET는 잠재증발산량 (mm), T는 평균기온 (°C), I는 열지수 (heat index), K는 위도 (latitude)와 주 (week)의 함수로 산정하는 계수, m은 주단위이다.

식 (2)와 같이 강수량 (P_i)과 잠재증발산량 (PET_i)의 차로 산정되는 D_i 는 각각 다른 시간척도 (time scales)에 따라 합성되며, 식 (3)으로부터 합성된 D_i 의 누적 값의 시계열 자료로부터 적정확률분포로 선정된 Log-logistic 분포를 이용하여 매개변수를 추정한 후, 표준정규분포로 변환하여 가뭄지수를 산정한다 (Vicente-Serrano et al., 2010; Stagge et al., 2015).

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

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

식에서 k는 합성 시간척도, n은 계산에 이용된 주 (week) 단위이다.

3. 가뭄분류체계

미국의 국립가뭄경감센터 (National Drought Mitigation Center, NDMC)는 다양한 가뭄지수를 통합하여 미국 전역의 가뭄진행상황을 모니터링하고 그 결과를 가뭄 지도와 다양한 대안을 제시할 수 있는 가뭄영향보고 시스템 (Drought Impact Reporter, DIR)를 개발하여 운영하고 있다 (Wilhite et al., 2007). 또한 미국 전역에 대하여 가뭄단계를 표시한 지도 (U.S. Drought Monitor map)를 매주 생성하여 홈페이지를 통하여 제공하고 있다 (<http://droughtmonitor.unl.edu/>). 미국 전역의 가뭄 상황을 총 5 단계의 가뭄 심도 (drought severity)로 구분하고 있으며 (Hayes et al., 1999; Botterill and Hayes, 2012; Nam et al., 2014; Svoboda et al., 2015), SPEI의 가뭄 심도를 정의하기 위하여 Table 1에 정리한 바와 같이 SPI와 동일한 가뭄분류체계를 사용하였다 (Svoboda et al., 2002; Nam et al., 2015b). 가뭄분류의 기준으로 5 단계의 가뭄수준으로 등

Table 1 Drought severity classification of SPI and SPEI (Svoboda et al., 2002)

Category	Description	Percentiles	SPI value	SPEI value
D0	Abnormally Dry	21-30%	-0.5 to -0.7	-0.5 to -0.7
D1	Moderate Drought	11-20%	-0.8 to -1.2	-0.8 to -1.2
D2	Severe Drought	6-10%	-1.3 to -1.5	-1.3 to -1.5
D3	Extreme Drought	3-5%	-1.6 to -1.9	-1.6 to -1.9
D4	Exceptional Drought	0-2%	-2.0 or less	-2.0 or less

급을 구분하였으며 SPEI 값이 낮을수록 가뭄 상태가 심한 것을 의미한다. 가뭄 정도는 ‘정상 상태 (none)’부터 최악의 가뭄상태를 의미하는 ‘이례적인 가뭄상태 (exceptional, D4)’의 6 단계로 구분하고, 정상상태를 제외한 5 단계의 가뭄단계로 구분하여 표시한다.

III. 적용 및 고찰

1. 강수량 분석

가뭄에 가장 큰 영향을 미치는 강수량을 살펴보기 위하여

2014 년 하반기 (2014 년 9 월부터 12 월까지), 2015 년 상반기 (2015 년 1 월부터 5 월까지)의 북한의 27 개 기상관측지점의 누적강수량을 Table 2와 같이 정리하였다. 2014 년 하반기 평년 누적강수량은 103.6 mm로 평년 (1981~2010 년) 누적강수량 199.6 mm의 52 % 수준이었으며, 2015 년 상반기 평년 누적강수량은 145.0 mm로 평년 누적강수량 177.4 mm의 82 %로 나타났다. 강수량을 기준으로 가뭄을 평가하면, 적은 강수량으로 2014 년에 가뭄이 심각하였을 것으로 판단된다. 반면 2015 년에도 가뭄이 발생하였지만, 2014 년에 비하여 강수량이 상대적으로 많았기 때문에 수자원 여건이 완화되었을 것으로 추정할 수 있다. 이 같은 분석은 기상학적 가뭄평가

Table 2 Summary of total precipitation from September to December in 2014 and from January to May in 2015 for North Korea

Station Name	September to December in 2014			January to May in 2015		
	Normal (average 30-years, 1981~2010) (mm)	Total precipitation in 2014 (mm)	Comparison to the normal, ratio (%)	Normal (average 30-years, 1981~2010) (mm)	Total precipitation in 2015 (mm)	Comparison to the normal, ratio (%)
SENBONG	140,9	162,2	1,15	152,7	162,2	1,06
SAMJIYON	187,1	99,5	0,53	223,0	161,9	0,73
CHONGJIN	137,7	52,5	0,38	141,0	99,3	0,70
CHUNGGANG	141,1	121,8	0,86	130,9	124,9	0,95
HYESAN	111,1	36,3	0,33	123,0	108,7	0,88
KANGGYE	162,7	112,8	0,69	170,9	170,7	1,00
PUNGSAN	122,0	23,3	0,19	125,4	71,5	0,57
KIMCHAEK	178,2	60	0,34	143,5	174,6	1,22
SUPUNG	185,9	160,9	0,87	174,3	148,5	0,85
CHANGJIN	143,7	53,2	0,37	141,9	116,7	0,82
SINUJU	196,0	192,1	0,98	185,9	177,6	0,96
KUSONG	201,4	129,8	0,64	196,1	174,8	0,89
HUICHON	214,0	89,5	0,42	177,7	180,2	1,01
HAMHEUNG	204,8	61,5	0,30	167,1	119,7	0,72
SINPO	163,5	56,9	0,35	144,6	125,1	0,87
ANJU	188,2	78,7	0,42	171,4	141,8	0,83
YANGDOK	196,0	84,9	0,43	181,3	225,8	1,25
WONSAN	386,3	147,5	0,38	252,2	107,7	0,43
PYONGYANG	198,7	70,7	0,36	173,8	152,5	0,88
NAMPO	173,2	68,8	0,40	147,1	157,8	1,07
CHANGJON	485,3	309,4	0,64	313,8	119,1	0,38
SARIWON	191,6	83	0,43	167,9	83,3	0,50
SINGYE	209,2	76,9	0,37	202,3	220,8	1,09
RYONGYON	188,7	86,2	0,46	157,9	151,2	0,96
HAEJU	207,3	138,5	0,67	199,0	152,9	0,77
KAESONG	231,5	108,7	0,47	209,6	78,8	0,38
PYONGGANG	242,4	130,3	0,54	214,9	204,5	0,95

의 접근방식으로 본 연구에서 수행한 가뭄평가 지표 중 하나인 SPEI 분석결과와 다소 상이하다.

측후소별로 살펴보면, 2014 년 하반기의 경우 선봉, 중강, 수풍, 신의주 등 4 개 관측소만 평년강수량과 유사하였을 뿐, 나머지 23 개 지역은 평년 수준에 미치지 못하였다. 특히 풍산, 함흥, 신포, 원산, 장전 등 함경남도, 강원도로 이어지는 동해안 지역은 평년 누적강수량의 약 31 %에 불과하였다. 2015 년 상반기의 경우 풍산, 원산, 장전, 사리원, 개성 지점에서 평년대비 약 45 % 이하의 누적강수량을 나타냈다. 북한 가뭄의 특성을 파악하기 위하여 2014 년 하반기와 2015 년 상반기 모두 평년대비 누적강수량이 적었던 관측소 중 2014 년 하반기 누적강수량의 절대량이 가장 적었던 1 개 지점(풍산)과 2015 년 상반기 누적강수량의 절대량이 50 % 이하였던 지역(원산, 장전, 사리원)을 선정하여 지역별 가뭄평가를 실시하였다. 선정된 지점의 특징을 살펴보면, 2014 년부터 강수량의 지속적인 부족이 발생하였으며, 누적된 가뭄으로 인하여 2014~2015 년에 걸쳐 연속적인 극심한 가뭄이 발생했을 것으로 추정할 수 있다.

2. 주단위 SPEI를 이용한 지역별 가뭄 분석

2014~2015 년의 북한의 가뭄기간동안 연속적인 강수량 부족이 발생한 풍산, 원산, 장전, 사리원 지역의 주단위 SPEI

가뭄지수 값을 분석함으로써 해당 기간의 가뭄을 정량적으로 분석하였다. 분석대상인 4 개 지점에 대하여 35 년간의 기상 자료를 이용하여 3, 6, 12 개월 시간척도(각각 13, 26, 52 주 시간척도)의 SPEI(이하 3, 6, 12 개월 SPEI)를 계산하였으며, 분석 결과 중 최근 10 년간(2006~2015 년) 변화를 Fig. 2와 같이 도시하였다.

모든 시간 척도와 대상 지역에서 2014 년 하반기에서 2015 년 상반기로 이어지는 극심한 가뭄 상태에 대응하는 결과를 보여주었다. 대부분의 결과에서 해당 기간의 가뭄지수는 다른 기간에 비하여 심도가 크고, 지속기간이 길어 가뭄피해가 컸던 현실을 잘 반영하는 것으로 판단된다. 2015 년 하반기에 이르러 강수량이 평년 수준이상으로 회복되면서 가뭄 해갈이 이루어진 것 역시 확인할 수 있다.

3 개월 SPEI의 경우 강우 사상에 따라 가뭄 지표의 변화가 심하게 나타났으며, 이는 가뭄상황을 가장 빠르게 반영하지만, 집중 강수로 인한 가뭄의 회복 또한 빠르게 반영하는 것으로 판단된다. 특히 풍산, 장전, 사리원 지점에서 2015 년 하반기 집중 강우로 가뭄 지표가 회복되었지만 원산 지점의 경우 극심한 가뭄이 지속되었다. 2014~2015 년에 발생한 가뭄의 지속기간은 2014 년 상반기부터 2015 년 하반기까지 풍산 지역 66 주(weeks), 장전 65 주, 사리원 65 주로 나타났으며, 2015 년 하반기에도 가뭄이 지속된 원산 지역의 경우 86 주로

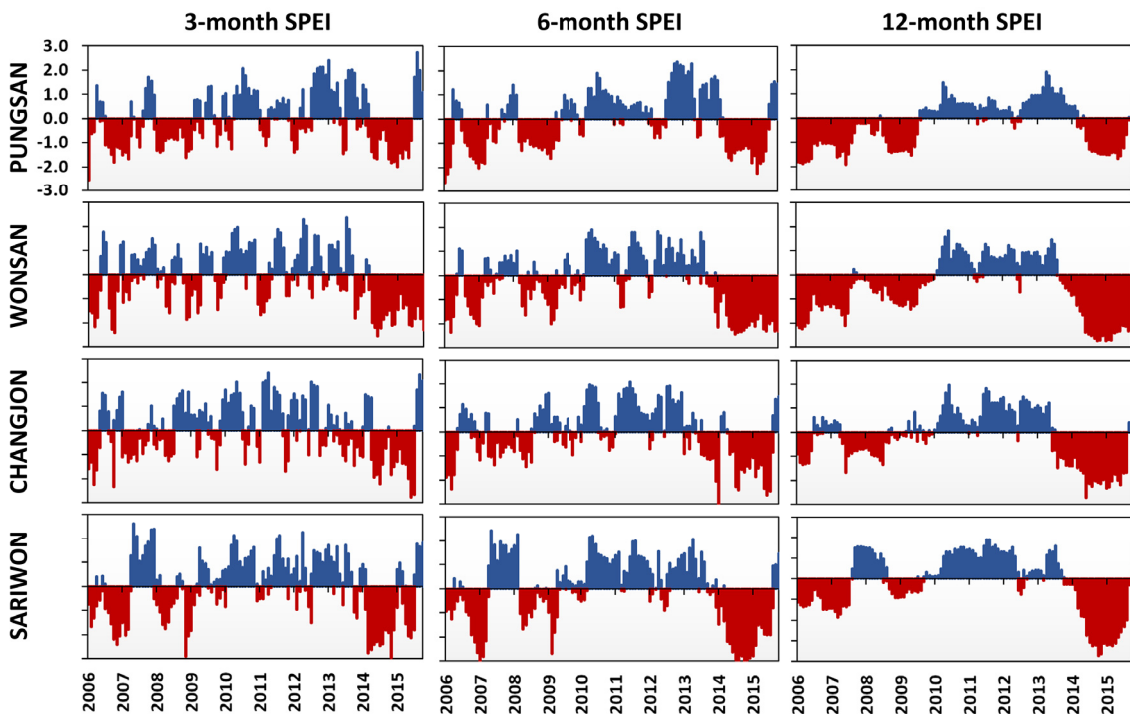


Fig. 2 Time series of the SPEI (3-month, 6-month, and 12-month) using historical data (2006~2015) for four weather stations in North Korea

분석되었다.

6 개월 SPEI의 경우 2014~2015 년에 발생한 가뭄 사상의 가뭄 발생 시점 및 가뭄 지속기간 등의 요소들은 3 개월의 SPEI의 결과와 비교하여 유사한 결과를 나타냈지만, 장기간 시간 척도의 누적 강우량을 사용하기 때문에 가뭄 사상 개수 및 가뭄 심도에 차이가 발생하였다. 특히, 2014~2015 년에 발생한 극심한 가뭄 사상의 경우 장기간 무강우로 인한 가뭄 심도 평가에 효과적으로 반영된 것으로 판단된다.

12 개월 SPEI의 가뭄단계의 변화를 살펴보면, 2014 년 상반기로부터 2015 년까지 SPEI의 가뭄심도 -1.6 이하의 D3 (Extreme Drought) 단계가 발생하였으며, 특히 원산과 사리원 지역에서는 가뭄심도 -2.0 이하의 D4 (Exceptional Drought) 단계가 나타났다. 2015 년 하반기 (2015 년 7 월부터 10 월까지)에 발생한 강우로 인하여 원산을 제외한 지역 (원산의 경우 동일시기의 27 개 관측소의 평균누적강수량의 38 %)에서 가뭄 단계의 회복이 나타났으며, 모든 시간척도의 SPEI에서 2014~2015 년 연속적으로 발생한 북한의 가뭄사상을 반영한 것으로 판단된다.

3. 가뭄분류체계를 이용한 북한 전역의 가뭄평가

북한 전역의 가뭄을 평가하기 위하여 가뭄분류체계에 따른 북한 27 개 관측소의 가뭄단계에 따른 비율을 Fig. 3과 같이 도시하였다. 최근 10 년간 (2006~2015 년)의 3, 6, 12, 24 개월 주단위 SPEI 결과를 추출하여 정리하였다.

12 개월 SPEI에 따른 2006~2007 년 발생한 가뭄사상의 경우, 2006 년 10 월부터 2007 년 7 월까지 평균적으로 전체 27 개 지역 중 51 % 지역에서 D2 단계가 발생하였으며, D3 단계의 경우 31 %, D4 단계의 경우 12 % 지역에서 가뭄이 발생한 것으로 나타났다. 이 결과는 SC-PDSI의 분석 결과 (Kang and Moon, 2014)와 유사한 결과를 도출하였다. 반면 동일한 SPEI에 따른 2014~2015 년 발생한 가뭄사상의 경우, 2014 년 6 월부터 2015 년 8 월까지 78 % 지역에서 D2 단계가 발생하였으며, D3 단계의 경우 65 %, D4 단계의 경우 42 % 지역에서 가뭄이 발생한 것으로 나타났다.

2014 년 6 월부터 2015 년 8 월까지 3 개월 SPEI의 경우, 평균적으로 30 % 지역에서 D2 단계가 발생하였으며, D3 단계의 경우 19 %, D4 단계의 경우 7 % 지역에서 가뭄이 발생하였다. 6 개월 SPEI의 경우, 52 % 지역에서 D2 단계가 발생하

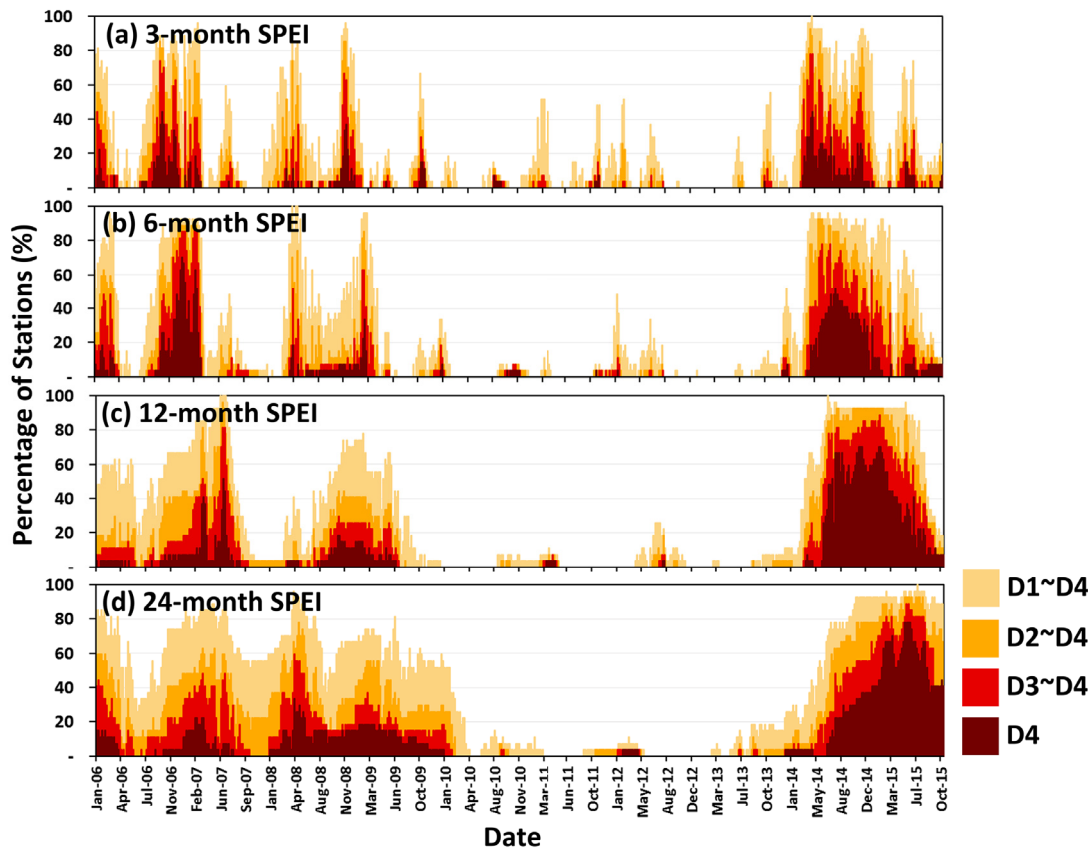


Fig. 3 Percentage of stations in categories of drought as determined by the weekly SPEI

였으며, D3 단계의 경우 37 %, D4 단계의 경우 20 % 지역에서 가뭄이 발생하였다. 24 개월 SPEI의 경우, 12 개월 SPEI와 비교하여 각 가뭄단계별 발생 시기는 차이가 발생하였지만, 동일기간에서 71 % 지역에서 D2 단계가 발생하였으며, D3 단계의 경우 57 %, D4 단계의 경우 41 % 지역에서 가뭄이 발생한 것으로 나타나 12 개월 SPEI와 유사한 결과를 도출하였다.

2014~2015 년 연속적으로 발생한 가뭄사상의 경우, SPEI의 시간척도에 따라 가뭄기간 및 강도가 상이하게 발생하였지만, 공통적으로 다른 기간에 비해서 가뭄기간이 길고, 강도가 강한 것을 확인할 수 있다. 특히 12, 24 개월 SPEI 분석 결과 40 % 이상의 지역에서 D4 단계가 발생하여 북한 대부분의 지역에서 장기간의 극심한 가뭄을 겪었던 것으로 분석할 수 있다.

4. 표준강수지수와 비교

SPEI 가뭄지수의 효용성을 살펴보기 위하여, 많은 연구에서 이용하고 있는 대표적인 기상학적 가뭄지수인 SPI와 비교하였다. 앞서 Fig. 2에서 산정했던 동일한 4 개 지역의 최근 10 년간 (2006~2015 년)의 3, 6, 12 개월 시간척도의 SPI의 시계열 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

3 개월 SPI의 경우 SPEI와 비교하여 가뭄 사상 개수 및 가뭄 지속기간, 가뭄 회복 시기 등이 유사한 것으로 분석되었다. 이는 강수량만을 반영하는 SPI의 경우 강수량 발생에 따라 가

뭄의 회복이나 습윤기에서 가뭄으로 변환하는 기간이 짧은 것을 알 수 있으며, 이는 강우에 의한 지수의 변동이 크게 반영됨을 대변한다.

6 개월 SPI의 경우 2014~2015 년에 발생한 가뭄의 지속기간은 2014 년 상반기부터 2015 년 하반기까지 SPEI (괄호)와 비교하여 풍산 지역 52 주 (73 주), 장전 57 주 (67 주), 사리원 62 주 (87 주)로 나타났으며, 2015 년 하반기에도 가뭄이 지속된 원산 지역의 경우 98 주 (111 주)로 분석되었다. 12 개월 SPI의 경우 가뭄 심도 분석 결과, 원산 지역을 제외한 풍산, 장전, 사리원 지역에서 SPEI와 비교하여 D3, D4 단계가 발생하지 않았으며, 2014~2015 년 SPI의 분석 결과, 모든 시간척도에서 SPEI의 결과와 비교하여 상대적으로 작은 값을 나타냈다. 이는 매우 극심했던 북한 가뭄상황을 고려하였을 때, SPI 분석 결과가 가뭄을 과소평가한 것으로 사료된다. 앞서 강수량 분석에서 2015 년 상반기에는 평년 대비 82 %의 누적강수량을 확보함으로써 여전히 갈수 상황이긴 하지만 심각한 상황으로 분석되지 않은 것으로 생각된다. 반면 SPEI의 경우 강수량 및 기온에 따른 증발산량의 누적 확률빈도 값을 반영하므로 다소 많은 양의 강우가 내리더라도 가뭄해갈을 충분히 시켜주지 못하는 경우 (2015 년 상반기 풍산 및 사리원 지역의 12 개월 SPEI의 경우)에는 가뭄상태가 지속되었고, 강수에 의한 가뭄의 회복이 느리게 나타나게 된다.

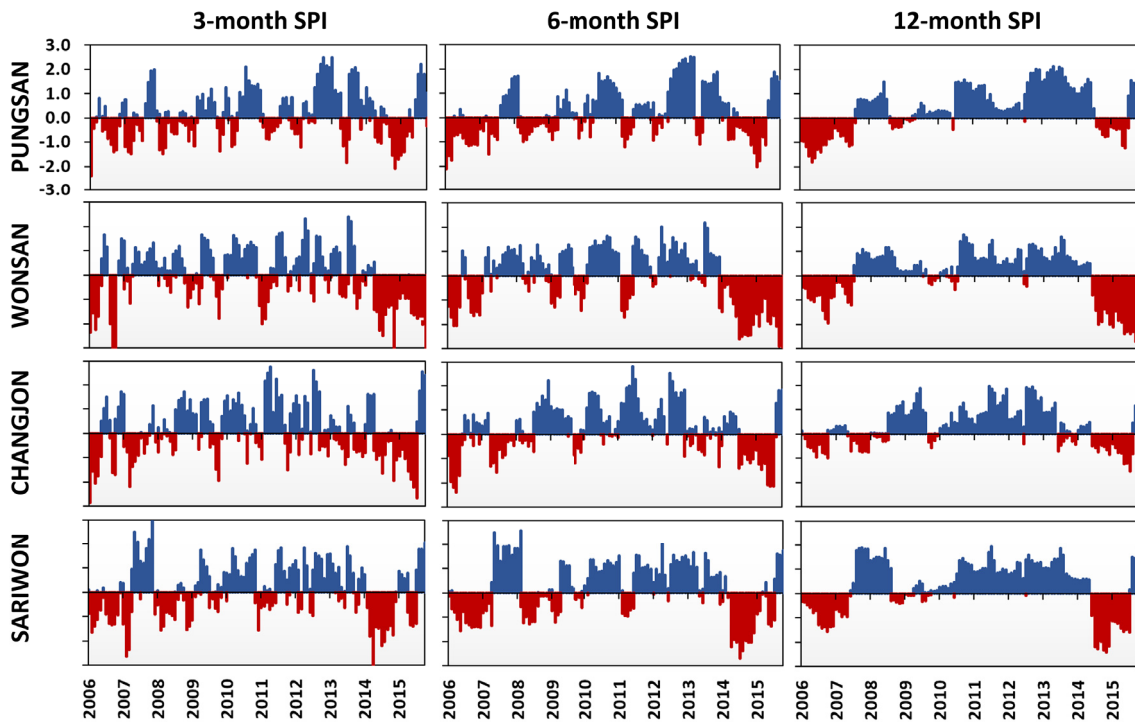


Fig. 4 Time series of the SPI (3-month, 6-month, and 12-month) using historical data (2006~2015) for four weather stations in North Korea

IV. 결 론

본 연구에서는 2014~2015 년 발생한 북한의 극심한 가뭄을 정량적으로 평가하기 위하여 27 개 지점에 대하여 35 년간의 기상자료를 수집하여 표준강수증발산지수(SPEI)를 적용하여 가뭄을 평가하였다.

2014 년 하반기 북한 전역의 평년 누적강수량은 평년(1981~2010 년) 누적강수량의 52 %에 불과하였으며, 2015 년 상반기의 경우 전국적으로는 평년 대비 누적강수량이 82 %로 다소 개선되었으나, 풍산, 원산, 장전, 사리원 지점에서 2015 년 상반기에도 평년대비 약 45 % 이하의 누적강수량을 나타내었다.

북한 전역의 가뭄상태를 평가하기 위하여 SPEI 분석 결과를 가뭄분류체계에 따라 정리하였다. 모든 시간척도의 SPEI의 가뭄단계에서 D3 (Extreme Drought), D4 (Exceptional Drought) 단계가 나타났으며, 2014~2015 년 연속적으로 발생한 북한의 가뭄사상을 잘 반영한 것으로 판단된다. SPEI의 시간척도에 따라 가뭄 기간 및 강도가 다소 상이하였지만, 다른 기간에 비해서 기간이 길고 강도가 강하며, 북한 대부분의 지역에서 D3, D4에 해당하는 가뭄상태를 보이고 있어 국가적 재난 상황이었음을 유추할 수 있다. SPEI 분석 결과 2014~2015 년 가뭄이 가뭄심도가 크고, 가뭄 지속시간이 긴 것으로 분석되어, 최근 10 년 내에 가장 심각했던 가뭄으로 평가되었다.

평가결과의 적용성을 평가하기 위하여 많은 연구에서 사용하고 있는 기상학적 가뭄지표인 표준강수지수(SPI)의 분석 결과와 비교하였다. 2014~2015 년에 발생한 가뭄에 대하여 SPI는 과소평가하는 경향이 있는 것으로 판단되었다. 반면 SPEI는 강수량 및 기온에 따른 증발산량의 누적 확률빈도 값을 반영하므로 다소 많은 양의 강우가 내리더라도 가뭄해갈을 충분히 시켜주지 못하는 경우에는 가뭄상태가 지속되는 것으로 평가하여 해당 기간 동안 발생한 가뭄상황을 더 잘 설명하는 것으로 사료된다.

최근에는 단일의 가뭄지수에 의존하기 보다는 여러 가뭄지수 간의 특징을 고려함으로써 각 가뭄지수가 갖는 장단점을 상호 보완하여 사용하기를 권고하고 있다. SPEI는 증발산량을 고려한 가뭄지수로서 향후 북한의 정량적인 가뭄사상의 시계열 변화 및 가뭄 모니터링을 위한 주요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 향후 연구로써 본 연구에서는 일부 가뭄사례를 통해 SPEI의 가뭄단계를 제시하였지만, 북한 가뭄 대응을 위한 기준으로 포괄적인 적용을 위해서는 장기적으로 축적된 자료를 활용하여 SPEI 가뭄단계의 설정에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

사 사

본 연구는 한경대학교 2016년도 학술연구조성비의 지원에 의한 것임.

REFERENCES

1. Ahn, J. H. and Y. N. Yoon, 2010. Status of water resources and water supply and demand in North Korea (I). *Magazine of the Korea Water Resources Association* 43(4): 17-26 (in Korean).
2. Begueria, S., S. M. Vicente-Serrano, F. Reig, and B. Latorre, 2014. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) revisited: Parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International journal of Climatology* 34: 3001-3023.
3. Botterill, L. C. and M. J. Hayes, 2012. Drought triggers and declarations: Science and policy considerations for drought risk management. *Natural Hazards* 64: 139-151.
4. Brazdil, R., M. Trnka, J. Miksovsky, L. Reznickova, and P. Dobrovolny, 2015. Spring-summer droughts in the Czech Land in 1805-2012 and their forcings. *International Journal of Climatology* 35: 1405-1421.
5. Chen, H. and J. Sun, 2015. Changes in drought characteristics over China using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 28: 5430-5447.
6. Choi, J. Y., J. J. Lee, and M. W. Jang, 2008. *Analysis and mapping of the drought characteristics in North Korea*. Seoul National University Press, Seoul, Korea (in Korean).
7. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2015. *Global Information and Early Warning System, GIEWS Update: The Democratic People's Republic of Korea - Prolonged dry spell raises serious concerns for 2015 food crop production*. June 17, 2015, FAO.
8. Hayes, M. J., M. D. Svoboda, D. A. Wilhite, and O. V. Vanyarkho, 1999. Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 80: 429-438.
9. Hayes, M. J., O. V. Wilhelmi, and C. L. Knutson, 2004. Reducing drought risk: Bridging theory and practice. *Natural Hazards Review* 5(2): 106-113.
10. Hayes, M. J., M. D. Svoboda, B. D. Wardlow, M. C. Anderson, and F. Kogan, 2012. *Drought monitoring: historical and current perspectives*. In: *Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches*, B. Wardlow, M. Anderson, and J. Verdin, eds., CRC Press.
11. Heim, R. R., 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American*

- Meteorological Society* 83: 1149-1165.
12. Jang, M. W., S. H. Yoo, and J. Y. Choi, 2007. Analysis of spring drought using NOAA/AVHRR NDVI for North Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 49(6): 21-33 (in Korean).
 13. Kang, S. U. and J. W. Moon, 2014. Drought analysis using SC-PDSI and derivation of drought severity-duration-frequency curves in North Korea. *Journal of the Korean Water Resources Association* 47(9): 813-824 (in Korean).
 14. Kim, D. J. and J. I. Yun, 2011. Estimation of monthly precipitation in North Korea using PRISM and digital elevation model. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 13(1): 35-40 (in Korean).
 15. Kim, K. H., S. H. Lee, and J. Y. Choi, 2014. An analysis of agricultural infrastructure status of North Korea using satellite imagery. *Korea National Committee on Irrigation and Drainage* 21(1): 45-54 (in Korean).
 16. Kingston, D. G., J. H. Stagge, L. M. Tallaksen, and D. M. Hannah, 2015. European-scale drought: understanding connections between atmospheric circulation and meteorological drought indices. *Journal of Climate* 28: 505-516.
 17. Korea Environment Institute (KEI), 2013. *A study on constructing a cooperative system for South and North Korea to counteract climate change on the Korean Peninsula III*. Korea Environment Institute, Seoul, Korea (in Korean).
 18. Korea Meteorological Administration (KMA), 1995. *20 years report of meteorological observations in North Korea*. Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea (in Korean).
 19. Korea Meteorological Administration (KMA), 2011. *30 years report of meteorological observations in North Korea*. Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea (in Korean).
 20. Korea Rural Economic Institute (KREI), 2013. *KREI quarterly agricultural trends in North Korea (Vol. 14, No. 2)*. Korea Rural Economic Institute, Seoul, Korea (in Korean).
 21. Lee, B. R., S. B. Oh, and H. R. Byun, 2015. The characteristics of drought occurrence in North Korea and its comparison with drought in South Korea. *Theoretical and Applied Climatology* 121: 199-209.
 22. Mann, M. E. and P. H. Gleick, 2015. Climate change and California drought in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112(13): 3858-3859.
 23. Mao, Y., B. Nijssen, and D. P. Lettenmaier, 2015. Is climate change implicated in the 2013-2014 California drought? a hydrologic perspective. *Geophysical Research Letters* 42: 2805-2813.
 24. Myeong, S. J., H. J. Hong, H. I. Choi, and J. C. Jeong, 2008. *Estimation of flood vulnerable areas in North Korea and collaboration strategies between South Korea and North Korea*. Korea Environment Institute, Seoul, Korea (in Korean).
 25. 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 (in Korean).
 26. Nam, W. H., M. J. Hayes, D. A. Wilhite, T. Tadesse, M. D. Svoboda, and C. L. Knutson, 2014. Drought management and policy based on risk assessment in the context of climate change. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(2): 2-15 (in Korean).
 27. Nam, W. H., M. J. Hayes, D. A. Wilhite, and M. D. Svoboda, 2015a. 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* 57(1): 37-45 (in Korean).
 28. Nam, W. H., M. J. Hayes, M. D. Svoboda, T. Tadesse, and D. A. Wilhite, 2015b. Drought hazard assessment in the context of climate change for South Korea. *Agricultural Water Management* 160: 106-117.
 29. Nam, W. H., E. M. Hong, and G. A. Baigorria, 2016. How climate change has affected the spatio-temporal patterns of precipitation and temperature at various time scales in North Korea. *International Journal of Climatology* 36: 722-734.
 30. Park, S. Y., B. J. Kim, and S. H. Ahn, 2010. Characteristics of natural disaster in North Korea. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 10(3): 21-29 (in Korean).
 31. Potopova, V., C. Boroneant, B. Boincean, and J. Soukup, 2016. Impact of agricultural drought on main crop yields in the Republic of Moldova. *International Journal of Climatology* 36: 2063-2082.
 32. Shin, H. J. and M. H. Beak, 2014. A preliminary study on the responses of South Korea according to the occurrence of disasters in North Korea. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation* 14(5): 165-171 (in Korean).
 33. Stagge, J. H., L. M. Tallaksen, L. Gudmundsson, A. F. Van Loon, and K. Stahl, 2015. Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology* 35: 4027-4040.
 34. Svoboda, M., D. LeComte, M. Hayes, R. Heim, K. Gleason, J. Angel, B. Rippey, R. Tinker, M. Palecki, D. Stooksbury, D. Miskus, and S. Stephens, 2002. The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(8): 1181-1190.
 35. Svoboda, M. D., B. A. Fuchs, C. C. Poulsen, and J. R. Nothwehr, 2015. The drought risk atlas: Enhancing decision support for drought risk management in the United States. *Journal of Hydrology* 526: 274-286.
 36. Thornthwaite, C. W., 1948. An approach toward a rational

- classification of climate. *Geographical Review* 38(1): 55-94.
37. Trnka, M., M. Dubrovsky, M. Svoboda, D. Semerádova, M. Hayes, Z. Zalud, and D. Wilhite, 2009. Developing a regional drought climatology for the Czech Republic. *International Journal of Climatology* 29: 863-883.
 38. Vicente-Serrano, S. M., S. Begueria, and J. I. Lopez-Moreno, 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate* 23: 1696-1718.
 39. Vicente-Serrano, S. M., S. Begueria, J. Lorenzo-Lacruz, J. J. Camarero, J. I. Lopez-Moreno, C. Azorin-Molina, J. Revuelto, E. Moran-Tejeda, and A. Sanchez-Lorenzo, 2012. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. *Earth Interactions* 16: 1-27.
 40. Wilhite, D. A., M. J. Hayes, C. Knutson, and K. H. Smith, 2000. Planning for drought: Moving from crisis to risk management. *Journal of the American Water Resources Association* 36(4): 697-710.
 41. Wilhite, D. A., M. D. Svoboda, and M. J. Hayes, 2007. Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resources Management* 21: 763-774.
 42. Wilhite, D. A., M. V. K. Sivakumar, and R. Pulwarty, 2014. Managing drought risk in a changing climate: The role of national drought policy. *Weather and Climate Extremes* 3: 4-13.
 43. Won, K. J., E. S. Chung, B. R. Lee, and J. H. Sung, 2016. Characteristics of the Han River basin drought using SPEI and RDI. *Journal of the Korean Water Resources Association* 49(3): 187-196 (in Korean).
 44. Yoo, S. H., W. H. Nam, M. W. Jang, and J. Y. Choi, 2008. Assessment and classification of meteorological drought severity in North Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 50(4): 3-15 (in Korean).
 45. Yu, J. S., J. Y. Yoo, J. H. Lee, and T. W. Kim, 2016. Estimation of drought risk through the bivariate drought frequency analysis using copula functions. *Journal of the Korean Water Resources Association* 49(3): 217-225 (in Korean).
 46. Zhang, L. and T. Zhou, 2015. Drought over East Asia: a review. *Journal of Climate* 28: 3375-3399.
 47. Zhao, M., G. A. I. Velicogna, and J. S. Kimball, 2017. A global gridded dataset of GRACE drought severity index for 2002-2014: comparison with PDSI and SPEI and a case study of the Australia Millennium drought. *Journal of Hydrometeorology* (In press).