

SC-PDSI를 이용한 북한지역 가뭄분석 및 가뭄심도-지속기간- 생기빈도 곡선의 유도

Drought Analysis using SC-PDSI and Derivation of Drought Severity-Duration-Frequency Curves in North Korea

강 신 옥* / 문 장 원**

Kang, Shin Uk / Moon, Jang Won

Abstract

In this study, drought of North Korea are analyzed using drought index. 27 weather stations are selected and monthly precipitation and average temperature data are collected for drought analysis. SC-PDSI is used for drought analysis and calculated using collected weather data during 1984~2013 (30 years) in 27 weather stations. From the analysis result of historical drought event using drought index, it is confirmed that severe droughts occurred in the early and mid 2000's at most stations. Secondly, drought frequency analysis was carried out for the derivation of drought severity-duration-frequency (SDF) curves to enable quantitative evaluations of past historical droughts having been occurred in 6 stations (Pyeongyang, Hamheung, Cheongjin, Wonsan, Haeju, Sinuiju). This study can suggest return periods for historical major drought events by using derived SDF curves for each station. In the result, drought events in the early and mid 2000's had return periods of 20~50 years.

keywords : SC-PDSI, drought index, SDF curve, drought, North Korea

요 지

본 연구에서는 가뭄지수를 이용하여 북한지역의 가뭄분석을 수행하였다. 분석 대상지점으로는 평양 등 27개 지점을 선정하였으며, 월 강수량 및 평균기온 자료를 수집하여 분석에 이용하였다. 가뭄분석을 위한 가뭄지수로는 SC-PDSI를 이용하였으며, 27개 지점별로 1984~2013년(30년)의 월 단위 가뭄지수를 산정하였다. 가뭄지수를 이용하여 과거 가뭄에 대해 검토한 결과, 대부분의 지점에서 2000년대 초반과 중반에 심각한 가뭄이 발생하였음을 확인할 수 있었다. 북한의 과거 가뭄사상에 대한 정량적 평가를 위해 6개 지점(평양, 함흥, 청진, 원산, 해주, 신의주)을 대상으로 지속기간별 최대 가뭄심도 자료계열을 구성하였으며, 빈도분석을 통해 지점별 가뭄심도-지속기간-재현기간(Severity-Duration-Frequency, SDF) 곡선을 유도하였다. 6개 지점의 과거 주요 가뭄사상을 추출한 후 SDF 곡선을 이용하여 각 사상별 재현기간을 추정 한 결과, 2000년대 초반과 중반에 발생했던 가뭄은 최대 20~50년의 재현기간을 갖는 가뭄사상인 것으로 나타났다.

핵심용어 : SC-PDSI, 가뭄지수, SDF 곡선, 가뭄, 북한

* 한국수자원공사 K-water연구원 수자원연구소 책임연구원 (e-mail: sukang@kwater.or.kr)
Principal Researcher, Korea Water Resources Corporation (K-water), Daejeon 306-711, Korea

** 교신저자, 한국건설기술연구원 수자원환경연구본부 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: jwmoon@kict.re.kr, Tel: 82-31-910-0591)
Corresponding Author, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Gyeonggi-do 411-712, Korea

1. 서 론

가뭄은 홍수와 함께 물로 인해 발생하는 대표적인 자연 재해이며, 비정상적인 수분 부족 현상이 지속되어 나타나게 되는 수문학적 현상이다. 가뭄에 효과적으로 대처하기 위해서는 가뭄과 관련된 다양한 기상 및 수문인자들에 대한 지속적인 모니터링을 수행함으로써 가뭄의 시작을 파악할 수 있는 체계를 갖추는 것이 매우 중요하다(Moon and Lee, 2012). 가뭄의 모니터링은 일반적으로 강수량, 토양수분, 하천유량, 댐 저수량, 지하수위 등 여러 가지 수문기상학적 인자를 이용하여 산정된 가뭄지수를 이용하고 있다. 가뭄지수는 가뭄의 정도와 진행과정을 정량적으로 나타낼 수 있도록 개발된 지표라 할 수 있으며, 국내외에서 다양한 가뭄지수가 개발되어 가뭄관리 등의 목적으로 이용되고 있다. 대표적인 가뭄지수로는 Palmer 가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI)(Palmer, 1965), 지표수공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI)(Shafer and Dezman, 1982), 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI)(McKee et al., 1993), 물공급능력지수(Water Supply Capacity Index, WSCI)(Lee et al., 2006) 등이 있다.

이중 PDSI는 기상학적 인자인 강수량과 기온을 이용하여 가뭄을 정량적으로 나타내고자 한 최초의 가뭄지수라 할 수 있으며, 우리나라를 비롯한 전 세계 많은 지역에서 가뭄을 모니터링하기 위한 도구로 활용되고 있다. 그러나 PDSI는 지수 산정 방법론에 있어 여러 가지 문제점이 지적되어 왔다. Alley (1984) 및 Karl and Knight (1985)는 가뭄심도 기준 및 가뭄기 또는 습윤기의 시작과 종료로 판단하는 기준의 임의성, 수분수지 계산과정의 단순화, 융설 고려 불가, 잠재증발산량 산정 방법의 문제점 등을 지적한 바 있으며, Willeke et al. (1994)은 극한가뭄의 발생 빈도가 비정상적으로 크게 나타나는 지역이 존재한다는 점을 지적하였다. Wells et al. (2004)은 PDSI가 지역적으로 일관된 기준 하에 산정되지 못하고 있음을 확인하였으며, 이러한 결과가 PDSI의 경험적인 상수 결정 시 지역 특성이 반영되지 못하기 때문임을 밝힌 바 있다. 이러한 검토 결과를 바탕으로 Wells et al. (2004)은 PDSI의 경험적인 상수가 해당 지역의 특성을 바탕으로 자가 보정 될 수 있도록 방법을 수정한 SC-PDSI (Self-Calibrating PDSI)를 제안하였다. Moon (2011)은 동일 지점에 대해 SC-PDSI와 기존 PDSI를 적용할 경우 어떠한 차이가 나타나는가를 분석하여 제시하였으며, 습윤기에 대한 지수 산정 결과에 있어 많은 차이가 나타나고 있다는 결과를 제

시하였다.

PDSI를 이용한 가뭄특성 분석은 지금까지 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다. Lee (2001)는 가뭄의 지속기간 분석을 위해 비선형 물수지 모형과 PDSI를 이용한 연구를 수행한 바 있으며, Ryu et al. (2002)은 낙동강유역을 대상으로 PDSI, SPI, SWSI를 산정한 후 그 결과에 대한 비교를 통해 각각의 가뭄지수가 갖는 특성을 검토하여 제시하였다. Kang and Yoon (2002)은 목포 지역을 대상으로 PDSI를 산정하고 그 결과를 바탕으로 7가지 추계학적 등급으로 분류한 후 마코프연쇄(markov chain) 이론을 이용하여 월별 전이확률을 산정함으로써 가뭄의 동적인 확률변화 양상을 검토하였다. Kim et al. (2002)은 반건조(semi-arid) 지역에서의 지속가능한 수자원 관리를 위해 PDSI를 이용하여 가뭄의 시·공간적 발생특성을 분석할 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 멕시코의 Conchos 유역에 적용한 후 가뭄강도-가뭄영향면적-가뭄빈도 곡선을 작성하여 제시하였다. Dai et al. (2004)은 미국의 일리노이, 몽골, 중국 및 러시아 지역 자료를 이용하여 1870년부터 2002년까지의 PDSI를 산정하고 이를 토양수분 자료 및 세계적인 대하천 7개소의 하천유량과 비교한 결과 비교적 높은 상관관계가 나타나고 있음을 확인하였으며, 지표 수분상황에 대해 PDSI가 매우 유용한 지표로 이용될 수 있음을 확인하였다. Vasiliades and Loukas (2009)는 그리스의 Thessaly 지역에서 수문학적 가뭄을 모니터링하기 위한 지표로 PDSI의 가능성을 검토하였으며, 그 결과 PDSI가 유용한 정보를 제공해줄 수 있으나 가뭄의 지속기간에 대해서는 정확한 결과를 나타내기 어려운 한계가 있다는 결과를 제시하였다. Dalezios et al. (2000)은 그리스 지역에 대해 PDSI를 이용한 가뭄빈도해석을 수행하고 가뭄 및 습윤 기간에 대한 심도-지속기간-생기빈도 관계에 대한 분석을 수행하였다. Lee and Kim(2011)은 SPI를 이용한 가뭄빈도해석을 통해 가뭄심도-지속기간-생기빈도 곡선을 유도한 바 있으며, 유도된 곡선을 통해 주요 지점별 과거 가뭄의 재현기간을 평가하여 제시한 바 있다.

한편, 최근 정부에서는 정치·경제·사회·문화 등 제반 분야에서의 통일시대 기반 구축을 위해 통일준비위원회를 설치한 바 있으며, 수자원 관련 분야에서도 북한의 수자원 현황에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 북한의 수자원 현황을 분석하고 미래를 전망하는 일은 수자원 분야 전문가들의 공통된 관심사 중 하나이지만, 제한된 자료로 인해 체계적인 성과가 구축되지 못한 것이 사실이다(Ahn and Yoon, 2010). Myeong et al. (2008)의 연구에 의하면,

북한의 경우 자연재해 중에서도 홍수와 가뭄에 의한 피해가 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 수자원을 효과적으로 이용하기 위한 기반 시설이 부족하여 가뭄 발생 시 생활용수 및 농업용수 등의 부족으로 인한 피해를 반복적으로 경험하고 있는 것으로 알려져 있다. 그러므로 통일이 후 한반도의 올바른 수자원 관리 방향을 제시하고 가뭄으로 인한 재해에 효과적으로 대응할 수 있는 체계를 구축하기 위해서는 먼저 북한의 가뭄 특성에 대한 정량적인 분석이 선행될 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 북한에서 발생했던 과거 가뭄사상의 정량적 평가를 수행하기 위해 현재 북한에서 운영 중인 기상관측소 중 WMO(World Meteorological Organization)를 통해 자료 입수가 가능한 27개 지점의 자료를 수집한 후 SC-PDSI를 산정하였다. 27개 지점별로 산정된 월별 SC-PDSI를 이용하여 지점별 과거 주요 가뭄발생 시기를 검토하였으며, 27개 지점 중 북한 주요 도시에 해당하는 6개 지점(평양, 함흥, 청진, 원산, 해주, 신의주)에 대한 가뭄빈도해석을 통해 지점별 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선을 유도하였다. 유도된 SDF 곡선을 이용하여 6개 지점의 12개월 지속기간 과거 최대 가뭄사상에 대한 재현기간을 평가하고 그 결과를 제시하였다.

2. SC-PDSI (Self-Calibrating PDSI)

Wells et al. (2004)은 PDSI 산정 과정에서 경험적으로 결정되는 인자를 분석 대상 지역의 기후특성을 고려하여 자가 보정할 수 있도록 방법을 수정한 SC-PDSI (Self-Calibrating PDSI)를 제안하였다. Wells et al. (2004)은 Palmer (1965)에 의해 제안된 방법을 이용할 경우 지역별로 일관된 결과를 얻을 수 없다는 사실을 인지하고 이러한 한계를 수정하고자 하였으며, 이를 위해 가뭄지수 산정 공식과 기후특성인자에 대한 방법을 수정하여 제시하였다.

2.1 가뭄기와 습윤기에 대한 산정공식 분리

Palmer (1965)에 의해 제안된 PDSI에서는 최대 가뭄지속기간에 대한 직선을 결정하고 이를 기반으로 유도된 가뭄지수 산정공식을 가뭄기 및 습윤기에 관계없이 동일하게 적용하였다. 그러나 습윤기의 경우 가뭄기의 직선과는 다른 패턴을 나타낼 수 있으며, 이로 인해 습윤 상태에 대해 산정된 지수는 실제 상황과 다른 결과를 보일 수 있어 SC-PDSI에서는 가뭄기와 습윤기에 대한 산정공식을 분리하여 유도하였다. Wells et al. (2004)에 의하면 Eq. (1)과 같은 형태로 가뭄기와 습윤기에 대한 직선을 나타낸

후 직선의 기울기와 절편을 이용하여 Eq. (2)와 같이 가뭄지수 산정공식이 자동적으로 산정될 수 있도록 방법을 수정하였다.

$$\sum Z = C(mt + b) \quad (1)$$

$$X_i = \left(1 - \frac{m}{m+b}\right) X_{i-1} + \frac{CZ_i}{m+b} \quad (2)$$

여기서, Z 는 수분편차지수, C 는 상수이며, 가뭄기의 경우 -4.0 , 습윤기는 $+4.0$ 의 값을 갖는다. m 은 가뭄기 또는 습윤기에 대한 직선의 기울기와 관련된 계수이며, b 는 y 절편으로부터 산정되는 계수에 해당한다. X 는 PDSI 계산 값을 의미한다.

2.2 기후특성인자 산정 방법의 개선

Palmer (1965)에 의해 제안된 PDSI에서는 Eq. (3)을 이용하여 기후특성인자(K)를 산정하고 수분편차(d)와 함께 고려하여 수분편차지수(Z)를 산정하고 있다.

$$K_i = \frac{17.67 K'_i}{\sum_{i=1}^{12} D_i K'_i} \quad (i = 1, 2, \dots, 12) \quad (3)$$

여기서, $D_i = |\overline{P_i} - \overline{\bar{P}_i}| = |\bar{d}_i|$

$$K'_i = 1.5 \log_{10} \left[\left(\frac{\overline{PE_i} + \overline{R_i} + \overline{RO_i}}{\overline{P_i} + \overline{L_i}} + 2.8 \right) / D_i \right] + 0.5$$

그러나 Eq. (3)에서 '17.67'은 미국 내 9개 지역에 대한 분석 결과를 토대로 도출된 경험적인 계수이며, PDSI를 적용하는 지역 또는 국가가 상이할 경우 다른 값으로 수정하여 적용될 필요가 있는 계수이다. SC-PDSI에서는 분석 대상 지역의 특성을 고려하여 지수 계산 과정에서 자동적으로 수정이 가능하도록 방법론을 개선하였다. Eq. (3)에서 분모 및 분자가 나타내는 의미가 각각 관측된 값과 이론적으로 기대되는 값이라는 점에 착안하여 Eq. (4)와 같은 기후특성인자 산정 관계식을 제안하였다. 이때 가뭄기와 습윤기에 대한 기후특성인자를 구분하여 고려하였으며, 이를 통해 산정된 기후특성인자를 Eq. (3)의 K 대신 적용함으로써 수정된 방법에 의한 PDSI를 산정할 수 있다.

$$K = \begin{cases} K'(-4.00 / 2nd \text{ percentile}), & \text{if } d < 0 \\ K'(+4.00 / 98th \text{ percentile}), & \text{if } d \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

3. 대상 지점 및 분석 방법

3.1 분석 대상 지점

본 연구에서 SC-PDSI를 이용하여 북한의 가뭄특성 분석을 수행하기 위한 지점으로 WMO를 통해 강수량 등 기상자료 확보가 가능한 27개 지점을 선정하였다. 27개 지점에 대해 일 강수량 및 평균기온 자료를 수집하고 결측 값을 보완하여 월 강수량과 평균기온을 산정하였다. 확보된 기상자료의 기간은 1981~2013년까지 총 33년의 자료이며, Fig. 1은 27개 분석 대상 지점의 위치를 도시한 것이고 Table 1은 27개 지점의 세부 현황을 정리하여 나타낸 것이다.

3.2 분석 방법

북한의 주요 지점에 대한 가뭄특성 분석을 수행하기 위해 먼저 정리된 월 강수량 및 평균기온 자료를 이용하여 지점별 SC-PDSI를 산정하였다. 산정된 지수로부터 지속

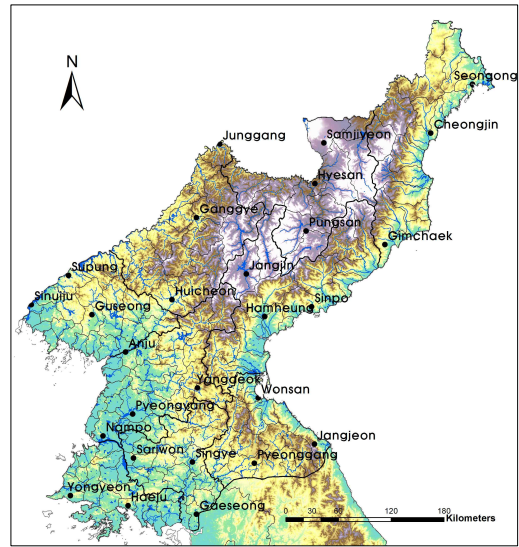


Fig. 1. Location Map of 27 Weather Stations in North Korea

Table 1. Descriptions for Weather Stations Used in This Study

Station Code	Station Name	Province	Observation period	Location		Elevation (EL.m)
				Latitude	Longitude	
47003	Seonbong	Hamgyeongbuk-do	1973 ~	42° 19'	130° 24'	3
47005	Samjiyeon	Yanggang-do	1981 ~	41° 49'	128° 19'	1,386
47008	Cheongjin	Hamgyeongbuk-do	1973 ~	41° 47'	129° 49'	43
47014	Junggang	Jagang-do	1973 ~	41° 47'	126° 53'	332
47016	Hyesan	Yanggang-do	1973 ~	41° 24'	128° 10'	714
47020	Ganggye	Jagang-do	1973 ~	40° 58'	126° 36'	306
47022	Pungsan	Yanggang-do	1981 ~	40° 49'	128° 09'	1,206
47025	Gimchaek	Hamgyeongbuk-do	1973 ~	40° 40'	129° 12'	23
47028	Supung	Pyeonganbuk-do	1981 ~	40° 27'	124° 56'	83
47031	Jangjin	Hamgyeongnam-do	1981 ~	40° 22'	127° 15'	1,081
47035	Sinuiju	Pyeonganbuk-do	1973 ~	40° 06'	124° 23'	7
47037	Guseong	Pyeonganbuk-do	1981 ~	39° 59'	125° 15'	99
47039	Huicheon	Jagang-do	1981 ~	40° 10'	126° 15'	155
47041	Hamheung	Hamgyeongnam-do	1973 ~	39° 56'	127° 33'	38
47046	Sinpo	Hamgyeongnam-do	1981 ~	40° 02'	128° 11'	19
47050	Anju	Pyeongannam-do	1981 ~	39° 37'	125° 39'	27
47052	Yangdeok	Pyeongannam-do	1981 ~	39° 10'	126° 50'	279
47055	Wonsan	Gangwon-do	1973 ~	39° 11'	127° 26'	36
47058	Pyeongyang	Pyeongannam-do	1973 ~	39° 02'	125° 47'	38
47060	Nampo	Pyeongannam-do	1981 ~	38° 43'	125° 22'	47
47061	Jangjeon	Gangwon-do	1981 ~	38° 44'	128° 11'	35
47065	Sariwon	Hwanghaebuk-do	1973 ~	38° 31'	125° 46'	52
47067	Singye	Hwanghaebuk-do	1981 ~	38° 30'	126° 32'	100
47068	Yongyeon	Hwanghaenam-do	1981 ~	38° 12'	124° 53'	5
47069	Haeju	Hwanghaenam-do	1973 ~	38° 02'	125° 42'	81
47070	Gaeseong	Hwanghaebuk-do	1973 ~	37° 58'	126° 34'	70
47075	Pyeonggang	Gangwon-do	1981 ~	38° 24'	127° 18'	371

기간별(1~12개월) 최대가뭄심도를 갖는 자료계열을 지점별로 구성하고 이를 이용하여 빈도해석을 수행한 후 SDF 곡선을 유도하였다. 빈도해석을 수행하기 위해서는 먼저 구축된 자료계열을 이용하여 적정 확률분포형을 선정하는 과정을 거쳐야 한다. 본 연구에서는 일반적으로 수문자료 해석에 많이 이용되는 Log-normal, Gamma, Log-Pearson type III, Gumbel, GEV (Generalized Extreme Value) 분포형을 대상으로 적합도 검정을 수행하였다. 적합도 검정 방법으로는 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 검정을 이용하였는데, K-S 검정은 관측자료의 누가확률분포와 이론확률분포의 누가확률분포의 최대편차를 수문자료의 크기와 유의수준에 따라 결정되는 한계 편차와 비교하여 적합성을 검정하는 방법이다. K-S 검정을 통해 적정 확률분포형을 결정한 후 빈도분석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 지점별로 SDF 곡선을 작성하여 제시하였다. 작성된 지점별 SDF 곡선과 지속기간 12개월에 해당하는 과거 최대가뭄을 지점별로 도출하고 해당 가뭄의 심도를 SDF 곡선과 비교하여 재현기간을 평가하여 제시하였다. Table 2는 PDSI를 이용한 가뭄 분류 기준으로 Palmer (1965)에 의해 제시되었으며, SC-PDSI는 PDSI와 동일한 가뭄 분류 기준을 이용하고 있다.

4. 분석 결과

4.1 SC-PDSI 산정 및 검토

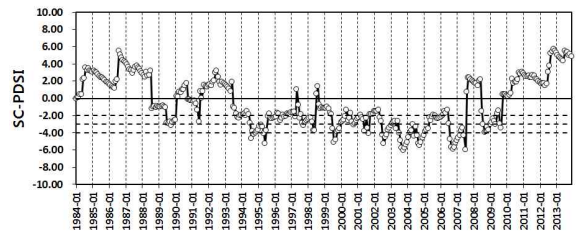
27개 지점에 대한 월 강수량 및 평균기온 자료를 이용하여 SC-PDSI를 산정하였다. 이때 가뭄지수 산정을 위한 기간은 모든 지점에 대해 동일한 자료기간을 확보하기 위해 1981~2013년까지의 월 자료를 이용하였으며, 1981~1983년까지 최초 3년의 기간은 가뭄특성 분석을 위한 기간에서 제외하였다. 최초 3년의 기간을 제외한 이유는 SC-PDSI 산정 과정에서 수분수지 모의가 필요하며, 매개변수 초기 값의 영향을 배제하고 매개변수 안정화가 진행된 이후의 가뭄지수 산정 결과를 분석에 활용하기 위함이다. Fig. 2는 SC-PDSI를 산정한 27개 지점 중 각 지역별로 대표적인 지점을 선정 후 SC-PDSI 시계열을 도시한 것이며, 도시된 시계열 자료 기간은 앞서 언급한 바와 같이 최초 3년을 제외한 1984~2013년까지 총 30년의 기간에 해당한다. 또한 Fig. 2에서 점선은 각각 Table 2의 Moderate drought(-2.0), Severe drought(-3.0), Extreme drought(-4.0) 기준을 나타내고 있다.

Fig. 2의 결과를 통해 북한 지역의 과거 주요 가뭄에 대해 개략적으로 확인해 볼 수 있다. 주요 가뭄 년에 대한 상

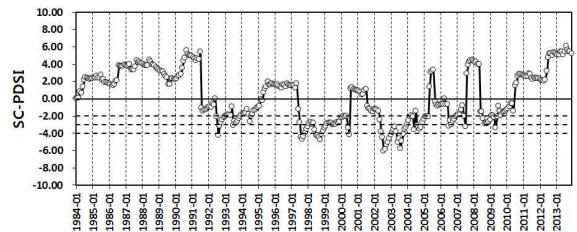
황을 보다 명확하게 파악하기 위하여 지점별로 가뭄이 발생한 연도를 검토하였으며, 그 결과를 Table 3에 정리하였

Table 2. Drought Classifications of PDSI (Palmer, 1965)

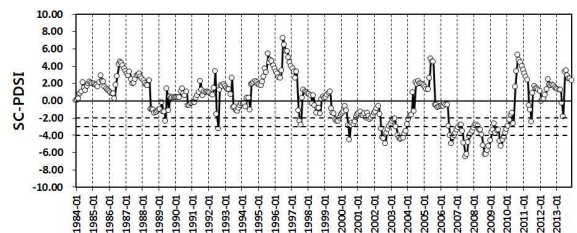
SC-PDSI	Drought Category
+ 4.0 or more	Extremely moist
+ 3.0 to + 3.9	Very moist
+ 2.0 to + 2.9	Unusually moist
+ 1.9 to - 1.9	Near normal
2.0 to - 2.9	Moderate drought
- 3.0 to - 3.9	Severe drought
4.0 or less	Extreme drought



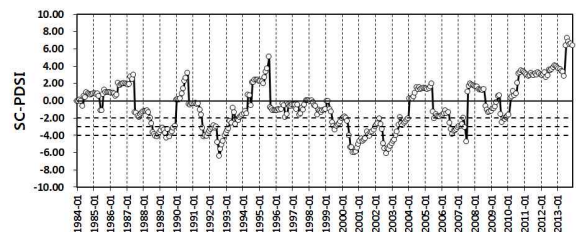
(a) Cheongjin



(b) Hyesan

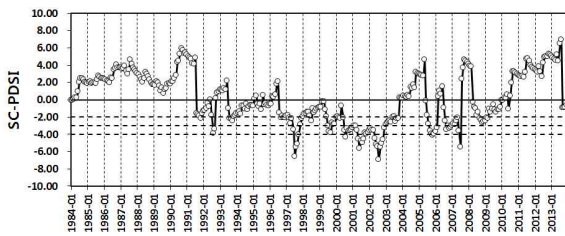


(c) Ganggye

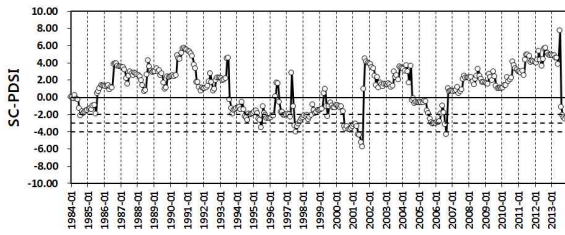


(d) Guseong

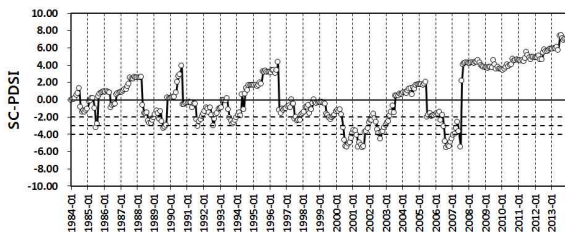
Fig. 2. Time Series of SC-PDSI for 8 Weather Stations



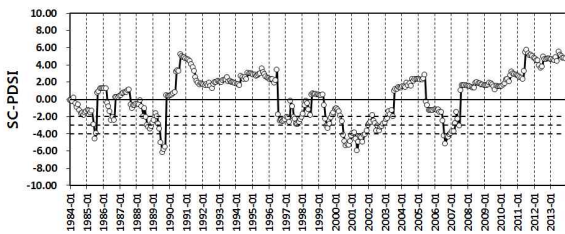
(e) Hamheung



(f) Wonsan



(g) Pyeongyang



(h) Haeju

Fig. 2. Time Series of SC-PDSI for 8 Weather Stations (continued)

고 연도별로 가뭄이 발생했던 지점 수를 Fig. 3에 도시하였다. 이 때 가뭄에 대한 판단 기준으로는 Table 2의 Severe drought(-3.0)을 기준으로 하였으며, SC-PDSI가 Severe drought의 기준인 -3.0보다 낮은 기간이 3개월 이상 지속되는 경우를 가뭄으로 판단하였다.

Table 3과 Fig. 3의 결과를 살펴보면, 대부분의 지점에서 2000년 이후 가뭄의 발생 빈도가 상대적으로 많이 나타나고 있음을 알 수 있다. 2000년과 2002년의 경우에는 전체 27개 지점 중 81%에 해당하는 22개 지점에서 가뭄이 발생했던 것으로 나타나고 있으며, 1999년, 2001년, 2003년, 2006년에도 절반 이상의 지점에서 가뭄이 발생했음을 알 수 있다. 특히, 1999년부터 2003년까지의 기간에 발생했던 가뭄은 1984년 이후 매우 넓은 지역에서 심각한 가뭄이 지속된 시기라고 판단할 수 있으며, 이로 인해 심각한 가뭄 피해를 경험했을 것으로 추측할 수 있다. 2000년대 초반 및 중반에 발생했던 가뭄은 남한에서도 중부지방을 중심으로 가뭄이 발생했던 시기와 일치하고 있으나 남한에서 가뭄 피해가 매우 극심했던 1994~1995년에는 북한의 동해안에 위치한 일부 지점에서만 가뭄이 발생했던 것으로 나타나 가뭄 발생 지역에 공간적인 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 1984년 이후 한반도에서 발생했던 가뭄 중 1994~1995년 가뭄은 한반도의 남부지방을 중심으로 발생했으며, 2000~2002년 가뭄은 한반도의 중북부지방을 중심으로 발생했던 것으로 판단된다.

4.2 SDF 곡선의 유도

27개 지점 중 북한의 주요 도시라 할 수 있는 평양 등 6개 지점에 대해 SDF 곡선을 유도하였다. 이를 위해 6개 지점에 대해 산정된 30년(1984~2013년) 동안의 월 단위 SC-PDSI로부터 지속기간별(1~12개월) 최대 가뭄심도를 갖는 자료계열을 구성한 후 K-S 검정에 의해 적정 확률분

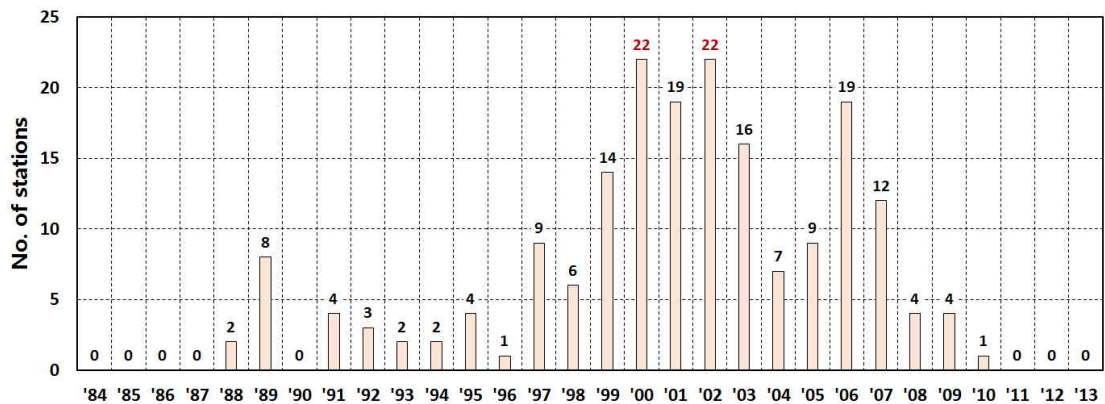


Fig. 3 Number of Drought Occurrence Stations in Each Year

Table 3. Analysis Results of Drought Year in Each Station

Station Name	Year																													
	'84	'85	'86	'87	'88	'89	'90	'91	'92	'93	'94	'95	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	'03	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10	'11	'12	'13
Seonbong																		O	O	O	O	O	O	O						
Samjiyeon												O		O			O		O	O	O					O				
Cheongjin											O	O				O			O	O	O	O	O	O	O					
Junggang																			O	O				O	O	O	O			
Hyesan													O	O					O	O	O									
Ganggye																			O	O			O	O	O	O				
Pungsan																O	O	O	O	O	O		O	O						
Gimchaek																O	O		O	O	O	O	O	O		O				
Supung																O	O	O					O							
Jangjin																O	O	O	O	O	O		O							
Sinuiju						O											O	O	O	O										
Guseong					O	O		O	O	O							O	O	O	O			O							
Huicheon													O		O	O		O	O				O	O	O					
Hamheung													O		O	O	O	O				O	O							
Sinpo												O	O	O	O	O	O	O			O	O	O							
Anju															O	O	O	O	O					O	O					
Yangdeok										O						O	O	O	O	O										
Wonsan													O			O	O					O								
Pyeongyang																	O	O	O				O	O						
Nampo						O									O	O	O	O	O	O			O	O	O					
Jangjeon							O			O	O		O	O		O	O													
Sariwon						O										O	O	O	O			O	O							
Singye						O		O	O				O		O	O	O	O					O							
Yongyeon						O										O	O	O		O			O	O						
Haeju						O	O									O	O	O					O	O						
Gaeseong						O		O	O										O				O	O						
Pyeonggang													O	O	O	O	O													

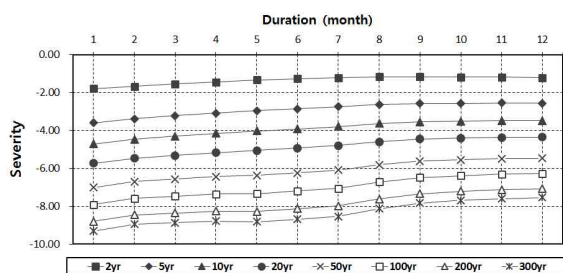
포형을 도출하였다. 5개 분포형(Log-normal, Gamma, Log-Pearson type III, Gumbel, GEV)을 대상으로 6개 지점의 지속기간별 최대 가뭄심도 자료계열에 대해 유의수준 5%에 대한 검정을 실시하였으며, Table 4와 같이 가장 높은 순위의 적합성을 나타낸 Log-Pearson type III 분포형을 지속기간별 빈도해석을 위한 최적확률분포형으로 선정하였다. Table 4는 평양 및 신의주 지점에 대한 적합도 검토 결과를 정리한 것이며, 함흥 등 4개 지점에서도 유사한 결과를 나타내었다. 선정된 적정 확률분포형을 이용하여 8개 재현기간(2년, 5년, 10년, 20년, 50년, 100년, 200년, 300년)에 대한 SDF 곡선을 작성하였으며, Fig. 4는 6개 지점에 대해 유도된 SDF 곡선을 나타내고 있다.

4.3 과거 주요 가뭄사상에 대한 재현기간 평가

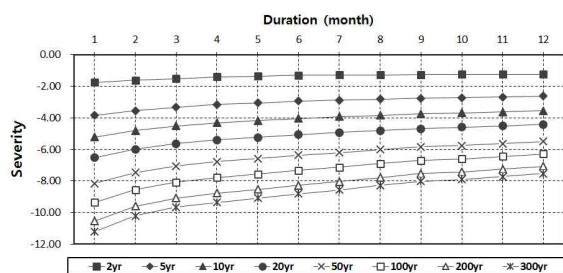
SDF 곡선을 유도한 북한 지역 6개 주요 지점에 대해 과거 주요 가뭄사상을 추출하였다. 이때 가뭄사상의 판단 기준으로는 Table 2의 Severe drought(-3.0)를 기준으로 하였으며, 6개 지점별로 Severe drought 이상의 심각한 가뭄이 발생한 시기를 추출하였다. 추출된 가뭄사상에 대해 가뭄 지속기간(Duration) 및 가뭄규모(Magnitude)를 산정하였으며, 가뭄규모는 가뭄이 지속된 기간에 대한 SC-PDSI의 합계에 해당한다. 6개 지점에 대해 추출된 주요 가뭄사상은 Table 5에 정리하였으며, 가뭄규모를 지속기간으로 나누어 가뭄심도(Severity)를 산정하였고 Fig. 4의 SDF 곡선을 이용하여 해당 가뭄사상의 재현기간을 추

Table 4. Results of K-S test for Pyeongyang and Sinuiju station

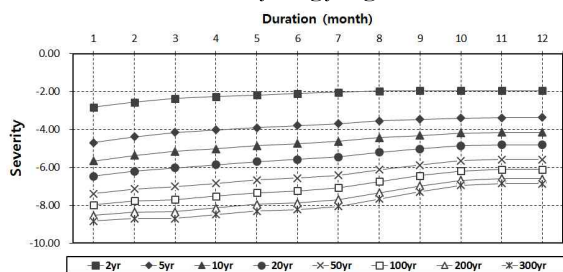
Station	Duration (Month)	Log-normal	Gamma	Log-Pearson type III	Gumbel	GEV
Pyeongyang	1	0.18149	0.16772	0.17889	0.18624	0.18284
	2	0.18139	0.16615	0.17849	0.18445	0.18288
	3	0.17923	0.16135	0.17551	0.17847	0.18108
	4	0.17798	0.15797	0.17358	0.17423	0.18009
	5	0.17490	0.15193	0.16921	0.16652	0.17746
	6	0.15574	0.14966	0.14516	0.15350	0.16073
	7	0.14240	0.14486	0.13599	0.13690	0.14512
	8	0.11501	0.13945	0.10939	0.11526	0.11769
	9	0.08920	0.14237	0.08481	0.09570	0.09105
	10	0.09648	0.14301	0.09322	0.10749	0.09787
	11	0.10188	0.12101	0.09943	0.08726	0.10291
	12	0.10462	0.13100	0.10260	0.09042	0.10549
Sinuiju	1	0.07435	0.13052	0.07377	0.07782	0.07419
	2	0.06906	0.11850	0.07521	0.06546	0.06595
	3	0.07745	0.15987	0.07508	0.10854	0.07921
	4	0.06699	0.15986	0.06534	0.10818	0.07189
	5	0.09457	0.19324	0.09191	0.14126	0.09704
	6	0.09973	0.20146	0.09629	0.14958	0.10278
	7	0.10040	0.20313	0.09306	0.15436	0.10586
	8	0.10262	0.21270	0.09333	0.16461	0.10948
	9	0.08433	0.20032	0.07651	0.15017	0.09048
	10	0.06595	0.18998	0.06997	0.13411	0.07316
	11	0.06039	0.16076	0.06190	0.10685	0.06898
	12	0.06916	0.14199	0.04709	0.09186	0.08074



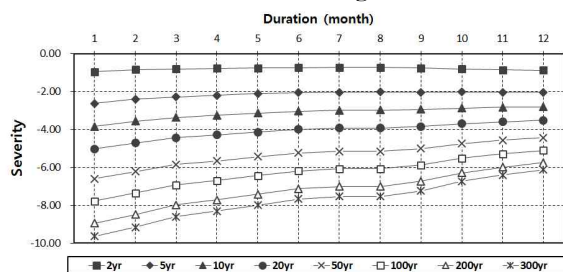
(a) Pyeongyang



(b) Hamheung

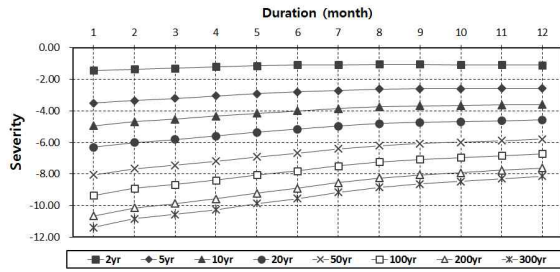


(c) Cheongjin

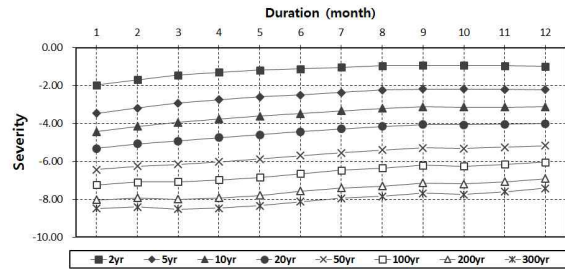


(d) Wonsan

Fig. 4. SDF (Severity–Duration–Frequency) Curve for Each Weather Station



(e) Haeju



(f) Sinuiju

Fig. 4. SDF (Severity–Duration–Frequency) Curve for Each Weather Station (continued)

Table 5. Return Period of Historical Major Drought Event Based on SDF Curves

Station	Period	Duration (month)	Magnitude	Severity	Return Period (year)
Pyeongyang	89.08 ~ 89.09	2	-6.50	-3.25	5
	00.09 ~ 01.08	12	-56.60	-4.72	20~50
	02.07 ~ 02.12	6	-22.57	-3.76	5~10
	06.08 ~ 07.07	12	-51.20	-4.27	20
Hamheung	92.08 ~ 92.09	2	-7.30	-3.65	5
	97.06 ~ 97.10	5	-24.67	-4.93	10~20
	99.07 ~ 99.09	3	-10.54	-3.51	5~10
	01.12 ~ 02.11	12	-54.98	-4.58	20
	05.09 ~ 06.03	6	-22.61	-3.77	5~10
	06.09 ~ 06.12	4	-12.98	-3.25	5~10
	07.06 ~ 07.07	2	-9.08	-4.54	5~10
Cheongjin	94.08 ~ 95.07	12	-47.00	-3.92	5~10
	98.05 ~ 98.06	2	-7.53	-3.77	2~5
	99.07 ~ 99.12	6	-24.79	-4.13	5~10
	02.07 ~ 03.01	7	-28.64	-4.09	5~10
	03.07 ~ 04.06	12	-56.87	-4.74	10~20
	06.08 ~ 07.07	12	-58.66	-4.89	20
	08.08 ~ 09.01	6	-21.41	-3.57	2~5
Wonsan	97.07 ~ 97.10	4	-13.82	-3.46	10~20
	00.09 ~ 01.08	12	-47.34	-3.95	20~50
	05.11 ~ 06.01	3	-9.12	-3.04	5~10
	06.08 ~ 06.09	2	-7.47	-3.74	10~20
Haeju	85.07 ~ 85.08	2	-8.61	-4.31	5~10
	88.09 ~ 88.12	4	-12.93	-3.23	5~10
	89.06 ~ 89.10	5	-26.03	-5.21	10~20
	99.07 ~ 99.08	2	-6.49	-3.25	5
	00.08 ~ 01.07	12	-58.03	-4.84	20~50
	02.07 ~ 02.11	5	-16.85	-3.37	5~10
	06.08 ~ 07.03	8	-33.80	-4.23	10~20
Sinuiju	89.07 ~ 89.11	5	-18.45	-3.69	10
	00.07 ~ 00.12	6	-22.26	-3.71	10~20
	01.04 ~ 02.02	11	-42.13	-3.83	10~20
	02.05 ~ 03.03	11	-52.60	-4.78	20~50

정하여 정리하였다.

Table 5에 정리된 6개 지점의 과거 주요 가뭄사상별 재현기간을 살펴보면, 먼저 평양의 경우 2000년 9월부터 2001년 8월까지 진행된 가뭄이 가장 심각했던 것으로 나타나고 있다. 이 기간에 발생했던 가뭄은 20~50년 정도의 재현기간을 갖는 가뭄인 것으로 나타나고 있으며, 2006년 8월부터 2007년 7월까지의 기간에 발생했던 가뭄도 약 20년의 재현기간을 갖는 것으로 추정되었다. 함흥지점의 경우에는 Severe drought 이상의 가뭄이 2개월 이상 지속된 가뭄사상이 총 7개 사상인 것으로 나타났으며, 이 중 가장 규모가 컸던 가뭄은 2001년 12월부터 2002년 11월까지 지속된 가뭄인 것으로 나타났다. 이때의 가뭄은 약 20년의 재현기간을 갖는 것으로 나타났으며, 2005년부터 2007년까지 5~10년의 재현기간을 갖는 가뭄이 자주 발생했던 것으로 분석되었다. 청진지점에서는 총 7개의 가뭄사상이 추출되었으며, 2006년 8월부터 2007년 7월까지 발생했던 가뭄이 재현기간 20년 정도인 것으로 추정되어 가장 심각한 가뭄이었던 것으로 나타났다. 원산지점의 경우에는 총 4건의 가뭄사상이 추출되었으며, 2000년 9월부터 2001년 8월까지 진행된 가뭄의 재현기간이 20~50년 정도인 것으로 나타나 가장 심각한 가뭄이 발생했음을 알 수 있다. 해주지점에서는 총 7건의 가뭄사상 중 2000년 8월부터 2001년 7월까지의 가뭄이 가장 심각했던 것으로 나타났으며, 이때의 재현기간은 20~50년 정도인 것으로 추정되었다. 마지막으로 신의주지점은 총 4건의 가뭄사상을 파악할 수 있었으며, 2002년 5월부터 11개월 동안 지속된 가뭄의 재현기간이 20~50년 인 것으로 추정되어 가장 극심한 가뭄이었던 것으로 분석되었다.

5. 결 론

최근 들어 북한의 수자원 현황에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, 정부 차원에서도 한반도 통일시대를 준비하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 이러한 상황에서 본 연구는 북한 지역의 27개 지점에 대한 월 강수량 및 평균 기온 자료를 이용하여 SC-PDSI를 산정한 후 북한의 과거 주요 가뭄발생 시기에 대한 분석을 수행하였다. 27개 지점 중 북한의 주요 도시에 해당하는 6개 지점에 대해 가뭄 지속기간별 최대 가뭄심도 자료계열을 구성한 후 빈도해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 6개 지점별 SDF (Severity-Duration-Frequency) 곡선을 제시하였다. 제시된 SDF 곡선을 이용하여 6개 지점의 과거 주요 가뭄사상에 대해 재현기간을 추정하여 제시하였다.

먼저 27개 지점에 대해 SC-PDSI를 산정한 결과, 2000년 이후에 상대적으로 규모가 큰 가뭄이 발생하였음을 확인할 수 있었다. 남한 지역에서 심각한 가뭄이 발생했던 1994년 및 1995년에는 상대적으로 가뭄이 발생했던 지점이 적게 나타나고 있었으며, 대부분의 지점에서 1999~2003년의 기간과 2006년 및 2007년을 중심으로 심각한 가뭄이 발생했던 것으로 나타나고 있었다. 2000년대 초반에는 남한에서도 중부지방을 중심으로 심각한 가뭄이 발생했던 시기였으며, 2006년 및 2007년에는 광동댐 고갈이 나타날 정도의 가뭄이 남한에서도 발생했던 시기로 유사한 시기에 북한 지역에서도 심각한 가뭄이 발생했던 것으로 나타났다.

두 번째로 북한의 주요 도시 6개 지점에 대해 지속기간별 최대 가뭄심도 자료계열을 구성한 후 적합도 검정 및 빈도해석을 수행하였다. 빈도해석 결과를 이용하여 SDF 곡선을 지점별로 도출하여 제시하였으며, 작성된 SDF 곡선은 가뭄의 지속기간이 길어짐에 따라 동일한 빈도에서 가뭄의 심도가 작아지는 일반적인 형태를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 도출된 SDF 곡선의 활용성을 확인하기 위해 본 연구에서는 6개 지점의 과거 주요 가뭄사상을 추출하고 추출된 가뭄사상의 지속기간과 심도를 산정한 후 SDF 곡선에 적용하여 가뭄사상별 재현기간을 추정하였다. 그 결과, 6개 지점별로 차이는 있으나 과거 심각했던 가뭄은 최대 20~50년 빈도의 재현기간을 갖고 있음을 확인할 수 있었으며, 특히 2000년 및 2001년을 중심으로 나타났던 가뭄의 빈도가 상대적으로 크게 나타나 이 시기에 가뭄으로 인한 피해를 심각하게 경험했음을 유추해볼 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 도출된 SDF 곡선은 지점별로 가뭄이 발생할 경우 가뭄의 심도 및 지속기간을 이용하여 해당 가뭄의 재현기간을 보다 쉽게 판단할 수 있는 도구라 할 수 있으며, 북한 지역에 대한 가뭄대책 수립 시 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 또한 향후 보다 많은 지점의 자료를 확보하여 SDF 관계를 유도하고 이를 이용하여 가뭄 지속기간 및 재현기간별 가뭄심도에 대한 분포도를 작성할 수 있을 것으로 판단되며, 분포도를 작성하여 활용함으로써 가뭄의 공간적인 분포 특성을 쉽게 파악할 수 있어 북한 지역에 대한 효과적인 가뭄대책 수립에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 30년의 자료를 이용하여 빈도분석을 수행하고 그 결과로부터 도출된 SDF 곡선에 의해 가뭄사상별 재현기간을 추정하였으므로 30년 이상으로 추정된 가뭄의 재현기

간에 대해서는 향후 추가 자료 확보 및 분석을 통해 결과의 신뢰도를 높일 수 있는 방안을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한 시공간적인 가뭄의 발생 상황에 대한 세부적인 분석을 위해 분석 대상 지점을 추가하여 분석을 수행할 필요가 있으며, 이를 통해 북한 지역 가뭄 대책 수립에 있어 보다 유용한 정보 생산이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업(CATER 2012-3090)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Ahn, J.H., and Yoon, Y.N. (2010). "Status of water resources and water supply and demand in North Korea(I)." *Magazine of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 43, No. 4, pp. 17-26.
- Alley, W.M. (1984). "The Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions." *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 23, pp. 1100-1109.
- Dai, A., Trenberth, K.E., and Qian, T. (2004). "A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002 : Relationship with soil moisture and effects of surface warming." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 5, pp. 1117-1130.
- Dalezios, N.R., Loukas, A., Vasiliades, L., and Liakopoulos, E. (2000). "Severity-duration-frequency analysis of droughts and wet periods in Greece." *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 45, No. 5, pp. 751-769.
- Kang, I.J., and Yoon, Y.N. (2002). "A study on the hydrologic decision-making for drought management : 1. An analysis on the stochastic behavior of PDSI using markov chain." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 35, No. 5, pp. 583-595.
- Karl, T.R., and Knight, R.W. (1985). *Atlas of monthly Palmer Hydrological Drought Indices (1931~1983) for the contiguous United States*. Historical Climatology Series 3-7, National Climatic Data Center, Asheville, NC.
- Kim, T.W., Valdes, J.B., and Aparicio, J. (2002). "Frequency and spatial characteristics of droughts in the Conchos River Basin, Mexico." *Water International*, Vol. 27, No. 3, pp. 420-430.
- Lee, D.R., Moon, J.W., Lee, D.H., and Ahn, J.H. (2006). "Development of Water Supply Capacity Index to monitor droughts in a reservoir." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 3, pp. 199-214.
- Lee, J.H., and Kim, C.J. (2011). "Derivation of Drought Severity-Duration-Frequency curves using drought frequency analysis." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 11, pp. 889-902.
- Lee, J.S. (2001). "An analysis of the drought period using non-linear water balance model and Palmer Drought Severity Index." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 34, No. 5, pp. 533-542.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. (1993). *Drought monitoring with multiple time series*. 8th Conf. on Applied Climatology, Boston, American Meteorological Society.
- Moon, J.W. (2011). Development of drought index based on hydrologic characteristics and water supply system in Korea. Ph. D. dissertation, Korea University, Seoul, Korea.
- Moon, J.W., and Lee, D.R. (2012). "A study on the parameter stabilization of Palmer Drought Severity Index." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 12, No. 5, pp. 91-99.
- Myeong, S.J., Hong, H.J., Choi, H.I., and Jeong, J.C. (2008). *Estimation of flood vulnerable areas in North Korea and collaboration strategies between South Korea and North Korea*. Korea Environment Institute, Seoul, Korea.
- Pamer, W.C. (1965). *Meteorological Drought*. U.S. Weather Bureau.
- Ryu, J.H., Lee, D.R., Ahn, J.H., and Yoon, Y.N. (2002). "A comparative study on the drought indices for drought evaluation." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 35, No. 4, pp. 397-410.
- 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*. Western Snow Conf., pp. 164-175.

Vasiliades, L., and Loukas, A. (2009). "Hydrological response to meteorological drought using the Palmer drought indices in Thessaly, Greece." *Desalination*, Vol. 237, pp. 3-21.

Wells, N., Goddard, S., and Hayes, M.J. (2004). "A Self-Calibrating Palmer Drought Severity Index." *Journal of Climate*, Vol. 17, pp. 2335-2351.

Willeke, G., Hosking, J.R.M., Wallis, J.R., and Guttman, N.B. (1994). *The national drought atlas*. Institute for Water Resources Report 94-NDS-4, U.S. Army Corps of Engineers, Fort Belvoir, VA.

논문번호: 14-073	접수: 2014.08.06
수정일자: 2014.08.21/08.22	심사완료: 2014.08.22