

우리나라의 지역 가뭄 평가를 위한 MODIS DSI 활용

박혜선* · 엄명진** · 김정빈*** · 김연주****

Park, Hye Sun*, Um, Myoung-Jin**, Kim, Jeong Bin***, Kim, Yeonjoo****

MODIS DSI for Evaluation of the Local Drought Events in Korea

ABSTRACT

As the drought disasters are increased in the world, the need of study using satellite image data is on the rise. This study is conducted to analyze the drought in the region using satellite image, and to analyze the correlation with the standard precipitation index (SPI) and the actual drought cases. We selected Dongducheon and Taebaek region for domestic major drought (2001, 2008-2009). The correlation with the SPI and the observed water level data was analyzed using the 0.05° spatial resolution and 8days MODIS DSI (Drought Severity Index). In Dongducheon, 6-months DSI has a correlation of 0.71 with the SPI (30). In Taebaek, the correlation between 6-months DSI and SPI (90) was a 0.40 and showed an average hit ratio of 65.7% in comparing with the observed water level of study area. In summary, this study showed a limited correlation between DSI based on satellite images and meteorological drought index SPI and confirmed the possibility of using DSI for the domestic study.

Key words : Drought, Drought index, Satellite image data, Correlation analysis

초록

전 세계적으로 가뭄 재해가 증가함에 따라 최근 위성영상 자료를 활용한 연구의 필요성이 대두되고 있다. 기존 연구는 대부분 실제 사례와의 연계성이 낮은 한계점을 가지고 있다. 본 연구에서는 위성영상을 활용하여 지역적 분석을 실시하고, 영상 자료와 표준강수지수(SPI) 및 실제 가뭄 사례의 상관성 분석을 실시하고자 하였다. 국내 주요 가뭄(2001년, 2008-2009년)을 대상으로 각각 동두천과 태백 지역을 선정하였다. 8일 간격의 0.05° 공간해상도 MODIS DSI (Drought Severity Index)를 이용하여 SPI 및 수위 자료와의 상관관계 분석을 실시하였다. 동두천의 경우 6개월 DSI는 30일 SPI와 0.71의 상관관계를 나타냈으며, 태백 지역의 6개월 DSI와 90일 SPI의 상관성은 0.40을 보였다. DSI와 대상 지역의 관측 저수위를 비교한 결과 6개월 DSI가 평균 65.7% 수준의 적중률을 보였다. 연구를 통하여 위성영상 자료 기반 가뭄지수인 DSI와 기상학적 가뭄지수인 SPI의 상관성을 부분적으로 제시할 수 있었으며, 실제 관측 자료와 비교를 실시한 결과 국내 연구에서의 활용 가능성을 확인하였다.

검색어 : 가뭄, 가뭄지수, 위성영상 자료, 상관관계 분석

1. 서론

미국 해양기상청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서 발표한 20세기 최대 자연재해에는 4개의 가뭄 피해 사례가 상위권에 선정되었으며, 이는 대부분 아시아에서 발생하였다(NOAA, 1999). Wilhite (2000)는 가뭄이 매년 세계 수백만의

* 연세대학교 토목환경공학과 석사후연구원 (Yonsei University · hs.park@yonsei.ac.kr)

** 종신회원 · 연세대학교 토목환경공학과 박사후연구원 (Yonsei University · movie21@gmail.com)

*** 정회원 · 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Yonsei University · zzang_bin@naver.com)

**** 정회원 · 교신저자 · 연세대학교 토목환경공학과 조교수 (Corresponding Author · Yonsei University · yeonjoo.kim@yonsei.ac.kr)

Received July 17, 2015/ revised August 28, 2015/ accepted September 10, 2015

사람들에게 영향을 미치는 가장 파괴적인 자연재해 중 하나라고 하였으며, 미국 국립가뭄경감센터(National Drought Mitigation Center, NDMC)에서 발표한 통계에 따르면 연평균 피해액 중 가뭄 피해가 가장 큰 것으로 나타났다(Lee and Lee, 2006; Oh et al., 2010). 현재 전 세계에서 가뭄으로 인한 총체적인 피해가 꾸준히 발생하고 있으며, 지구온난화로 인하여 지속적인 가뭄이 증가할 것으로 예상된다(Dai, 2011; KMA, 2012). 그러나 가뭄은 진행속도가 느리고 진행방향을 파악하기가 어려워 예방하는 것이 쉽지 않다. 또한 광역적 범위에서 발생하기 때문에 원인 분석과 대책 마련을 위해서는 가뭄을 사공간적으로 파악하는 등 가뭄을 정량화하고 대상 가뭄 지역의 특성에 대한 분석이 이루어져야 한다(Wilhite and Glantz, 1985; Ryu et al., 2002; Choi and Kim, 2010).

전 세계적으로 다양한 가뭄지수(Drought Index)가 개발되었으며, 이를 이용하여 가뭄을 정량화하려는 연구들이 계속적으로 진행되고 있다. 대표적인 가뭄지수로는 기상학적 가뭄지수인 표준강수지수(Standardized Precipitation Index, SPI), 수문학적 가뭄지수인 파머가뭄지수(Palmer Drought Severity Index, PDSI)와 지표수공급지수(Surface Water Supply Index, SWSI), 용수공급 가뭄지수(Water supply Drought Index, WADI) 등이 있다. Dai (2011)는 1900년부터 2008년까지의 기후 자료를 이용하여 다양한 PDSI 특성 및 동향을 분석하였으며, 아프리카 및 아시아 동쪽과 남쪽 지역 등이 가장 건조한 것으로 나타났다. Ryu et al. (2002)은 낙동강 유역을 대상으로 PDSI, SWSI, SPI 지수 산정 및 평가를 실시한 결과 가뭄을 정량적으로 나타내는데 유효하였으며 각 지수가 가지는 장단점에 따라 활용할 경우 효과적일 것으로 판단하였다. Kim and Lee (2011)은 1973년부터 2009년까지의 실제 가뭄 발생 기록을 정량화하고 관측 자료를 활용하여 각종 가뭄지수의 실제 가뭄 반영정도를 평가하였으며, 3개월 SPI와 PDSI 등이 실제 가뭄을 잘 표현하는 것으로 나타났다. Kim and Moon (2014)은 한반도 전역을 대상으로 3개월 SPI를 이용하여 목표 표준강수지수를 제시하였으며, 가뭄의 심도와 빈도가 지역별로 상이하기 때문에 지역적 특성을 고려하여 가뭄을 평가하는 것이 더욱 효과적이라고 판단하였다. Lee et al. (2015)은 소양강댐 유역을 대상으로 기상학적 가뭄지수와 수문학적 가뭄지수의 상관정도를 분석하였으며, 기상학적 가뭄만으로 수문학적 가뭄을 해석하기에는 한계가 있음을 확인하였다.

기존에는 지상 관측 기반 수문 및 기상 자료 등을 활용한 연구를 위주로 하였으나, 2000년대 들어 인공위성 자료를 활용한 가뭄 연구가 시작되었다. 가뭄 예상 및 대책을 위해서는 정기적이고, 사공간적으로 특성이 동일한 자료를 이용하여 객관적으로 판단해야 한다. 위성영상은 광범위한 지역에 대한 정보를 주기적으로 제공

하여 보다 객관적인 분석이 가능하다(Shin and Eoh, 2004; Park and Kim, 2009; Anderson et al., 2013; Bae and Son, 2013; Sur et al., 2014). 국외에서는 위성영상을 활용한 연구들이 이전부터 수행되어 왔으며, 국내에서도 증가하는 추세에 있다. Ji and Peters (2003)는 미국 중북부 지역을 대상으로 NOAA NDVI (Normal Distribution Vegetation Index)와 SPI의 상관성을 분석하였으며, 식물의 성장 시기에 가장 높은 상관성을 보이므로 NDVI를 이용한 가뭄 모니터링 시 계절적 시기가 고려되어야 한다고 판단하였다. Yang et al. (2010)은 HJ-1 위성영상 자료를 활용하여 온도 식물 건조도 지수(Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI)를 산출하고, MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 자료로부터 얻어지는 TVDI와 비교를 실시한 결과 상당히 정확하고 효과적인 것으로 나타나 가뭄 모니터링 시 위성 자료의 활용가능성을 확인하였다. Mu et al. (2013)는 전 세계적 가뭄 모니터링을 위하여 MODIS DSI (Drought Severity Index) 알고리즘을 개발하고 PDSI 및 입력 자료를 통하여 평가하였다. Orvos et al. (2014)는 DSI를 이용하여 각기 다른 지역의 습윤/건조 동향을 분석하고 지역적 기후변화와의 상관성 분석을 실시하였으며, DSI가 사공간적 해상도가 높아 활용이 가능하다고 평가하였다. Zhang and Yamaguchi (2014)은 월별 DSI를 산출하여 관측 자료 및 SPI와 비교하였으며, 3개월 SPI와의 사공간적 패턴이 유사하여 가뭄 모니터링에서의 활용이 가능할 것이라 평가하였다.

우리나라의 경우 Shin and Eoh (2004)이 NOAA 영상 자료를 활용하여 가뭄 분석을 실시하였으며, 광역적 분석을 위한 인공위성 영상 자료의 활용가능성 제시하였다. Yoo et al. (2010)은 MODIS LST (Land Surface Temperature) 위성영상 자료와 EDI (Effective Drought Index) 가뭄지수의 상관성을 분석하여 한반도 가뭄 모니터링을 위한 위성영상 자료의 활용성을 평가하였다. Bae and Son (2013)은 MODIS 위성자료를 활용하여 다양한 식생지수 및 SPI와 비교한 결과 적용성이 낮은 것으로 평가하였으나 보완방안을 제시하여 향후 연구에 활용이 가능할 것으로 판단하였다. Ahn et al. (2014)은 한반도를 대상으로 SPI 및 WADI와 위성영상을 활용하여 실제 가뭄 사례를 분석하였으며, 위성영상을 통하여 현장 정보가 부족한 지역의 현황 파악이 일부 가능한 것으로 판단하였다. Sur et al. (2014)는 MODIS 위성영상 자료를 활용한 가뭄지수를 통하여 2013년 남부지방의 가뭄을 평가하였으며, 국내 가뭄정보시스템의 모니터링 결과와 비교 분석한 결과 유역 및 지역 단위별로 가뭄의 심도를 파악할 수 있어 국내 적용이 가능할 것으로 판단하였다.

그동안의 연구들은 대부분 광역적으로 분석을 실시하였으며, 실제 가뭄 피해와의 관계에 대한 고찰이 부족하다는 한계점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 한계점을 극복하기

위하여 지역적 분석을 실시하고, 지역의 실제 가뭄 사례와의 상관성을 분석하고자 하였다. 이를 위하여 Mu et al. (2013)가 제안한 MODIS DSI를 활용하여 시군구 수준의 지역 단위를 대상으로 분석하였으며, 기상학적 가뭄지수인 SPI 및 대상 지역의 수자원 가용량 자료인 수위 관측 자료와의 상관관계 분석을 실시하여 DSI 자료의 활용성을 검토하고자 하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 위성영상 자료를 기반으로 하는 MODIS DSI 자료를 활용하여 시군구 수준의 지역단위를 대상으로 분석을 실시하고, 대표적 가뭄지수인 SPI 및 지역의 수자원 가용량 자료와의 상관관계 분석을 실시하여 실제 가뭄 사례와의 상관성 분석 및 DSI 자료의 활용성을 검토하고자 하였다.

우리나라 주요 가뭄 시기에 따라 수집한 8일 간격 DSI 자료와 강수량 및 수위 관측 자료를 비교하여 살펴보고, 각 대상 지역에

대하여 1년과 6개월 단위로 기간을 선정하였다. DSI 자료는 대상 지역 내 선정된 기준점을 기준으로 주변의 9개 그리드를 추출하여 이용하였다. DSI 자료의 활용성을 검증을 위하여 다수의 연구에서 검증받은 기상학적 가뭄지수인 SPI를 선정하였으며, 상관성을 분석하기 위해 일자료로 산출하였다. DSI는 선형보간법을 통하여 Daily DSI로 구축하였으며, SPI는 30일, 60일, 90일, 180일의 시간단위별로 산출하여 비교하였다. 또한 실제 가뭄 피해와의 상관성 분석을 위하여 지역의 수자원 가용량 자료를 활용하였으며, 수자원 가용량은 대상 지역의 하천 및 댐의 저수위 자료를 활용하였다. SPI 및 수자원 가용량 자료와의 상관성 분석을 통하여 DSI 자료의 활용성을 검토하였다.

2.1 대상 지역

본 연구에서는 DSI 자료가 2000년부터 구축되어 있어, 2000년 이후 우리나라 주요 가뭄인 2001년과 2008~2009년의 가뭄을 선정하였다. 일반적으로 위성영상을 활용한 가뭄 연구에서는 광역적 범위에서의 분석을 실시하는 경우가 많지만 가뭄으로 인한 피해를 줄이기 위하여 지역 가뭄 특성 파악이 중요하기 때문에 시군구 수준의 지역 단위로 분석을 실시하였다. 가뭄 시기별 지역적 분석을 위하여 2001년에 농업용수 뿐 아니라 생·공업용수 공급 피해를 입었던 동두천과 2008~2009년 장기간에 걸친 가뭄으로 인한 피해가 극심했던 태백을 대상 지역으로 선정하였다. 대상 지역으로 선정된 동두천과 태백에는 각 1개의 기상청 관할 기상관측소가 있다(Fig. 2).

2.1.1 동두천

동두천 지역은 경기도 북단에 위치하고 있으며, 대부분 산지로 이루어져 있다. 지역면적은 95.68 km²으로 경기도 면적의 0.9%이며, 산림면적은 65.4 km²로 지역의 68%를 차지하고 있다. 연강수량은 1,278.0 mm이며, 연평균 기온은 10.8°C이다(Dongducheon city, 2002).

동두천시의 상수원인 한탄강 유역 강우량이 예년 평균의 20%에도 미치지 못하였으며, 동두천 관측소의 3~5월 강우량은 28.2 mm로 관측되었다. 더불어 상류에 위치한 연천군의 농업용수 이용에 따라 하천의 수량이 감소되었으며, 연천댐의 철거로 용수 확보가 어려워졌다. 취수장의 상황이 악화되면서 생활용수 부족으로 인하여 일부 지역의 제한급수를 실시하였으며, 이후 취수장 가동이 전면 중단되는 등 수도물 공급이 완전히 끊겼다. 이에 급수차량 등을 이용하여 비상급수를 실시하였으며, 지방상수도물 수도권 광역상수도과 비상 연결하여 제한 급수가 해소되기 전까지 생활용수를 공급하였다. 동두천 산업단지는 용수공급 중단 이후 비상급수를 실시하였고, 공업용수 공급 재개 후 6월 중순에도 가동물은

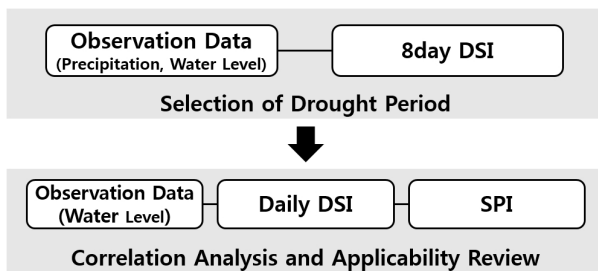


Fig. 1. Research Process in this Study

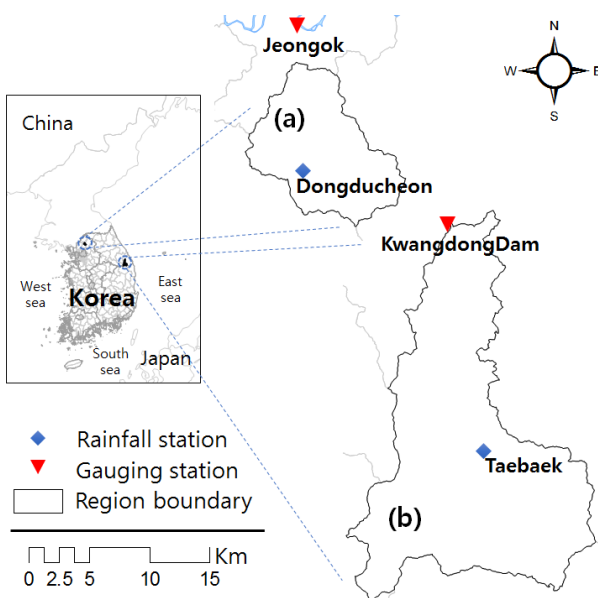


Fig. 2. Study Area. (a) Dongducheon, (b) Taebaek

30% 수준이었다. 또한 가뭄으로 인하여 수질 오염이 예년에 비하여 심각하였으며, 녹조류 발생 등으로 상수원의 수질이 악화되었다 (KICT, 2001; MOCT, 2002).

2.1.2 태백

태백 지역은 강원도 동쪽 남부에 위치하고 있으며, 고원 분지형 도시로 대부분 산지로 이루어져 있다. 지역면적은 303.53 km²으로 강원도 면적의 1.8%이며, 산림면적은 270 km²로 지역의 89%를 차지하고 있다. 연강수량은 1,304.4 mm이며, 연평균 기온은 8.6℃이다. 광동댐은 태백시 상수도 수원지이며, 지역 내 골지천의 상류에 위치하고 있다(Taebaek city, 2010).

2008년 가을부터 강우량이 급격히 줄어들어 2009년 1~4월 태백시 강수량은 전년도의 84%인 159.6 mm를 기록하는 등 심각한 가뭄 현상이 지속되었다. 2008년 11월 강수량 부족으로 광동댐의 수위가 점차 줄어들어 2009년 1월 제한급수를 시작하였고, 이에 따라 발생한 단수 지역에 가뭄기간 동안 차량을 이용한 비상급수가 실시되었다. 또한 비상급수 시 제공되는 식수 및 용수에 대하여 수질관리를 실시하였다. 3월 말 예년보다 많은 강우량인 57.6 mm의 비가 내려 4월부터는 태백시의 상수도 공급이 정상적으로 이루어졌으며, 제한 급수가 시작되고 87일 만에 해제되었다. 이후 태백시는 지방자치단체 차원에서는 처음으로 가뭄백서를 발행하였다(Taebaek city, 2009).

2.2 연구 자료

2.2.1 강수

본 연구를 위하여 기상 자료는 기상청 관측 자료를 이용하였으며,

대상 지역의 기준점으로 동두천 기상대와 태백 기상관측소를 선정하여 각 관측소의 강수량 자료를 수집하였다. 동두천 지역의 가뭄 기간인 2001년에는 봄 가뭄이 발생하였으며, 봄 가뭄의 경우 그 이전 해 강수량의 영향을 받게 된다. 따라서 가뭄 피해가 발생한 2001년뿐만 아니라 그 이전 해를 함께 살펴보았다. 태백 지역의 경우에도 2009년 주요 피해를 입었으나, 2008년 가을부터 강수량이 급격하게 줄어들어 2008년부터 2009년까지의 자료를 수집하여 분석을 실시하였다.

2.2.2 수자원 가용량

본 연구에서는 실제적 피해와 연계하기 위하여 지역의 수자원 가용량 자료를 활용하였다. 지역의 수자원 가용량을 정량화하기 위하여 하천 및 댐의 저수위 자료를 활용하였으며, 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)과 한강홍수통제소(HRFCO)에서 수집하였다. 동두천 지역의 경우 동두천시 북쪽에 위치한 한탄강의 전곡 수위관측소 수위 자료를 2000년 7월부터 2001년 6월까지 구축하였다. 또한 태백 지역은 지역 내 골지천 상류의 광동댐 저수위 자료를 이용하였으며, 2008년 7월부터 2009년 6월까지의 기간에 대하여 구축하였다.

2.2.3 MODIS DSI

2.2.3.1 MODIS

MODIS는 미항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 지구 관측 시스템(Earth Observing System, EOS)의 Terra 위성과 Aqua 위성에 탑재된 36개의 채널로 구성된 센서이며, 1일 2회씩 전지구의 표면을 관측하므로 일단위로

Table 1. Comparison of Study Area

	Dongducheon (2001)	Taebaek (2009)
Location	Northern Gyeonggi-do	Southernmost of Gangwon-do
Area (km ²) / Forest (%)	95.68 / 68	303.53 / 89
Household	25,884	22,292
Population	75,699	51,170
Annual Precipitation (mm)	1,278.0	1,304.4
Annual Mean Temperature (°C)	10.8	8.6
Drought Duration	March to June 2001 (Spring drought)	October 2008 - May 2009 (Fall · Winter · Spring drought)

Table 2. Data of Study Area

		Dongducheon	Taebaek
Rainfall	Weather Stations (Code)	Dongducheon (98)	Taebaek (216)
	Period	2000 - 2001	2008 - 2009
Water Level	Gauging Station (Code)	Jeongok (1022680)	KwangdongDam (1001210)
	Period	2000.07.01. - 2001.06.30.	2008.07.01. - 2009.06.30.

최대 4매의 영상 활용이 가능하다. MODIS 영상은 생물권의 광범위한 변화를 모니터링하기 위한 목적으로 운영 중이며 무료로 활용할 수 있다. 또한, MODIS 영상 제공을 위한 시스템이 국내를 비롯하여 전 세계적으로 구축되어 있어 육지, 해양, 대기 등 다양한 분야에서 가장 광범위하게 활용되고 있다(Park and Kim, 2009; Mu et al., 2013).

2.2.3.2 MODIS DSI

Mu et al. (2007; 2009; 2011)는 MODIS 자료를 이용하여 증발산량(Evapotranspiration, ET) 및 잠재증발산량(Potential

Evapotranspiration, PET)를 산정하고, MODIS ET 모델을 개발하였다. 이는 Terra와 Aqua 위성에 포함되어있다. Mu et al. (2013)는 ET 모델을 활용하여 원격 탐사 글로벌 가뭄지수인 DSI를 제시하였다. DSI는 MODIS의 ET/PET (MOD16), NDVI (MOD13) product와 NCEP/DOE Reanalysis II 자료를 활용한 것으로, 실시간 수준으로 전 세계적 규모에 대한 가뭄을 모니터링하고 감지한다. ET는 물, 탄소 및 에너지 사이클에 직접적으로 관련되어 있으며, ET와 PET의 비율은 습윤 또는 가뭄과 관련이 있어 일반적으로 지상의 물이용 지표로 사용된다. 또한 NDVI는 식물의 광합성 활동을 모니터링하며, 물 부족에 의한 식생의 반응을 보다 효과적으로 반영하는 특징을 가지고 있다. 이를 활용하여 표준화된 값으로 DSI가 계산되며, 전 세계적으로 2000년부터 2011년까지 총 12년에 걸쳐 시간단위별로 산정되었다. 불확실성을 테스트하기 위하여 NCEP-DOE II 글로벌 재분석 자료의 월 온도와 강수량 자료를 이용하였고, DSI의 정확성이 부분적으로 개선되어 관련된 모델의 불확실성을 완화하였다(Park and Kim, 2009; Mu et al., 2013; Zhang and Yamaguchi, 2014). DSI는 기본적으로 8일 간격 및 연간의 시간해상도와 0.05° 및 0.5°의 공간해상도로 제공되고 있으며, 사막이나 높은 산, 호수 또는 대도시와 같은 식물이 영구적으로 거의 없는 부분을 제외한 위도 80N부터 60S 지역에 대하여 제공된다. 또한, Table 3과 같이 정상 상태를 기준으로 양의 값(+∞)은 정상보다 습윤 상태이고, 음의 값(-∞)은 정상보다 건조한 상태를 나타낸다. DSI의 주요 목적은 가뭄 감지이지만 습윤 기간 역시 감지가 가능하다(Park and Kim, 2009; Mu et al., 2013; Orvos et al., 2014; Zhang and Yamaguchi, 2014). 자세한 DSI의 계산 방법은 Mu et al. (2013)를 통하여 확인할 수 있다.

가뭄은 일반적으로 지속적인 물 부족이 1개월 이상 지속되는 것이나 다양한 지역에서의 실시간 가뭄 모니터링을 위하여 주(week) 또는 8일(8day) 간격의 정보가 중요하다. 8일 간격의 DSI는 가뭄 기록, 기간, 습윤 혹은 건조 이벤트에 대하여 잠재적으로 더 높은 정확도를 제공할 수 있다(Mu et al., 2013). 따라서 본 연구에서는 NTSG (Numerical Terradynamic Simulation Group at the University of Montana)에서 제공하고 있는 MODIS 8일 간격 DSI의 0.05° 자료를 각 가뭄 기간에 따라 수집하였으며, 지역의 기준점을 중심으로 그리드를 선정하였다.

2.2.4 표준강수지수(SPI)

가뭄 상황 평가 및 공간적 분포를 파악하기 위해서는 가뭄의 상태를 정량화하여 나타낼 수 있어야 하며, 이를 위해 다양한 가뭄지수를 이용하고 있다. 다수의 연구에 활용되고 있는 가뭄지수로는 SPI, PDSI, SWSI, WADI 등이 있다. 그 중 SPI는 계산과정이 비교적 쉽고, 강수 부족만으로 가뭄을 직관적으로 판단할 수 있어

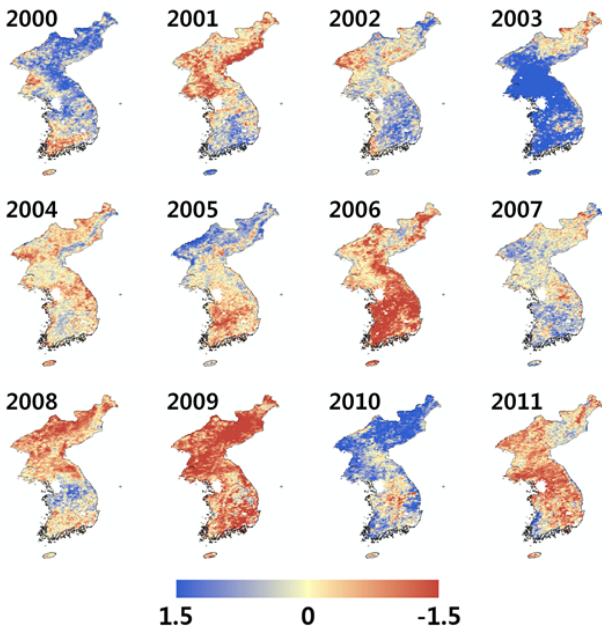


Fig. 3. MODIS Drought Severity Index (2000 - 2011)

Table 3. Drought Classification of the DSI and the SPI (Zhang and Yamaguchi, 2014)

Category	Description	DSI	SPI
W5	Extremely wet	1.5 ~	2.0 ~
W4	Very wet	1.2 ~ 1.49	1.5 ~ 1.99
W3	Moderately wet	0.9 ~ 1.19	1.0 ~ 1.49
W2	Slightly wet	0.6 ~ 0.89	0.5 ~ 0.99
W1	Incipient wet spell	0.3 ~ 0.59	-0.49 ~ 0.49
WD	Near normal	0.29 ~ -0.29	
D1	Incipient drought	-0.3 ~ -0.59	
D2	Mild drought	-0.6 ~ -0.89	-0.5 ~ -0.99
D3	Moderate drought	-0.9 ~ -1.19	-1.00 ~ -1.49
D4	Severe drought	-1.2 ~ -1.49	-1.5 ~ -1.99
D5	Extreme drought	~ -1.5	~ -2.0

다수의 연구에 활용되고 있다(Ryu et al., 2002; Park and Kim, 2009; Lee et al., 2015).

본 연구에서는 국내 가뭄 연구를 위한 DSI 자료의 활용성을 검증하기 위하여 기상학적 가뭄지수 중 SPI를 선정하였다. McKee et al. (1993, 1995)은 물 부족이 강수량의 감소에 의해 시작된다는 것에 착안하였으며, 강수량이 부족하면 각기 다른 용수공급원들에 영향을 미친다는 가정으로부터 SPI를 개발하였다. SPI는 특정 시간의 해당지점 강수량의 누가확률분포로 산출된다. 일반적으로 월별로 산출되어 3, 6, 9, 12개월의 누가강수량을 이용하여 시계열로 분석하였다. 하지만 최근 미국의 가뭄관리 기관인 NDMC에서도 일자료를 활용한 가뭄지수를 각 지역별 그리드 단위로 제공하고 있다. SPI 월자료와 일자료는 같은 개념으로, 일자료 역시 시간단위를 90일, 120일 등으로 하여 분석할 수 있다. SPI는 이론적으로 한계값이 없으며 발생빈도의 개념을 내포하고 있다 (Ryu et al., 2002).

DSI 자료와의 상관성을 분석하기 위해서는 일별 분석이 필요하다고 판단하여, SPI는 일자료를 이용하였다. 일별 SPI는 누적 강수량을 시계열로 계산한 다음, 일별로 L-moment 값을 산정하고 이 값을 이용하여 Gamma 분포와 표준정규누적분포의 역함수를 이용해서 산정한다. Eqs. (1) and (2)의 Gamma 분포의 확률밀도함수와 누적분포함수를 이용하여 대상 지역의 SPI를 산정하였다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(-\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \quad (1)$$

$$F(x) = \int_0^x f(x)dx = \int_0^x \frac{1}{\alpha\Gamma(\beta)} \left(-\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} \exp\left(-\frac{x}{\alpha}\right) \quad (2)$$

여기서, x 는 강수량 관련 확률 변수이며, α 는 축척매개변수, β 는 형상매개변수, $\Gamma(\beta)$ 는 Gamma 함수이다.

2.3 자료 상관관계 및 활용성 분석 방법

2.3.1 순위상관계수 분석

순위상관분석은 자료가 순서에 의한 척도인 경우에 사용하며, 스피어만 상관계수(Spearman correlation coefficient, ρ)는 두 변수의 순위간의 관계성을 나타낸다. 이는 Eq. (3)과 같이 계산되며, 범위는 -1에서 1사이이다. 두 변수의 순위가 완전히 일치하는 경우 1이고, 반대의 경우 -1이 된다. 변수의 분포와 상관없으며, 선형관계가 없더라도 관계성 분석이 가능하다.

$$\rho = 1 - \frac{6\sum D_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3)$$

여기서, D_i 는 x 변수 순위와 y 변수 순위의 차이이며, n 은 변수의 총 개수이다.

2.3.2 적중률(Hit ratio) 분석

적중률 분석은 관측(observation) 자료와 예측(forecast) 자료를 이용하여 예측 자료의 활용 가능성을 평가할 수 있다. 본 연구에서는 실제 관측된 저수위 자료를 기준으로 하여 각 가뭄 기간별로 DSI 자료의 적중률을 분석하였다. 수위 관측 자료의 가뭄 기준은 한강홍수통제소에서 제공하는 한국수문조사연보를 통하여 2001년 전곡수위관측소의 한탄강 저수위(0.18 m)와 2009년 광동댐 저수위(665.23 m)를 기준으로 하였다. 예측 자료는 Table 3의 DSI 분류에서 가뭄을 나타내는 D1 단계부터 D5 단계까지를 기준으로 하였다.

$$Hit\ ratio(\%) = \frac{N_{for.}}{N_{obs.}} \times 100 \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

3.1 DSI 결과 분석

본 연구에서 이용한 MODIS DSI는 8일 간격의 자료를 기본으로 하고 있다. 우리나라의 주요 가뭄 시기에 따라 자료 수집 기간을 선정하였으며, 봄 가뭄의 경우 그 이전 해부터 강수량이 부족하였던 경우가 많아 2000~2001년, 2008~2009년 자료를 수집하였다.

관측 자료 및 8일 간격 DSI 자료를 통하여 각 지역의 가뭄 기간을 선정하였으며 동두천 지역의 경우 2000년 7월부터 2001년 6월까지를 가뭄 기간으로 선정하고, 기간 중 가뭄이 집중되었던 6개월(2001년 1월~6월)을 함께 살펴보았다. 또한 태백 지역의 경우 2008년 7월부터 2009년 6월까지를 선정하고, 가뭄이 극심하였던 6개월(2008년 10월~2009년 3월)을 추가적으로 선정하였다.

본 연구에서는 각 지역 내 기준점을 중심으로 9개 그리드를

Table 4. Comparison of Study Area's DSI

		Dongducheon	Taebaek
Reference Point		Dongducheon observatory	Taebaek weather station
Total Grid (Effective Grid)		9 (6)	9 (9)
Average		0.35	-0.14
Maximum		2.29	2.01
Minimum		-1.97	-2.29
Data Period	1 Year	2000.07.01. ~ 2001.06.30.	2008.07.01. ~ 2009.06.30.
	6 Months	2001.01.01. ~ 2001.06.30.	2008.10.01. ~ 2009.03.31.

선정하였으며, 가뭄 기간에 대하여 자료 수집 및 분석을 실시하였다 (Table 4). 동두천 지역의 경우 유효 그리드는 6개로 나머지 부분은 식생이 부족하여 DSI 지도에 표현되지 않은 것으로 예상되었으며, 환경부 중분류 토지피복도(1:25,000)를 통하여 이 일대에 주거지, 상업지, 공공시설 등이 주로 분포되어 있는 것을 확인하였다. 동두천과 태백 지역의 1년 단위 기간 동안 평균값은 0.35와 -0.14였으며, 최저값은 각각 -1.97과 -2.29로 DSI 두 지역 모두 가뭄 분류에 따라 극심한 가뭄이 있었던 것을 볼 수 있다. 전반적으로는 태백 지역이 동두천 지역보다 좀 더 건조했던 것으로 나타났다(Fig. 4).

정확한 분석을 위하여 기존의 8일 간격 DSI를 일별 DSI로 산출하였다. 보간법은 측정되지 않은 2개 이상 점들의 값을 주위 측정값을 통하여 구하는 방법으로, 그 중 가장 간편한 선형보간법을 이용하였다(Fig. 5).

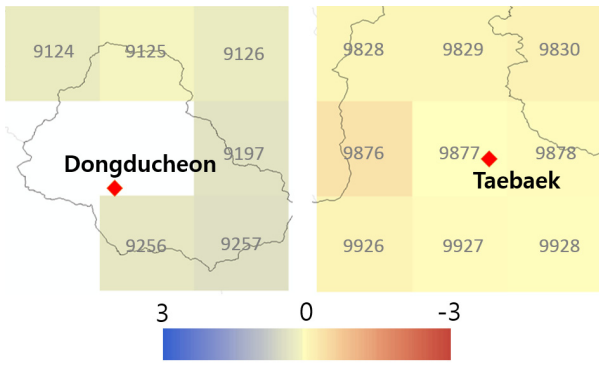


Fig. 4. DSI Grid in This Study

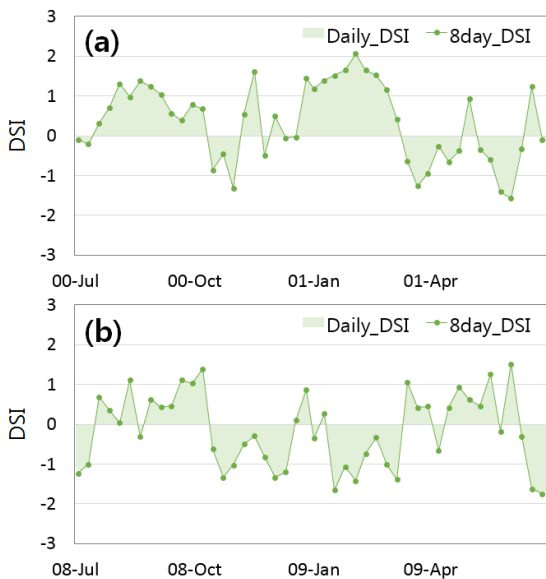


Fig. 5. 8 Days and Daily DSI. (a) Dongducheon, (b) Taebaek

3.2 상관성 분석

3.2.1 표준강수지수(SPI)와 상관관계 분석

본 연구에서 적용된 DSI와 SPI의 가뭄 분류는 Table 3과 같다. 1년 및 6개월 단위의 DSI 값을 사용하였으며, SPI는 30일, 60일, 90일, 180일의 시간단위별로 산출한 값을 사용하였다. 각 단위별로 가뭄지수의 상관성 분석을 위하여 스피어만 상관계수 분석을 실시하였다.

동두천 지역의 경우 1년 DSI의 순위상관 분석 결과, 30일 SPI와의 상관관계가 0.56으로 산정되었다. 가뭄이 집중되었던 6개월 DSI의 경우에는 대부분 0.70 이상으로 높게 나타났으며, 단위 기간 평균 0.64를 보인 30일 SPI와 상관관계가 가장 높은 것으로 나타났다. 태백 지역의 경우에는 90일 SPI와 상관관계가 상대적으로 높았으며, 1년 및 6개월 DSI와 상관성 분석 결과 각각 0.33과 0.40으로 분석되었다. 전반적으로 태백은 동두천에 비하여 낮은 상관관계를 가지는 것으로 산정되었다. Table 5와 같이 대부분 1년 DSI 보다 6개월 DSI가 비교적 높은 상관관계를 나타내고 있으며, 동두천 지역의 경우 그 차이가 뚜렷하게 나타났다. 그러나 태백 지역의 경우에는 평균적으로는 1년 DSI와의 상관관계가 더 높은 것으로 분석되었다.

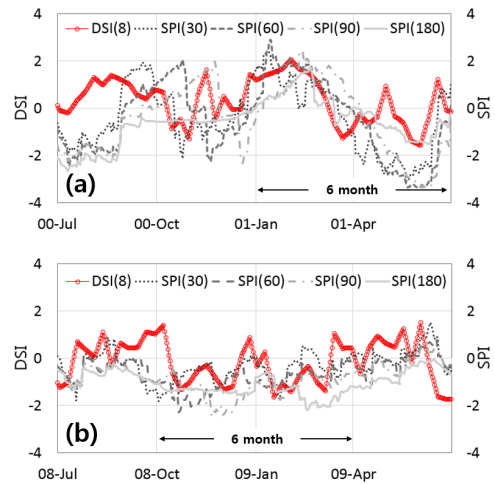


Fig. 6. Time Series Comparison of DSI and SPI. (a) Dongducheon, (b) Taebaek

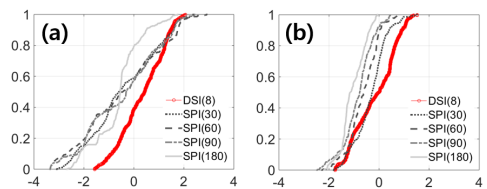


Fig. 7. CDF Comparison of DSI and SPI. (a) Dongducheon, (b) Taebaek

Table 5. Correlation Analysis of DSI and SPI

		DSI			
		Dongducheon		Taebaek	
		1 Year	6 Month	1 Year	6 Month
Spearman's Rank (R ²)	SPI(30)	0.56 (0.03)	0.71 (0.51)	0.15 (0.00)	0.22 (0.05)
	SPI(60)	-0.17 (0.12)	0.74 (0.54)	0.32 (0.14)	0.24 (0.06)
	SPI(90)	0.22 (0.12)	0.50 (0.25)	0.33 (0.16)	0.40 (0.16)
	SPI(180)	0.25 (0.10)	0.73 (0.54)	0.24 (0.12)	-0.02 (0.00)

3.2.2 수자원 가용성과 상관관계 분석

본 연구에서는 각 대상 지역의 1년 및 6개월 단위의 DSI와 수자원 가용량 자료인 수위 자료의 상관성 분석을 실시하였으며, 적중률 분석을 통하여 DSI 자료의 활용 가능성을 검토하였다. 동두천의 경우 동두천시의 북쪽에 위치한 한탄강의 전곡 수위관측소 자료를 적용하였으며, 태백은 지역 내 골지천의 상류에 위치한 광동댐 저수위 자료를 분석하였다.

동두천 지역의 1년 DSI와 전곡 수위 자료의 순위상관 분석 결과 0.47이었으며, 6개월 DSI와는 0.67로 비교적 높은 상관관계를 나타냈다. 태백 지역의 경우에는 전반적으로 동두천 지역에 비하여 상관관계가 낮았으며, 1년 및 6개월 DSI가 각각 0.23과 0.13으로 나타났다.

또한 적중률 분석을 실시한 결과, 동두천의 경우 1년 및 6개월 DSI가 각각 43.0%와 65.2%로 산정되었다. 태백의 경우에는 단위 기간 동안 평균 64.8%로 비교적 높게 나타났다. 전반적으로 6개월 DSI의 적중률이 65.7%였으며, 1년 DSI에 비하여 높은 적중률을 나타내었다(Table 6).

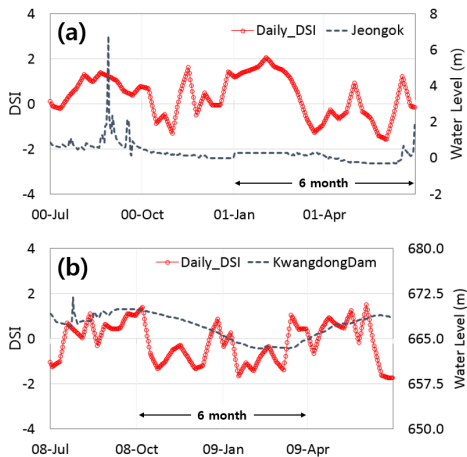


Fig. 8. Comparison of DSI and Water Level. (a) Dongducheon-Jeongok, (b) Taebaek-KwangdongDam

Table 6. Correlation Analysis of DSI and Water Level

	DSI			
	Dongducheon		Taebaek	
	1 Year	6 Month	1 Year	6 Month
Spearman's Rank (R ²)	0.47 (0.22)	0.67 (0.45)	0.23 (0.05)	0.13 (0.02)
Hit Ratio (%)	43.0	65.2	63.3	66.3

4. 결론

본 연구에서는 최근 국내외에서 다양하게 이용되고 있는 위성영상 자료인 MODIS DSI를 활용하여 SPI 혹은 수자원 가용량 간의 상관관계를 비교 분석하고, 최종적으로 DSI 자료의 활용성을 검토하고자 하였다.

첫째, 2000년 이후 우리나라 주요 가뭄이었던 2001년과 2008~2009년의 가뭄을 대상으로 비교 및 분석을 수행하였다. 지역 가뭄 특성 파악을 위하여 시군구 수준의 지역 단위로 동두천과 태백 지역을 연구 지역으로 선정하여 분석을 실시하였다.

둘째, 위성영상 자료는 NTSG의 MODIS DSI로 다수의 가뭄 연구에서 활용된 증발산량과 NDVI 자료를 활용하였다. 8일 간격 DSI의 0.05° 공간해상도 자료를 각 대상 지역의 가뭄 기간에 따라 추출하였다. 각 지역에 대한 기준점을 중심으로 9개 그리드를 선정하였으며, 이를 선형보간법을 통해 일별 DSI를 산정하였다. DSI와 각 자료간의 상관관계를 검토하기 위하여 DSI는 1년 및 6개월로 가뭄 기간을 구분하여 분석을 실시하였다.

마지막으로, 대상 지역별로 DSI 자료에 대하여 SPI와 수자원 가용량 자료를 통하여 분석을 수행하였으며, 활용성을 검토하였다. 동두천 지역의 경우 30일 SPI와 DSI가 비교적 상관관계가 높은 것으로 나타났으며, 1년 및 6개월 각각 0.56과 0.71로 나타났다. 또한 수위 자료와의 상관성 분석에 따르면 6개월 DSI가 0.67로 1년 DSI에 비하여 비교적 상관성이 높게 나타났다. DSI 가뭄 예측(DSI -0.3 이하)과 2001년 전곡 지점의 관측 저수위(0.18 m)를 비교한 결과 54.1%의 적중률을 보였다. 태백 지역의 경우 동두천 지역에 비하여 SPI 및 수위 자료와 낮은 상관관계를 보였다. 90일 SPI와의 상관관계는 단위 기간별로 0.33과 0.40으로 분석되었으며, 동두천과 달리 평균적으로 1년 DSI와의 상관관계가 더 높게 나타났다. DSI 예측 값과 2009년 광동댐 지점의 관측 저수위(665.23 m)를 비교한 결과 1년 및 6개월 DSI 각각 적중률이 63.3%와 66.3%로 산정되었다.

본 연구를 통하여 최근 개발된 위성영상 자료 기반의 전 지구적 가뭄지수인 DSI와 기상학적 가뭄지수인 SPI의 상관성을 제시할 수 있었다. 또한 적중률 분석을 실시한 결과, 6개월 DSI가 평균

65.7% 수준의 적중률을 보여 국내 연구 활용 가능성을 확인할 수 있었다. 따라서 향후 국내 가뭄 모니터링을 위한 연구에서 DSI 자료 활용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 DSI 자료는 8일 간격의 시간해상도 등의 한계를 가지고 있어 정확한 가뭄 파악을 위해서는 다양한 가뭄인자들과 함께 고려되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리사업(15AWMP-B082564-02)과 한국기상산업진흥원 기상See-At기술개발사업(KMIPA2015-6180)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, S. R., Lee, J. W. and Kim, S. J. (2014). "Analysis of 2012 spring drought using meteorological and hydrological drought indices and satellite-based vegetation indices." *KCID journal*, KCID, Vol. 21, No. 1, pp. 78-88 (in Korean).
- Anderson, M. C., Hain, C., Otkin, J., Zhan, X., Mo, K., Svoboda, M., Wardlow, B. and Pimstein, A. (2013). "An intercomparison of drought indicators based on thermal remote sensing and NLDAS-2 simulations with U.S. drought monitor classifications." *Journal of Hydrometeorology*, American Meteorological Society, Vol. 14, No. 4, pp. 1035-1056.
- Bae, D. H. and Son, K. H. (2013). "Utilization of satellite data for drought monitoring." *Disaster & Safety*, NDMI, Vol. 15, No. 3, pp. 71-76 (in Korean).
- Choi, M. H. and Kim, H. U. (2010). "Utilization of satellite imagery in hydro-meteorological sector." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 10, No. 1, pp. 40-43 (in Korean).
- Dai, A. (2011). "Characteristics and trends in various forms of the Palmer drought severity index during 1900-2008." *Journal of Geophysical Research*, American Geophysical Union, Vol. 116, D12115, doi:10.1029/2010JD015541.
- Dongducheon city (2002). *The statistical year book of Dongducheon* (in Korean).
- Ji, L. and Peters, A. J. (2003). "Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices." *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, Vol. 87, No. 1, pp. 85-98.
- Kim, G. S. and Lee, J. W. (2011). "Evaluation of drought indices using the drought records." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 8, pp. 639-652 (in Korean).
- Kim, M. S. and Moon, Y. I. (2014). "A study on target standardized precipitation index in Korea." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 34, No. 4, pp. 1117-1123 (in Korean).
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2001). *The 2001 great drought in the central region of Korea* (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2012). *Development of hydro-meteorological early warning system for response to climate change* (in Korean).
- Korea Meteorological Administration (KMA). Available at: <http://www.kma.go.kr/> (Accessed: April 15, 2015).
- Lee, B. R., Sung, J. H. and Chung, E. S. (2015). "Comparison of meteorological drought and hydrological drought index." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 48, No. 1, pp. 69-78 (in Korean).
- Lee, J. H. and Lee, G. J. (2006). "Establishment of national drought management information system." *Magazine of Korea water resources association*, KWRA, Vol. 39, No. 3, pp. 29-36 (in Korean).
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kliest, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." *8th Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, pp. 179-184.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kliest, J. (1995). "Drought monitoring with multiple time scales." *9th AMS Conference on Applied Climatology*, Dallas, Texas.
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT) (2002). *Drought research report 2001* (in Korean).
- Mu, Q., Heinsch, F. A., Zhao, M. and Running, S. W. (2007). "Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data." *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, Vol. 111, No. 4, pp. 519-536.
- Mu, Q., Jones, L. A., Kimball, J. S., McDonald, K. C. and Running, S. W. (2009). "Satellite assessment of land surface evapotranspiration for the pan-Arctic domain." *Water Resources Research*, American Geophysical Union, Vol. 45, 09420, doi:10.1029/2008WR007189.
- Mu, Q., Zhao, M. and Running, S. W. (2011). "Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm." *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, Vol. 115, No. 8, pp. 1781-1800.
- Mu, Q., Zhao, M., Kimball, J. S., McDowell, N. G. and Running, S. W. (2013). "A remotely sensed global terrestrial Drought Severity Index." *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, Vol. 94, No. 1, pp. 83-98.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (1999). *NOAA's top global weather, water and climate events of the 20th century*, NOAA, Available at: <http://www.noaanews.noaa.gov/stories/s334.htm> (Accessed: June 5, 2015).
- Numerical Terradynamic Simulation Group at the University of Montana (NTSG). Available at: <http://www.ntsug.umt.edu/> (Accessed: April 10, 2015).
- Oh, S. B., Kim, D. W., Choi, K. S. and Byun, H. R. (2010). "Introduction of east asian drought monitoring system." *SOLA*, Meteorological Society of Japan, Vol. 6A, pp. 9-12.
- Orvos, P. I., Homonnai, V., Várai, A., Bozók, Z. and Jánosi, I. M. (2014). "Trend analysis of a new MODIS drought severity index with emphasis on the carpathian basin." *IDOJARAS*, Hungarian Meteorological Service, Vol. 118, No. 4, pp. 323-333.
- Park, J. S. and Kim, K. T. (2009). "Evaluation of MODIS NDVI for drought monitoring : Focused on comparison of drought index."

- The Journal of GIS Association of Korea*, KSIS, Vol. 17, No. 1, pp. 117-129 (in Korean).
- Ryu, J. H., Lee, D. R., Ahn, J. H. and Yoon, Y. N. (2002). "A comparative study on the drought indices for drought evaluation." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, Vol. 35 No. 4, pp. 397-410 (in Korean).
- Shin, S. C. and Eoh, M. S. (2004). "Analysis of drought detection and propagation using satellite data." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 4, No. 2, pp. 61-69 (in Korean).
- Sur, C. Y., Kim, K. J., Choi, W. J., Shim, J. H. and Choi, M. H. (2014). "Drought assessments using satellite-based drought index in Korea; Southern region case in 2013." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 14, No. 3, pp. 127-131 (in Korean).
- Taebaek city (2009). *Taebaek drought White Paper*. 72-4220000-000039-01 (in Korean).
- Taebaek city (2010). *The statistical year book of Taebaek* (in Korean).
- Water Resources Management Information System (WAMIS). Available at: <http://www.wamis.go.kr/> (Accessed: May 7, 2015).
- Willhite, D. A. (2000). *Drought: A Global Assessment (Volumes 1 and 2)*, Routledge Publishers, London.
- Willhite, D. A. and Glantz, M. H. (1985). "Understanding: The drought phenomenon: The role of definitions." *Water International*, Taylor & Francis, Vol. 10, No. 3, pp.111-120.
- Yang, B., Wang, Q., Wang, C., Wan, H., Yang, Y., Cha, Y., Le, C., Liu, X. and Li, J. (2010). "Drought monitoring in North China using HJ-1 satellite remote sensing data." *Sixth International Symposium on Digital Earth: Data Processing and Applications*, SPIE, Vol. 7841, Washington.
- Yoo, J. Y., Choi, M. H. and Kim, T. W. (2010). "The utilization of MODIS LST imagery for droughts monitoring in the Korean peninsula." *Magazine of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, pp. 350-353 (in Korean).
- Zhang, X. Q. and Yamaguchi, Y. (2014). "Characterization and evaluation of MODIS-derived Drought Severity Index (DSI) for monitoring the 2009-2010 drought over southwestern China." *Natural Hazards*, Springer Netherlands, Vol. 74, No. 3, pp. 2129-2145.