

미계측지역의 위성강우 기반 가뭄감시 평가

Evaluation of Drought Monitoring Using Satellite Precipitation for Un-gaged Basins

장상민* · 윤선권* · 이성규** · 이태화*** · 박경원*,†

Jang, Sangmin · Yoon, Sunkwon · Lee, Seongkyu · Lee, Taehwa · Park, Kyungwon

Abstract

This study analyzed the applications of near real-time drought monitoring using satellite rainfall for the Korean Peninsula and un-gaged basins. We used AWS data of Yongdam-Dam, Hoengseong-Dam in Korea area, the meteorological station of Nakhon Rachasima, Pak chong for test-bed to evaluate the validation and the opportunity for un-gaged basins. In addition, we calculated EDI (Effective doought index) using the stations and co-located PERSIANN-CDR, TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) TMPA (The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis), GPM IMERG (the integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) rainfall data and compared the EDI-based station data with satellite data for applications of drought monitoring. The results showed that the correlation coefficient and the determination coefficient were 0.830 and 0.914 in Yongdam-dam, and 0.689 and 0.835 in Hoengseong-Dam respectively. Also, the correlation coefficient were 0.830, 0.914 from TRMM TMPA datasets and compasion with 0.660, 0.660 based on PERSIANN-CDR and TRMM data in nakhon and pakchong station. Our results were confirmed possibility of near real-time drought monitoring using EDI with daily satellite rainfall for un-gaged basins.

Keywords: EDI; GPM IMERG; PERSIANN-CDR; satellite rainfall; TRMM

1. 서 론

최근 급변하는 기후변화와 이상기상 현상의 영향으로 홍수, 태풍, 산사태, 폭설, 가뭄, 산불 등 대규모 자연재해가 과거에 비해 빈번히 발생하고 있으며, 그 피해규모가 점차 대형화·광역화되고 있는 추세이다 (NDMI, 2014). 특히, 가뭄의 경우, 홍수 등의 다른 수문학적 재해에 비해 진행 속도가 느리지만, 상대적으로 장기간에 걸쳐 광역적으로 피해를 유발하여 그 피해가 심각한 것으로 나타나고 있다. 최근 국내에서도 2014년과 2015년에는 평년보다 절반 수준에 미치지 못하는 강우량으로 인해 강원·영서를 비롯한 경기북부 지방을 중심으로 43년 만에 극심한 가뭄이 초래되었으며, 사회적으로 미치는 영향이 계속 심화되고 있다고 보고된 바 있다 (Son et al., 2015; Baek et al., 2016).

가뭄은 시작과 종료를 정의하기 어렵기 때문에 지금까지의

가뭄과 관련된 연구는 가뭄을 정량화하여 지수로 나타내는 가뭄지수 연구와 가뭄을 정의하기 위한 기준을 제시하거나 만들어진 기준을 바탕으로 가뭄 진행 단계를 파악하기 위한 연구들이 주로 이루어졌다 (Kwon, 2006; Kwon et al., 2007; Park et al., 2011; Shin et al., 2015). 현재 국내에서는 기상청, 수자원공사, 농촌진흥청 등의 유관기관에서는 주로 지점자료를 이용하여 팔머가뭄심도지수 (Palmer Drought Severity Index, PDSI), 표준강수지수 (Standard Precipitation Index, SPI), 유효가뭄지수 (Effective Drought Index, EDI), 정상강우비율 (Percent of Normal), Soil Moisture Index (SMI), Crop Moisture Index (CMI) 등의 가뭄지수 지도를 산출하고, 이를 기반으로 가뭄 상황을 모니터링 하고 있으나, 지점자료 기반의 가뭄지수는 공간해상도 측면에서 품질이 떨어지고 정량적으로 표현된 수치의 시간적 변동성을 고려하기 어려우므로 연속적인 가뭄 모니터링에 있어 한계를 가지고 있다 (Jeong et al., 2017).

최근 기상 및 수자원 분야에서 인공위성 자료의 활용성이 증대되면서, 지점자료의 시·공간적인 한계점을 보완하기 위해서 인공위성 자료를 활용한 가뭄 분석 연구가 활발하게 이루어지고 있다 (Jeong and Shin, 2006; Ghulam et al., 2007; Gu et al., 2007; Wang and Qu, 2007; Karnieli et al., 2010; Shin et al., 2015). 인공위성 자료를 이용할 경우 광범위한 지역을 대상으로 하여 가뭄 평가를 할 수 있고, 시·공간적으로 균일한 자료를 확보할 수 있으므로 장기간에 걸친 가뭄 모니

* Climate Application Department, APEC Climate Center
** Climate Prediction Department, APEC Climate Center
*** School of Agricultural Civil & Bio-Industrial Engineering, Kyungpook National University
† Corresponding author
Tel.: +82-51-745-3982 Fax: +82-51-745-3999
E-mail: kwpark@apcc21.org

Received: December 19, 2017

Revised: December 28, 2017

Accepted: December 28, 2017

터링을 할 수 있는 장점이 있으나, 인공위성의 관측방법에 따라 지상 실측자료에 비해 시·공간해상도가 낮고, 관측 당시의 대기 상태, 관측센서, 시·공간적 대표성 문제 등으로 많은 불확실성을 포함하고 있다(Jang et al., 2017). 또한 보다 정확한 가뭄지수를 산출하기 위해서는 30년 이상의 장기간의 강우 자료가 필요하지만, 1998년 최초로 기상레이더를 탑재한 TRMM (Tropical Rainfall Measurement Mission) 위성이 발사되기 전에는 PERSIANN-CDR (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks-Climate Data Record)과 같이 정지궤도 위성자료를 이용하여 강우량을 간접적으로 추정하는 방법이 이용되었다.

위성 기반의 강우추정에 대한 불확실성을 보완하기 위한 목적으로 미국 항공우주국 (National Aeronautics and Space Administration: NASA)은 1998년 최초로 기상레이더를 탑재한 TRMM 위성을 발사하였으며, 그 이후로 TRMM 위성 과 협력위성으로 3시간, 25 km의 해상도를 가지는 TRMM TMPA (The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis) 자료를 생산 및 제공하고 있으며, 2014년 TRMM의 후속위성으로 발사된 GPM (Global Precipitation Measurement) 위성을 핵심위성으로 한 다중 위성자료를 이용하여 전지구적으로 30분 간격, 10 km 해상도의 GPM IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM)를 생산 및 제공하고 있다.

따라서 본 연구에서는 PERSIANN-CDR, TRMM TMPA, GPM IMERG 등의 위성 기반으로 추정된 강우 자료의 활용

성을 검토하기 위해 한반도와 미계측지역을 대상으로 EDI 가뭄지수를 산출하고, 그 적용성을 평가하였다.

II. 자료 및 방법

1. 연구 자료

가. PERSIANN_CDR 자료

최초로 강우레이더를 탑재하고 발사된 TRMM 위성 이전에는 강수관측 목적의 위성자료가 없기 때문에, UCI (University of California, Irvine)의 CHRS (The Center for Hydrometeorology and Remote Sensing) 센터는 정지궤도 위성에서 간접적으로 산출한 위성강우 자료를 GPCP자료로 보간하고, 신경회로망 (Neural Network) 방법을 적용하여 25 km × 25 km 공간해상도와 3시간의 시간해상도를 가지는 PERSIANN-CDR 자료를 생성하여 제공하고 있다. 자료는 Fig. 1과 같이 북위 60°에서 남위 60°까지 1983년 1월부터 2015년 12월 31일까지 자료를 제공하고 있다.

나. TRMM 3B42 자료

TRMM 위성은 세계최초로 기상레이더를 탑재하여 3차원 강수 정보 제공이 가능한 위성으로 (Fig. 2), 미국 NASA와 일본 우주항공연구개발기구 (Japan Aerospace eXploration Agency: JAXA)가 합작으로 1997년에 발사하여 성공적으로

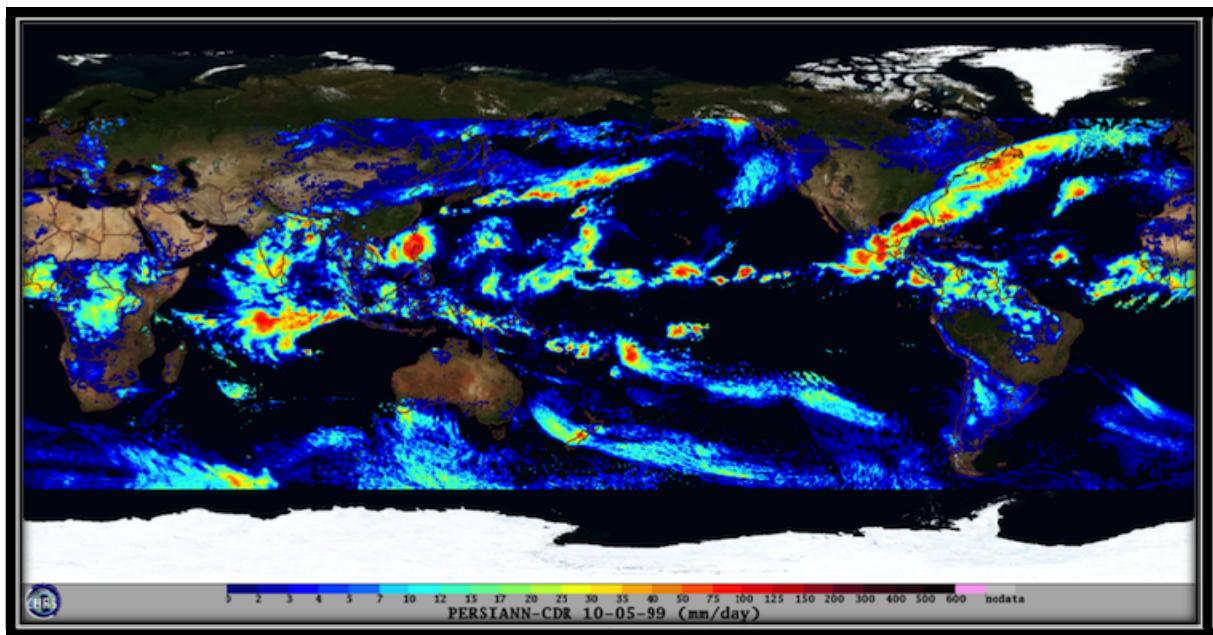


Fig. 1 PERSIANN-CDR daily rainfall at October, 5, 1999 (www.ncdc.noaa.gov/cdr/atmospheric/precipitation-persiann-cdr)

임무를 수행하였으며, 최종적으로 2015년 4월 연료를 다 소진함으로써 임무를 마쳤다. TRMM TMPA 자료는 TRMM 위성의 PR (Precipitation Radar), TMI (TRMM Microwave Imager) 센서에서 산출되는 강우량값과 MTSAT, GOES 등 정지궤도 위성 강우 자료와 수동 마이크로파 센서정보를 이용 GPROF방식의 산출된 협력위성강우 자료의 보정을 통하여 북위 50°에서 남위 50°까지 3시간, 25 km × 25 km의 격자화 자료 (3B42)와 월자료 (3B43)를 생산 제공한다. 자료는 HDF4형태로 제공되며, 향후 GPM IMERG자료로 이어져서 지속적인 자료를 제공하게 된다. 1998년부터 2014년 자료를 수집하여 데이터베이스화 하였다.

다. GPM IMERG 자료

TRMM 후속위성으로 발사된 GPM 위성은 세계 최초로 14, 35 GHz 듀얼레이더와 TRMM TMI보다 더 많은 채널과 센서정보가 고도화된 GMI (GPM Microwave Imager)가 탑재되어 2014년에 발사되어 현재 운영중에 있다. 강수정보를 제공하는 GPM IMERG 자료는 위성궤도에 따라 제공하는 Level 2 자료와 달리 7개의 위성 11개의 센서에서 제공하는 강우량값과 정지궤도에서 산출되는 강우량 값을 결합하여 10 km의 지상해상도와 30분 시간 해상도를 가지고 자료를 제공한다 (Table 1). 자료는 최종적으로 지상관측자료와 보정하여 Latency 4개월 후에 제공하는 Final run product를 데이터

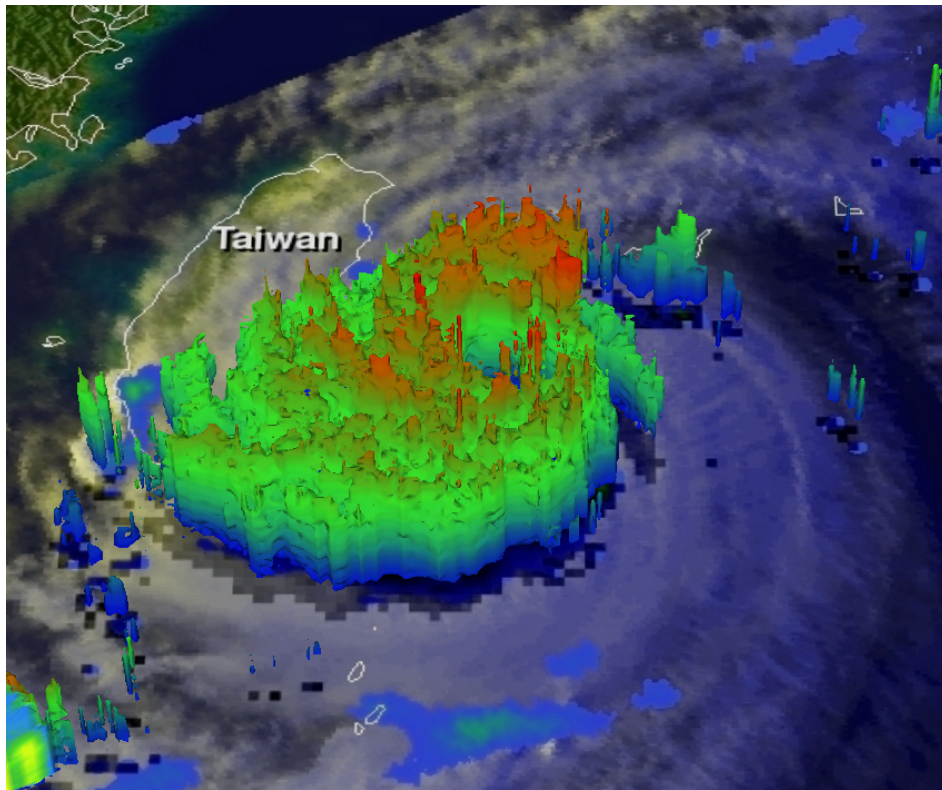


Fig. 2 3-D view of TRMM precipitation radar for Tembin Typhoon on August 23, 2012 (pmm.nasa.gov)

Table 1 GPM IMERG Product

Resolution	Regions-Dates	Latency	Format
0.1°~30 minute	Gridded, 60N-60S March 2015 to present	6 hours (NRT/early run)	HDF5
0.1°~30 minute	Gridded, 60N-60S March 2015 to present	18 hours (NRT/late run)	HDF5
0.1°~30 minute	Gridded, 60N-60S March 2014 to present	4 months (final run)	HDF5/NETCDF
0.1°~Monthly	Gridded, 60N-60S March 2014 to present	4 months (final run)	HDF5

베이스화 한 후 이용하였다. 최종적으로 준실시간(Near Real-time) 가뭄 모니터링을 하기 위해서는 latency 18시간 이후의 late run 자료를 이용하면 된다. 2014년부터 현재 시점까지 자료를 제공하고 있다.

2. 연구 방법

가. EDI 지수 산출

역사적으로 가장 많이 사용된 가뭄 지수는 PDSI이다. PDSI는 토양습기의 편차를 수치로 제공할 수 있으나, 계산의 복잡성, 부정확한 경험식, 미국 중서부 지역 자료를 토대로 이루어진 여러 가정들 때문에 최근 기후학적 가뭄 연구들에서 사용빈도가 점차 줄어드는 추세이다 (Alley, 1984; Akinremi and McGinn, 1996; Guttman, 1998; Keyantash and Dracup, 2002; Narasimhan, 2004). 그 대체적인 지수로써 최근 SPI가 많이 가뭄 연구들에서 많이 사용되고 있다. SPI는 특정기간 동안 평균 강수량의 편차를 표준화시킨 것으로, 1개월에서 48개월까지 매우 다양한 시간 규모에 대해 강수 부족분을 고려할 수 있으며, PDSI보다 계산과정이 간단하고 정확도면에서 PDSI보다 SPI가 우수하다는 평가를 받고 있다. 그러나, 월 단위로 계산되기 때문에 현재 가뭄 상태를 알기 위해서는 한 달의 강수 통계치가 완성되는 날까지 기다려야 한다는 단점이 있다 (Kim, 2010). 이러한 한계를 극복하기 위하여 Byun and Wilhite (1999)에 의해 EDI가 제안되었다. EDI는 강수로 인해 생긴 수자원을, 시간에 따른 유출 및 증발로 인한 손실을 고려하여 일 년 이상의 기간 동안 합산하여 가용수자원을 산출하고, 이를 평년치와 비교하여 가뭄강도를 계산한다. 강수량만을 이용하여 일별 가뭄의 정도를 파악할 수 있고 계산과정이 간단한 장점이 있다 (Oh et al., 2011).

$$EP_i = \sum_{n=1}^i \left[\left(\sum_{m=1}^n P_m \right) / n \right] \quad (1)$$

$$DEP = EP - MEP \quad (2)$$

$$EDI = DEP / ST(DEP) \quad (3)$$

Eq. (1)에서 EP (Effective Precipitation)는 특정일로부터 365일 동안의 누적강수량을 의미하며, P_m은 특정일로부터 m일전의 일강수량을 나타낸다. i는 강수량 합산 기간을 나타내며, 최소 365일 이상의 값을 가진다. Eq. (2)를 통해서 EP의 기후학적 평균(MEP)과 편차(DEP)를 계산할 수 있다. 이후 DEP의 표준편차(ST)를 이용하여 표준화시켜 지수화한다. DEP가 음일 경우, 이 값은 평균보다 건조한 것을 의미하며, DEP가 음인 날이 지속될 경우, 강수량 합산과정에서 그 일수

Table 2 Drought classification by EDI

Effective Drought Index	Category
EDI > 2.5	Extremely wetter
1.5 < EDI ≤ 2.5	Severely wetter
0.7 < EDI ≤ 1.5	Moderately wetter
0 < EDI ≤ 0.7	Weak wet (Normal)
-0.7 < EDI ≤ 0	Weak drought (Normal)
-1.5 < EDI ≤ -0.7	Moderately drier
-2.5 < EDI ≤ -1.5	Severely drier
EDI ≤ -2.5	Extremely drier

를 365일에 더하여 다시 계산한다. EDI 지수는 Table 2와 같이 음의 값일수록 가뭄이 강함을 의미한다.

PERSIANN-CDR, TRMM TMPA, GPM IMERG 등의 위성 기반으로 추정된 강우 자료를 이용하여 일별 강우자료로 산출하고, 수평 5 km 해상도로 상세화하여 EDI 가뭄지수를 산출하였다.

나. 대상유역

본 연구에서는 위성 강우 자료를 이용하여 일 단위(Daily) 실시간 가뭄모니터링을 실시하고, 수문학적 가뭄과 연계한 위성가뭄 모니터링 시스템구축을 실시하고자 해당 담유역을 대상지역으로 선정하였다. 위성으로부터 관측·가공한 가뭄 모니터링 정보와 담 유입량 정보를 검증(Calibration)할 수 있는 계측지역과, 수문학적 가뭄감시를 위한 토양수분자료의 보정(Validation)이 용이한 지역을 대상 유역으로 선정하였다. 또한 공간분포 강수량의 차이가 비교적 적게 발생하는 중·소규모 담 유역을 우선적으로 고려하였으며, 해당 담 유역으로 선정된 곳은 북한강 상류 지역에 위치하고 있는 횡성담 유역과 금강 상류 지역에 위치하고 있는 용담담 유역이다.

횡성담은 북한강 상류 강원도 횡성군 갑천면 대관대리에 위치한 중앙차수벽형 석괴담이며, 길이 205 m, 높이 48.5 m, 유역면적은 209 km², 총 저수량 8천 6백 90만 ton의 비교적 소규모 담에 해당한다. 또한 9백 50만 ton의 홍수조절능력을 갖추고 있으며, 연간 10.4 Gwh의 전기에너지도 생산·공급하고 있다. 그리고 용담담은 전라북도 진안군 용담면 월계리에 위치하고 있으며, 금강 최상류지역에 해당한다. 높이 70 m, 길이 498 m, 총저수량 8억 1500만 ton의 콘크리트 차수벽형 석괴담이며, 연평균강수량은 1,230 mm, 연평균유입량은 3,220 백만 ton이다. 다음 Fig. 3은 횡성담과 용담담 유역도를 나타내고 있다.

국가수자원관리 종합정보 홈페이지(WAMIS, <http://www.wamis.go.kr/>)에서 제공하는 용담담과 횡성담의 일단위 강우

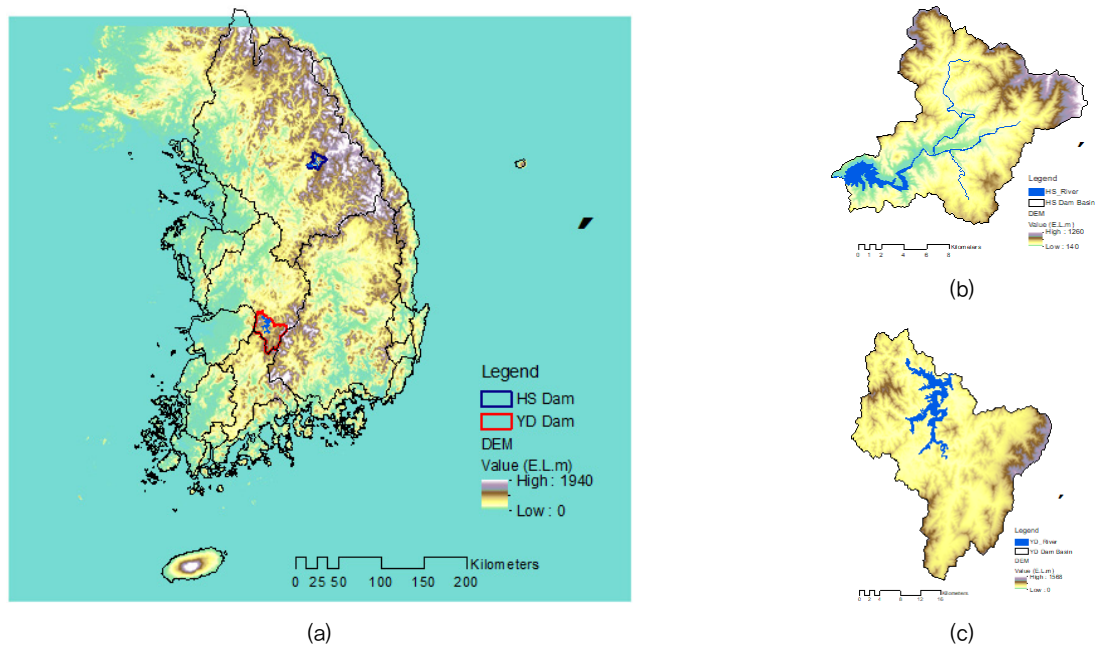


Fig. 3 The locations of study area (b) and (c) show Hoengseong and Yongdam Dam in South Korea, respectively

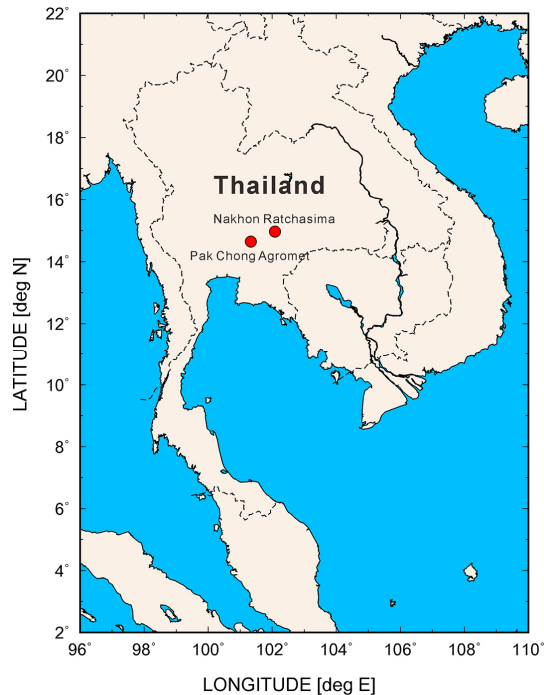


Fig. 4 The ground meteorological station of Nakhon Ratchasima and Pak Chong Agromet

량 자료를 수집하여 시계열 자료로 데이터베이스화 하여 EDI 가뭄지수를 산출하고, 이를 활용하여 위성 강우자료를 기반으로 추정된 EDI 지수를 검증하였다.

또한, 위성강우 기반 가뭄 감시의 가장 큰 장점 중의 하나인 미세측 유역에 대한 적용 가능성을 확인하기 위하여 최근 가뭄이 발생하였고, 자료확보가 용이한 태국 북서부 지역의 람타콩 (Lam Takhong) 소유역을 테스트베드로 선정하였다. 람타콩 소유역에는 태국 기상청의 기상관측소 2개가 있으며, 각각의 관측소는 Nakhon rachasima station과 Pak Chong Agromet가 관개지역 하류와 상류에 위치하고 있으며, 이곳의 자료를 수집하여 시계열 자료로 이용하였다 (Fig. 4).

PERSIANN-CDR과 TRMM TMPA 강우자료의 활용성 평가를 위해 Nakhon Ratchasima, Pak Chong Agromet 관측 지점의 위치에 해당하는 그리드 좌표에 대한 두 종류의 위성 강우 자료 DB를 구축하였다. 첫번째는 1983년부터 1997년까지는 PERSIANN-CDR 자료를 이용하고, 1998년부터 2007년도까지는 TRMM TMPA 자료를 연속적으로 구축하였고, 두번째는 1998년부터 2007년도까지 TRMM TMPA 위성자료 단독으로 DB를 구축하여 EDI 지수를 산출하였다.

III. 분석 결과

1. 국외 EDI 산출 비교 결과

위성강우 기반 가뭄 감시의 가장 큰 장점 중의 하나인 미세측 유역에 대한 적용 가능성을 확인하기 위하여 태국 북서부 지역의 관측 자료를 수집하여 EDI 지수를 산출하고, 이를

PERSIANN-CDR과 TRMM TMPA로 연속된 자료 DB와 TRMM TMPA 자료만으로 산출된 EDI 지수를 비교하였다.

Fig. 5는 PERSIANN-CDR과 TRMM TMPA 자료로 산출된 EDI 지수와 Nakhon Ratchaima와 Pak Chong Agromet 지점의 관측 자료로 산출된 EDI 지수 비교 결과를 나타낸 것이다. Nakhon Ratchaima 지점의 경우 상관계수와 결정계수는 0.440와 0.194, Pak Chong Agromet 지점의 경우 0.476과 0.226으로 나타났다. Nakhon Ratchaima 지점보다 Pak Chong Agromet 지점의 결과가 상대적으로 높게 나타났으나, 두 지점 모두 정확도는 낮게 나타났다 (Fig. 5).

TRMM TMPA (1998년~2007년)의 위성 자료만으로 구축한 DB를 이용하여 EDI 지수를 산출한 결과와 Nakhon Ratchasima, Pak Chong Agromet 관측지점의 강우량으로 산출한 EDI 지수를 검증해본 결과, Nakhon Ratchasima 관측지점의 상관계수와 결정계수는 0.794, 0.630 Pak Chong Agromet

관측지점의 상관계수와 결정계수는 0.657, 0.431로 PERSIANN-CDR과 TRMM으로 구성된 DB의 EDI 지수 결과보다 정확도가 크게 높았다 (Fig. 6). 이는 PERSIANN-CDR의 기본 정지궤도 위성기반으로 산출된 강우량 보다 위성 최초로 탑재된 Ku (14 GHz)밴드의 핵심위성과 그 외의 라디오미터 위성에 정확도가 높은 센서들이 탑재되어 나타난 결과로 판단된다. 따라서 TRMM 위성보다 더 정확한 DPR (Dual Precipitation Radar) 센서를 탑재하고 10개에 이르는 보조위성으로 산출되는 GPM IMERG 데이터 값들을 EDI 지수 산출에 이용한다면 준실시간 가뭄감시 시스템으로 충분히 미계측지역인 태국에 이용 가능할 것으로 판단된다.

2. 국내 EDI 산출 비교 결과

2001년부터 2016년까지 15년 동안의 행정담 유역과 용담 담 유역에서 관측 자료를 기반으로 산출된 EDI 가뭄지수와

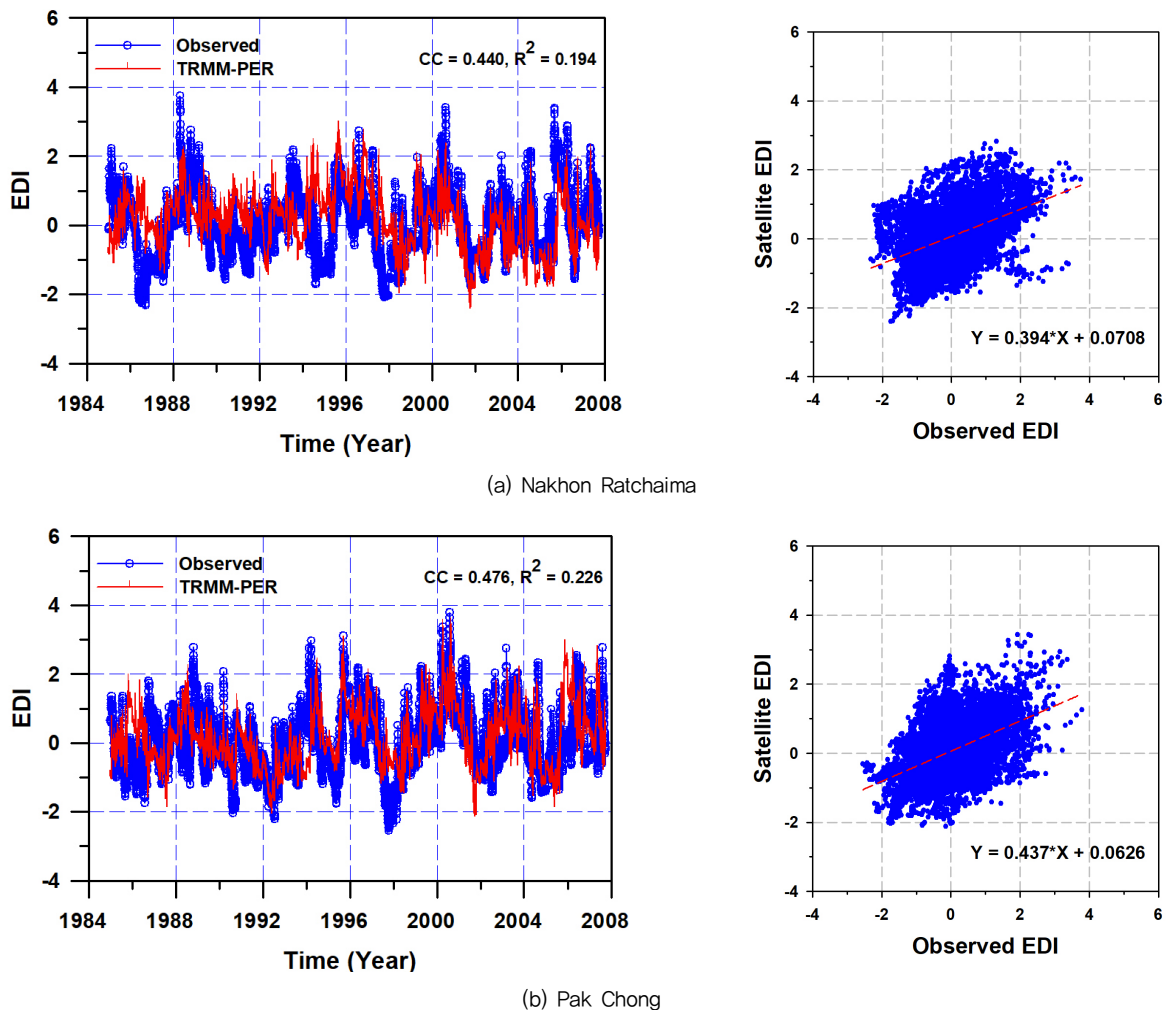


Fig. 5 EDI time series calculated using 22-yr satellite rainfall and AWS and the correlation (a) Nakhon Ratchaima and (b) Pak Chong

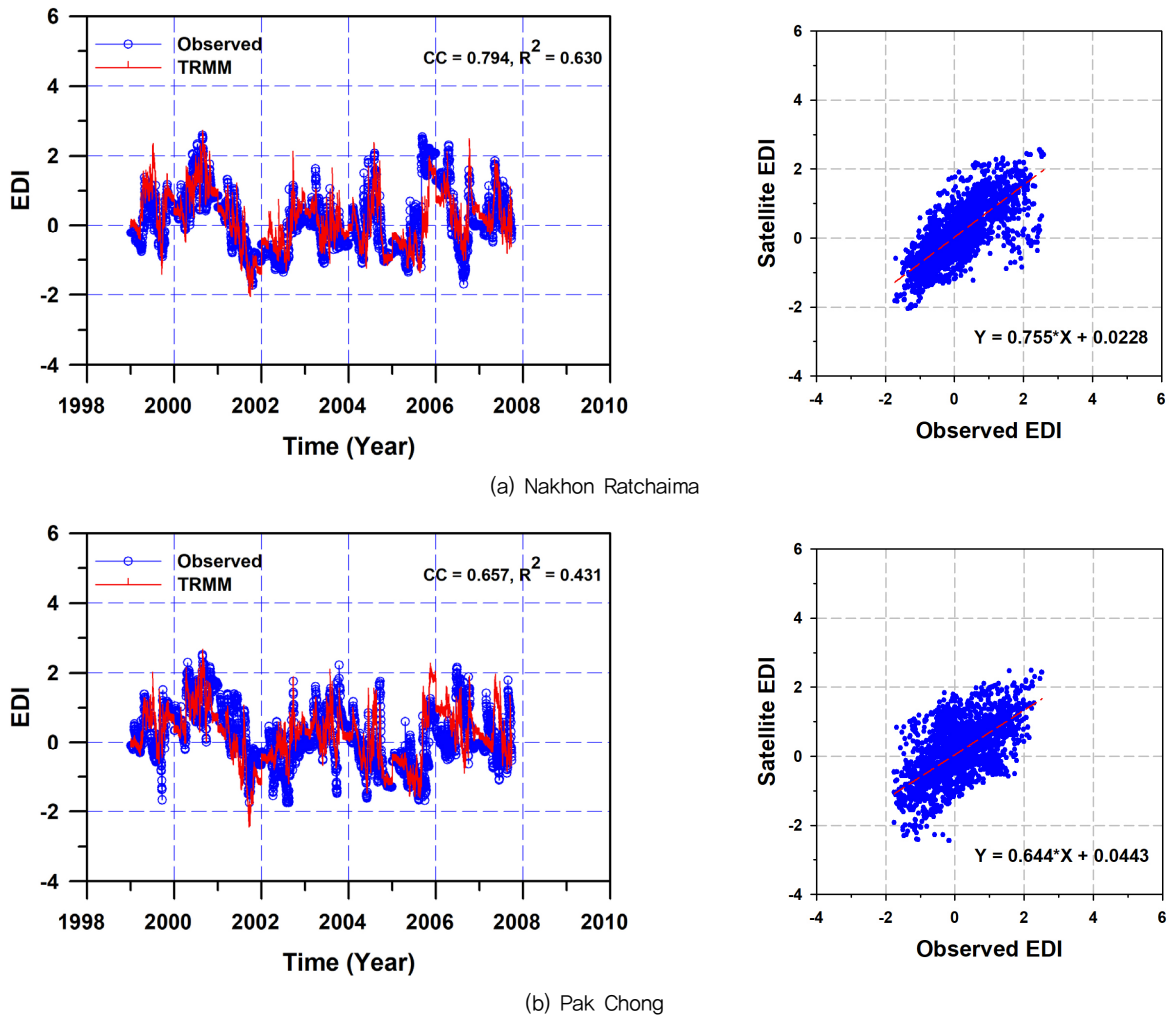


Fig. 6 EDI time series calculated using 10-yr satellite rainfall and AWS and the correlation (a) Nakhon Ratchaima and (b) Pakchong

위성 강우자료 기반으로 산출된 EDI 가뭄지수 자료에 대한 상관관계와 R^2 를 비교한 결과, 용담댐유역의 경우는 상관계수와 R^2 는 각각 0.814, 0.662로 비교적 높은 정확도를 가지는 것으로 분석되었으며, 횡성댐 유역의 경우, 상관계수는 0.817, R^2 는 0.668로 비교적 높은 상관성을 보이는 것으로 분석되었다 (Fig. 7). 이러한 결과로 볼 때 용담댐과 횡성댐의 위성강우 기반EDI를 이용한 가뭄 감시 가능성이 높은 것으로 나타났다.

IV. 결 론

본 연구에서는 PERSIAN-CDR, TRMM TMPA, GPM IMERG 위성강우 자료를 기반으로 EDI 지수를 산출하고 한반도 지역

에 대한 가뭄 감시의 기능을 평가하고, 또한 위성의 장점 중의 하나인 미세측지역에 대해 위성기반 가뭄 감시의 정확도를 알아보기 위하여 태국 람타공 유역을 대상으로 그 적용성을 평가하였다. 한반도 지역의 가뭄감시 기능을 알아보기 위하여 2001년부터 2016년까지 15년간의 용담댐과 횡성댐을 테스트베드지역으로 선정하고 TRMM TMPA, GPM IMERG 데이터 기반EDI지수를 산출하였으며, 지상관측자료로부터 산출된 EDI 지수를 이용하여 검증한 결과, 두 지역의 상관계수와 결정계수는 각각 0.814, 0.817과 0.662, 0.668로 비교적 정확도가 높게 나타났으며, 위성을 통하여 관측한 강수량자료를 바탕으로 가뭄모니터링 및 예측·평가가 가능할 것으로 판단된다. 또한 미세측지역의 가뭄감시활용성을 알아보기 위하여 태국 람타공 유역에 대한 Nahon, Pak Chong Agromet 지점에 대한 위성강우 기반EDI지수와 관측지점 기반EDI지

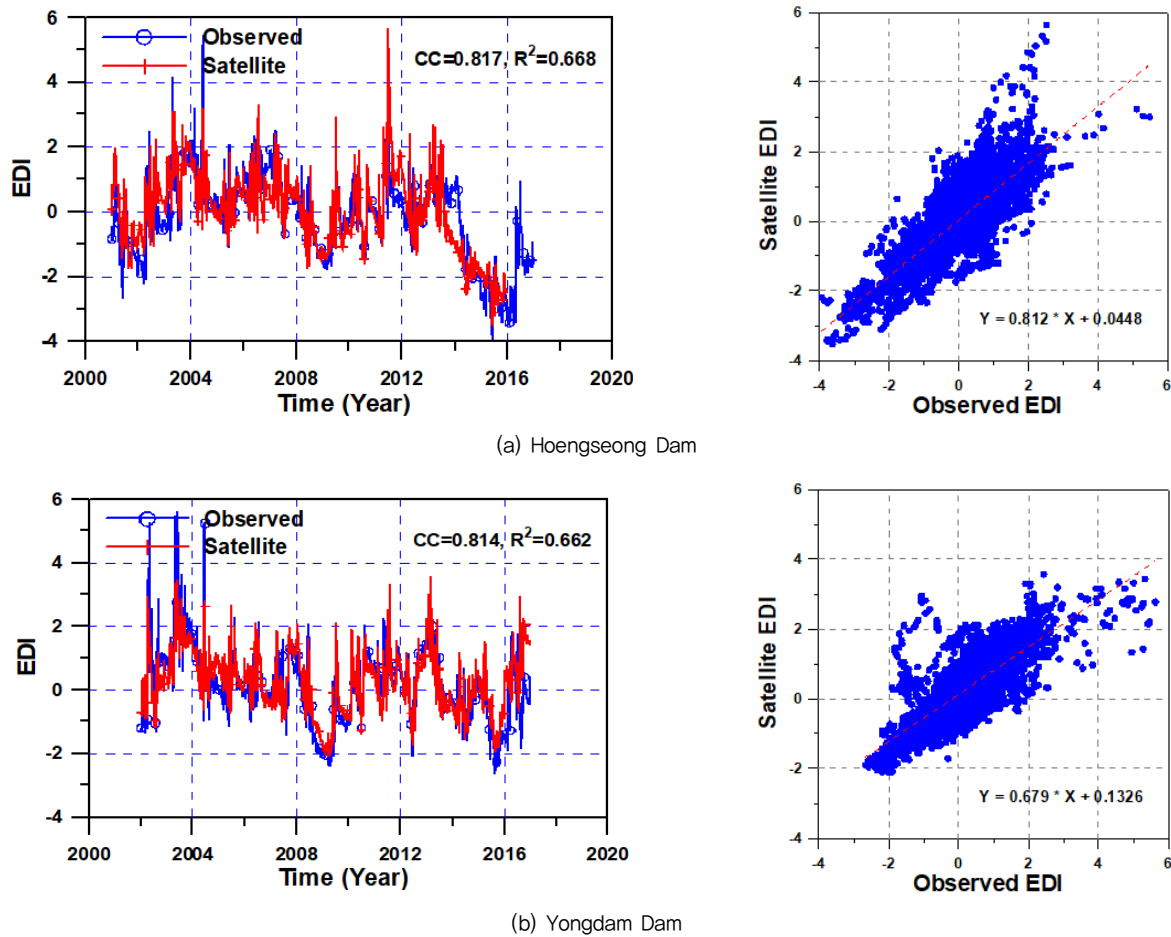


Fig. 7 EDI time series calculated using 15-yr satellite rainfall and AWS and the correlation (a) Heongseong Dam and (b) Yongdam Dam

수를 비교 분석한 결과 PERSIANN-TRMM은 정확도가 낮게 나왔으며, TRMM TMPA 단독으로 EDI을 비교한 결과 비교적 정확도가 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 최초로 강우관측 목적의 레이더를 장착하고 마이크로파 협력위성 기반 TRMM TMPA 자료가 정지궤도 적외채널 기반으로 산출된 PERSIANN-CDR의 강우 알고리즘보다 성능이 우수하기 때문이다. 따라서 또한 최근 위성으로부터 30년간 자료를 데이터베이스화 한다면 보다 정확한 가뭄 감시의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 비교적 최근에 발사된 TRMM TMPA, GPM IMERG 위성기반 EDI는 현업에서도 충분히 사용가능할 것으로 판단되며, 연구결과에서 제시한 정확도로 볼 때 미계측지역에 실시간 가뭄 감시가 가능성을 확인한 것은 큰 의미가 있다고 하겠다. 향후 보다 많은 미계측지역에 대한 자료를 수집하고 검증에 대한 노력을 한다면 북한과 같은 미계측지역과 아시아-태평양 개발도상국 등 지상관측기기의 한계

로 관측이 어려운 지역에 대한 가뭄재해 피해 저감에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (17AWMP-B079626-04)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Akinremi, O. O., and S. M. McGinn, 1996. Evaluation of the Palmer Drought Index on the Canadian Prairies. *Journal of Climate*, 9: 897-905. doi:10.1175/1520-0442(1996)009<0897:EOTPDI>2.0.CO;2.

2. Baek, S. G., H. W. Jang, J. S. Kim, and J. W. Lee, 2016. Agricultural drought monitoring using the satellite-based vegetation index. *Journal of Korea Water Resource Association* 49(4): 305-314. doi:10.3741/JKWRA.2016.49.4.305.
3. Byun, H. R., and D. A. Wilhite, 1999. Objective quantification of drought severity and duration. *Journal of Climate*, 12: 2747-2756. doi:10.1175/1520-0442(1999)012<2747:OQODSA>2.0.CO;2.
4. Ghulam, A., Q. Qin, T. Teyip, and Z. Li, 2007. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 62(2): 150-164. doi:10.1016/j.isprsjrs.2007.03.002.
5. Guttman, N. B., 1998. Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34: 113-121. doi:10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x.
6. Gu, Y., J. F. Brown, J. P. Verdin, and B. Wardlow, 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States, *Geophysical Research Letters*, 34: L06407. doi:10.1029/2006GL029127.
7. Jang, S., J. Rhee, S. Yoon, T. Lee, and K. Park, 2017. Evaluation of GPM IMERG Applicability Using SPI based Satellite Precipitation, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 59(3): 29-39 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2017.59.3.029.
8. Jeong, J., D. Kim, and M. Choi, 2017. A Study on the Utilization of Geostationary Ocean Color Imager on Communication, Ocean and Meteorological Satellite for Drought Monitoring, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 17(3): 69-77 (in Korean). doi:10.9798/KOSHAM.2017.17.3.69.
9. Jeong, S., and S. C. Shin, 2006. The application of satellite imagery in droughts analysis of large area. *Journal of the Korean Society for Geo-spatial Information Science* 14(2): 55-62 (in Korean).
10. Karnieli, A., N. Agam, R. T. Pinker, M. Anderson, M. L. Imhoff, G. G. Gutman, N. Panov, and A. Goldberg, 2010. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations, *Journal of Climate*, 23(3): 618-633. doi:10.1175/2009JCLI2900.1.
11. Keyantash, J., and J. A. Dracup, 2002. The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83: 1167-1180.
12. Kim, D. W., 2010. A Statistical Approach to Historical Droughts over Korea, Ph.D. Thesis, Pukyong National University.
13. Kwon, H. J., 2006. Development of semidistributed hydrological drought assessment method based on SWSI (Surface Water Supply Index). Ph.D. Thesis, Konkuk University.
14. Kwon, H. J., H. J. Lim, and S. J. Kim, 2007. Drought assessment of agricultural district using modified SWSI. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 10(1): 22-34 (in Korean).
15. Narasimhan, B., 2004. Development of indices for agricultural drought monitoring using a spatially distributed hydrologic model, Ph.D. Dissertation. Texas A&M University, College Station, TX.
16. NDMI (National Disaster Management research Institute), 2014. Application Plan Research of National Satellite Images for Disaster Management, pp. 1-207 (in Korean).
17. Oh, T. S., Y. I. Moon, S. S. Kim, and G. S. Park, 2011. Frequency Analysis of Meteorologic Drought Indices using Boundary Kernel Density Function, *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, 31(2B): 87-987 (in Korean).
18. Park, M. J., H. J. Shin, Y. D. Choi, J. Y. Park, and S. J. Kim, 2011. Development of a hydrological drought index considering water availability. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(6): 165-170 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2011.53.6.165.
19. Shin, H. J., M. J. Park, E. H. Hwang, H. S. Chae, and S. J. Park, 2015. A Study of Spring Drought Using Terra MODIS Satellite Image. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies* 18(4): 145-157 (in Korean). doi:10.11108/kagis.2015.18.4.145.
20. Son, K. H., D. H. Bae, and H. S. Cheong, 2015. Construction & Evaluation of GloSea5-Based Hydrological Drought Outlook System. *Atmosphere* 25(2): 271-281 (in Korean). doi:10.14191/Atmos.2015.25.2.271.
21. Wang, L., and J. J. Qu, 2007. NMDI: A normalized multi-band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing, *Geophysical Research Letters*, 34: L20405. doi:10.1029/2007GL031021.