국내 수문학적 활용성 평가를 위한 다중위성 강수자료의 검증

Validation of Multi-satellite Precipitation Products for Assessing their Potential Utility of Hydrological Application Over South Korea

김종필* · 박경원** · 정일원** · 김광섭*** · 윤선권**

Kim, Jong Pil*, Park, Kyung-Won**, Jung, Il-Won**, Kim, Gwangseob***, Yoon, Sun-Kwon**

Abstract

Multi-satellite precipitation products can provide possible opportunity for diverse hydrological applications in Korea. This study investigated the potential utility of three multi-satellite precipitation estimates, including TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission) 3B42v6, CMORPH(Climate Prediction Center Morphing), and GSMaP(Global Satellite Mapping of Precipitation)-MVK(Moving Vector with Kalman filter), from 2002 to 2009 by comparing with ground-gauged precipitation data over four major river basins of South Korea. The results showed that the frequency and amount of TRMM 3B42v6 estimates agreed well with observations at daily scale. However, CMORPH and GSMaP-MVK exhibited relatively poor performance than TRMM 3B42v6 with significantly underestimated precipitation. Overall, our results were consistent across four major river basins.

Key words : TRMM, 3B42, GSMaP, CMORPH, Multi-satellite, Precipitation

요 지

다중위성 기반의 강수자료는 국내에서 다양한 수문학적 응용분야에 활용될 수 있다. 본 연구에서는 위성강수의 수문학적 활용성을 평가하기 위하여 TRMM 3B42v6, CMORPH, GSMaP-MVK 등 3가지 다중위성 강수자료를 이용하여 4개강 권역에 대해 2002년부터 2009년까지의 지상관측강수자료와 비교하였다. 분석결과, TRMM 3B42v6은 강수의 발생 빈도와 정량적 크기에서 관측치에 근접한 결과를 보여주었다. CMORPH와 GSMaP-MVK의 경우 TRMM 3B42v6에 비해 상대적으로 관측치에 대한 일치성이 낮고, 과소 추정하는 경향을 보였다. 이러한 다중위성 강수자료와 관측강수량 비교는 4대강 권역에서 모두 일관된 결과를 보여주었다.

핵심용어 : TRMM, 3B42, GSMaP, CMORPH, 다중위성, 강수

1. 서 론

인공위성 기반의 원격탐사자료는 홍수, 가뭄, 산불, 산사태 등 자연재해에 대한 감시와 예측에 활용되어 왔으며, 침수흔적도 및 재해위험지도 작성이나 재해복구 등 재해관리에 있어서도 매우 유용하게 적용될 수 있다. 또한 위성강수는 날씨나 지형적 제약을 받는 지상관측방법에 비해서 시공간적으로 연속적이고 균질한 강수정보를 제공할 수 있다는 측면에서 매우 유용하며, 최근 이러한 위성기반 강수자료의 수문학적

적용 가능성에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Sorooshian *et al.*, 2011).

Landsat, SPOT(Satellite Pour l'Observation de la Terre) 등의 광학 센서나 레이더 센서의 경우에는 수십 m급 초고해상도의 지표 관측자료를 얻을 수 있다. 그러나 상대적으로 관측 범위가 좁고, 같은 곳을 다시 촬영할 수 있는 시간 해상도가 많이 낮다는 단점이 있다. 반면, NOAA(National Oceanic Atmospheric Administration)의 AMSU-B(Advanced Microwave Sounding Unit-B), AQUA의 AMSR-E(Advanced Microwave

*교신저자, 정회원. (재) APEC 기후센터 연구본부(Tel: +82-51-745-3958, Fax: +82-51-745-3999, E-mail: jpkim@apcc21.org)
Corresponding Author. Member. Climate Research Department, APEC Climate Center

** (재) APEC 기후센터 연구본부
Climate Research Department, APEC Climate Center

***정회원. 경북대학교 건설환경에너지공학부
Member. School of Architectural, Civil, Environmental and Energy Engineering, Kyungpook National University

Scanning Radiometer-Earth Observing System), DMSP (Defense Meteorological Satellite Program)의 SSM/I(Special Sensor Microwave Imager)와 같이 대기와 관련된 정보를 관측하는 특히 마이크로파를 이용하여 강수량을 측정하는 센서의 경우에는 파장에 따른 위성 안테나 크기의 제약으로 대략 40~50 km의 해상도를 가지게 된다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 최근 위성강수자료 생산과 관련된 연구들은 다중위성 및 다중센서를 융합하여 강수정보의 시공간 해상도 및 정확도를 향상시키는 방향으로 진행되고 있다(e.g. Sorooshian *et al.*, 2000; Joyce *et al.*, 2004; Huffman *et al.*, 2007; Ushio *et al.*, 2009).

대표적인 다중위성 기반의 전 지구 강수자료로는 미국 항공 우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA)의 TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission) 3B42 자료(Huffman *et al.*, 2007), 미국 국립해양대기청(NOAA) 산하기관인 기후예측센터(Climatic Prediction Center, CPC)가 제공하는 CMORPH(CPC MORPHing technique) 자료(Joyce *et al.*, 2004), 일본 우주항공연구개발기구(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA) 산하기관인 지구관측 연구센터(Earth Observation Research Center, EORC)가 제공하는 GSMP(Global Satellite Mapping of Precipitation) 자료(Ushio *et al.*, 2009), 그리고 Hsu *et al.*(1997)이 개발한 PERSIANN(Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks) 등이 있다.

이들 다중위성 강수자료는 사용된 위성자료와 강수 추정 알고리즘의 차이로 인해 지역적으로 강수량 추정치에서 차이가 발생할 수 있다. 이러한 이유로 다중위성 강수자료의 지역적인 강수추정의 불확실성을 평가하고, 어떤 다중위성 강수자료가 특정 지역의 강수특성을 잘 반영하는가에 대한 평가가 다양한 지역을 대상으로 수행되어 왔다. Stisen and Sandholt (2010)는 세네갈 지역에 대하여 TRMM 3B42v6(version 6), CMORPH, CCD(Cold Cloud Duration), FEWS(Famine Early Warning System) v2(version 2), PERSIANN 등 5가지 위성강수자료를 분석한 바 있다. Bitew and Gebremichael (2011)은 CMORPH, TRMM 3B42RT 및 3B42v6, PERSIANN 등의 자료를 이용하여 에티오피아 지역에 대하여 분석하였다. 또한 Likolopoulos *et al.*(2013)은 이탈리아 북동부 지역을 대상으로 C-band 이중편파 도플러 레이더와 CMORPH, PERSIANN, TRMM 3B42 등의 다중위성 강수자료를 비교하였다.

국내에서도 2000년대 이후로 인공위성자료의 수자원 분야 활용에 대한 연구가 지속적으로 수행되어 왔다(e.g. Lee *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2005; Kang *et al.*, 2006; Shin, 2008; Back and Choi, 2012). 그러나 대부분의 연구들은 토지피복, 적설분포, 토양수분, 지표면 온도 등 주로 지표면 정보 추정에 초점을 두고 있으며, 강수량과 같은 기상정보의 수자원 활용

과 관련된 연구는 매우 드물다. 최근에는 Cho *et al.*(2013)이 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)와 강우와의 관계를 이용하여 TRMM 3B43 월누적강수량 자료의 공간적 상세화를 수행한 바 있다. Kim *et al.* (2013)은 TRMM 3B42, GSMaP-MVK, CMORPH 등 다중위성 강수자료를 이용하여 충주댐 유역에 대한 유출분석을 수행한 바 있다.

우리나라는 다른 나라들에 비해서 상대적으로 매우 조밀한 지상관측망과 레이더망이 구축되어 있어 공간적으로 매우 상세한 강수정보를 생산할 수 있는 여건을 갖추고 있다. 그러나 북한 지역과 같은 미계측 지역에 대한 강수의 추정이나 해상에서 발생하여 한반도로 접근하는 강수에 대한 관측에는 여전히 한계가 있다. 위성기반의 강수추정자료는 이러한 지상관측망의 한계를 극복할 수 있는 하나의 대안이 될 수 있다. 또한 2014년에 차세대 전 지구 강수 및 강설을 위한 GPM(Global Precipitation Measurement) 핵심위성이 발사됨으로써 보다 정확하고 해상도 높은 강수자료의 생산이 가능할 것으로 생각되며, 향후 이러한 자료의 활용성은 더욱 높아질 것으로 기대된다.

본 연구에서는 3가지 다중위성 강수자료를 이용하여 국내 유역에 대한 수문학적 활용 가능성을 검토하였다. 연구에 이용된 다중위성자료는 TRMM 3B42v6, CMORPH, GSMaP-MVK(Moving Vector with Kalman filter) 등이다. 다중위성 강수자료는 격자자료이며, 각 격자 내의 면적평균강수량을 제공한다. 따라서 위성강수와 지상관측자료의 비교를 위하여 한강, 낙동강, 금강, 섬진강 및 영산강 권역별로 산술평균법을 이용한 평균강수량을 분석에 사용하였다. 2장에서는 적용된 다중위성 강수자료에 대한 보다 상세한 설명과 강수량 비교 분석방법에 대하여 기술하였으며, 3장에서는 비교분석결과를, 마지막으로 4장에서는 결론을 요약하여 제시하였고, 본 연구에서 다루지 못한 향후과제에 대하여 언급하였다.

2. 연구자료 및 분석방법

2.1 다중위성 강수자료

2.1.1 TRMM 3B42v6

TRMM 3B42(or TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis, TMPA)는 TRMM 위성자료를 기반으로 생산되는 자료 중 하나로서 TRMM 위성의 TMI(TRMM Microwave Imager), DMSP 위성의 SSM/I, AQUA 위성의 AMSR-E, 그리고 NOAA 위성의 AMSU-B 등 4가지 수동형 마이크로파 휘도온도(brightness temperature) 자료로부터 추정된 강수자료들이 결합되어 만들어진다. 또한 이러한 강수 추정자료를 기반으로 MTSAT(Multi-functional Transport Satellite), GOES(Geostationary Operational Environmental Satellite), METEOSAT-5/-7 등의 정지궤도위성 적외채널 자료 및 NOAA

위성군의 저궤도위성 적외채널 자료를 이용하여 강수 추정치를 생산한 후 마이크로파 강수 추정자료와 조합하게 된다. TRMM 3B42는 관측시작 후 약 9시간 내에 생산되는 실시간 자료인 3B42RT 자료와 지상우량계 자료와 조합되어 약 10일에서 15일 후에 생산되는 3B42v6 자료로 구분된다(Kim, 2013). 본 연구에서는 3B42v6 자료를 이용하였으며, 이 자료는 경도 180°W부터 180°E까지 위도 50°S부터 50°N까지 3시간 간격으로 공간해상도 약 25 km×25 km(0.25°×0.25°)의 강우강도(mm/hour)를 제공하고 있다.

2.1.2 CMORPH

CMORPH 알고리즘에서는 DMSP-13/-14/-15 위성의 SSM/I, AQUA 위성의 AMSU-B 및 TRMM 위성의 TMI 등의 수동형 마이크로파 자료와 정지궤도위성의 적외채널 자료를 이용하고 있다. 이 기법은 시공간적으로 보다 높은 해상도의 강수자료를 생산하기 위하여 30분 간격으로 제공되는 정지궤도위성의 적외채널 영상으로부터 대기운동벡터(atmospheric motion vectors)를 계산한 다음 수동 마이크로파 자료를 전파 시킴으로써 강수량 자료를 생산한다. 그 뿐만 아니라 강수의 형태나 강도와 같은 특성도 시간에 따른 가중 선행 보간법을 이용하여 반영할 수 있다(Joyce *et al.*, 2004).

CMORPH 강수 추정자료는 최대 공간 해상도 8 km×8 km (적도 지역), 시간 해상도는 30분 간격이며, 자료에 따라 약 25 km×25 km(0.25°×0.25°), 시간 해상도 3시간 간격 자료로도 제공된다(Kim *et al.*, 2013). 본 연구에서는 TRMM 3B42v6와 동일한 시공간해상도 자료를 사용하였다.

2.1.3 GSMaP-MVK

GSMaP는 2002년부터 2007년까지 수행되었던 JST(Japan Science and Technology Agency)의 CREST(Core Research for Evolutional Science and Technology)사업의 일환으로 처음 개발되었으며(Ushio *et al.*, 2009), 2007년 이후에는 JAXA의 PMM(Precipitation Measuring Mission) 연구팀에 의해서 발전되어 왔다. GSMaP는 TRMM 위성의 TMI, AQUA 위성의 AMSR-E, DMSP 위성의 SSM/I와 SSMIS (Special Sensor Microwave Imager/Sounder), NOAA 위성의 AMSU-A/-B, METOP 위성의 AMSU-A와 MHS(Microwave Humidity Sounder), 그리고 정지궤도위성의 적외채널 자료를 입력 자료로 활용하고 있다. 여기에서 사용된 정지궤도위성 적외채널 자료는 NOAA CPC의 자료를 이용하고 있으며, 이 자료는 JMA(Japan Meteorological Agency)에서 운영하는 MTSAT의 적외채널 자료, EUMETSAT(European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellite)의 METSOSAT-7/-8, 그리고 NOAA의 GEOS-11/-12 자료를 합성한 것이다.

GSMaP는 전 지구 규모에서 약 10 km×10 km(0.1°×0.1°) 해상도의 1시간 간격 강수자료를 제공하고 있다. 또한

GSMaP는 원래 NRT(Near Realtime), MWR(Microwave Radiometers), MVK 등의 다양한 버전으로 제공되고 있으나, 본 연구에서는 마이크로파 자료뿐만 아니라 적외채널 자료까지 모두 적용된 GSMaP-MVK를 이용하였다. GSMaP-MVK는 극궤도 위성들의 수동 마이크로파 자료와 대기운동벡터를 결합한다는 점에서 CPC의 CMORPH 기법과 유사하지만, 강수 시스템의 시간적 변동특성을 보다 정확하게 반영하기 위한 목적으로 칼만필터(Kalman filter)를 사용하여 강수량을 추정하는 특징이 있다(Kim *et al.*, 2013).

2.2 위성자료 처리

앞서 언급한 3가지 다중위성자료들은 전 지구를 대상으로 하고 있기 때문에 기본적으로 UTC(Universal Time Coordinated) 체계를 사용한다. UTC 체계는 우리나라 지방표준시(LST, Local Standard Time)와 9시간의 차이가 있다. UTC 체계로 구성된 일 단위 위성자료를 우리나라 지역에 적용할 경우 지방표준시를 기준으로 하는 지상관측자료와의 관측시간의 불일치로 인한 오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일 단위 위성 강수자료를 직접 사용하지 않고, GSMaP-MVK의 경우 1시간, TRMM 3B42v6와 CMORPH의 경우 3시간 위성자료를 이용하여 우리나라 지방표준시를 기준으로 일 단위 자료를 생산하였다. 예를 들어, 우리나라 지방표준시로 2009년 5월 5일의 일 단위 자료를 생산하기 위해서는 2009년 5월 4일 15:00 UTC부터 익일 12:00 UTC까지 자료를 이용하여 시간 차이에서 발생하는 일강수량 추정의 오차를 제거하게 된다. 이렇게 생산된 일강수량 자료는 다시 한강, 낙동강, 금강, 섬진영산강 등 4대 권역에 해당하는 격자들을 찾아내고 이들을 평균함으로써 각 권역별 평균 일강수량을 산출하였다.

2.3 지상관측자료

다중위성 강수자료의 우리나라 지역에 대한 활용성을 검토하기 위하여 한강, 낙동강, 금강, 섬진강 및 영산강 등 4대강 권역을 중심으로 분석을 수행하였다(Fig. 1). 다중위성 강수자료와의 비교분석을 위하여 기상청에서 운영하고 있는 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS) 313개 지점과 종관기상관측시스템(Automated Synoptic Observing System, ASOS) 61개 지점에 대하여 2002년부터 2009년까지 총 8년간의 일강수량 자료를 수집하였다. 수집된 강수자료는 지역별로 다중위성 강수자료와 비교하기 위하여 다시 4대강 권역별로 구분하여 평균하였다. 각 권역별로는 한강 권역에 서울, 인천, 충주 관측소 등을 포함한 총 151개 지점이, 낙동강 권역에 울진, 대구, 부산 등 총 96개 지점이, 금강 권역에는 청주, 대전, 천안 등을 포함한 총 57개 지점, 그리고 섬진영산강 권역에는 목포, 여수, 순천 등 총 70개 지점의 관측자료가 다중위성 강수자료와의 비교를 위하여 이용되었다.

Fig. 1. Study Area and the KMA Weather Stations.

2.4 분석방법

2.4.1 정량적 평가지수

본 연구에서는 다중위성 강수자료가 정량적인 측면에서 지상관측 강수자료와 얼마나 잘 일치하고 있는가를 객관적으로 평가하기 위하여 Eq. (1)부터 Eq. (4)와 같이 MAE(mean absolute error), ME(mean error), BIAS(bias), EFF(efficiency) 등 4가지 평가지수를 이용하였다. MAE는 다중위성자료가 지상관측자료에 얼마나 근접하는가를 측정하는 지수로서 최적값은 0이다. ME는 다중위성자료와 지상관측자료 사이의 평균적인 오차를 측정하며, 최적값은 0이다. ME에서 양(+)의 값은 위성강수가 지상관측강수에 비해 과대 추정된 것을, 음(-)의 값은 과소 추정된 것을 나타낸다. BIAS는 다중위성 강수자료가 지상관측 강수자료를 기준으로 얼마나 치우쳐 있는가 즉, 편의(bias)를 측정하기 위한 지수로 최적값은 1이고, 1보다 큰 경우 위성강수가 지상관측강수에 비해 과대 추정을 1보다 작은 경우 과소 추정을 의미한다. EFF는 지상관측 강수량의 평균치 대비 다중위성 강수자료의 효율을 측정하는 지수로서 최적값은 1이고, 음(-)의 값을 가질 경우 다중위성 강수자료를 이용하는 것보다 지상관측 강수량의 평균을 이용하는 것이 더 정확함을 나타낸다.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |S_i - G_i| \quad (1)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - G_i) \quad (2)$$

$$BIAS = \sum_{i=1}^n S_i / \sum_{i=1}^n G_i \quad (3)$$

$$EFF = 1 - \left[\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)^2 / \sum_{i=1}^n (G_i - \bar{G})^2 \right] \quad (4)$$

여기서, S_i 와 G_i 는 각각 i 번째 일(day)에 대하여 다중위성자료로부터 추정된 강수량과 지상관측 강수량을 나타낸다. 또한은 전체 분석에 사용된 자료의 기간(일)을 의미한다.

2.4.2 정성적 평가지수

MAE, ME, BIAS, EFF 등은 정량적인 평가를 위하여 사용된 반면, 다중위성 강수자료의 정성적인 평가를 위하여 FBS (frequency bias), POD(probability of detection or hit rate), FAR(false-alarm ratio), HSS(Heidke skill score) 등의 지수를 이용하였다(Dinku *et al.*, 2010). 강수현상의 감지유무에 따라 Table 1과 같이 4가지 경우를 고려할 수 있다(Mason, 2003). 다중위성자료에서 강수를 감지한 경우에 대하여 지상우량계에서 강수가 감지된 경우의 수를 a , 강수가 감지되지 않은 경우의 수를 b 라 하고, 다시 다중위성강수자료에서 강수를 감지하지 못한 경우에 대하여 지상우량계에서 강수가 감지된 경

Table 1. Contingency Table for Comparison of Satellite Precipitation with Grounded Records

	Gauge ≥ 1 mm/day	Gauge < 1 mm/day
Satellite ≥ 1 mm/day	a	b
Satellite < 1 mm/day	c	d

우의 수를 c , 강수가 감지되지 않은 경우의 수를 d 라고 정의한다. 이렇게 정의된 4가지 경우의 수를 이용하여 다음 Eq. (5)부터 Eq. (8)과 같이 평가지수를 계산할 수 있다.

$$FBS = (a + b)/(a + c) \quad (5)$$

$$POD = a/(a + c) \quad (6)$$

$$FAR = b/(a + b) \quad (7)$$

$$HSS = 2(ad - bc)/[(a + c)(c + d) + (a + b)(b + d)] \quad (8)$$

FBS는 다중위성자료와 지상관측자료의 강수 감지 빈도를 측정하며, POD는 다중위성자료가 강수발생을 얼마나 잘 추정하는가를 평가한다. 또한 FAR은 지상관측자료로부터 강수량이 0일 때, 다중위성자료에서 강수가 발생한 빈도를 나타낸다. HSS는 다중위성자료의 강수 감지 정확도를 측정하는 지수이다(Dinku *et al.*, 2010).

3. 분석결과

3.1 강수량

Fig. 2는 다중위성자료와 지상관측자료의 일강수량합계를 권역별로 비교한 산점도이다. 그림에서 보는 바와 같이 CMORPH와 GSMaP-MVK의 경우 모든 권역에서 과소 추정하는 것으로 나타났으며, TRMM 3B42v6은 한강 권역에서 과대 추정을, 금강 권역과 섬진강 및 영산강 권역에서는 과소 추정하는 것으로 나타났다. TRMM 3B42v6의 경우 다른 다중위성자료들에 비해서 지상관측 강수량과 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있었다. 또한 TRMM 3B42v6은 CMORPH와 GSMaP-MVK에 비해서 강수량이 비교적 많은 호우사상에 대한 감지능력이 우수한 것으로 나타났다. 예를 들어, 지상관측자료에 의하면 한강 권역(Fig. 1(a))에서 2002년부터 2009년까지 일강수량 100 mm 이상의 강수사상이 총 11건이 발생하였는데, TRMM 3B42v6은 이 중에서 총 9건이 발생한 것으로 나타났으며, CMORPH와 GSMaP-MVK의 경우 총 1건씩 발생한 것으로 나타났다.

다중위성 강수자료와 지상관측 강수자료의 월별 평균강수량을 비교한 결과(Fig. 3), 7월과 8월에 집중된 우리나라 전형적인 강수의 계절변동을 잘 표현하고 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 월별 평균강수량도 역시 TRMM 3B42v6을 제외한

Fig. 2. Scatter Plots Comparing between Satellite and Grounded Precipitation at Daily Scale over the Four Major River Basins in South Korea.

(c) Geum River basin

(d) Sumjin and Yeongsan River basin

Fig. 2. Continued.

Fig. 3. Comparison of the Monthly Mean Precipitation between the Three Multi-satellite Precipitation Products and Ground-gauged Data in (a) the Han River Basin, (b) the Nakdong River Basin, (c) the Geum River Basin, and (d) the Sumjin and Yeongsan River Basin.

CMORPH와 GSMaP-MVK가 과소 추정하는 것으로 나타났다. 한강 권역의 경우 강수량이 가장 많았던 7월에 지상관측

자료의 월평균강수량은 약 426.8 mm였으며, TRMM 3B42v6은 약 406.0 mm로 약 4.9% 과소 추정하는 것으로 나타났다.

또한 CMORPH는 약 211.2 mm로 약 50.5% 과소 추정을, GSMaP-MVK는 약 231.8 mm로 약 45.7% 과소 추정하는 것으로 나타났다.

권역별 연강수량합계를 비교한 결과(Fig. 4), 3가지 다중위성

강수자료 모두 강수량의 연 변화를 잘 따르고 있는 것으로 나타났다. 일강수량합계를 비교한 결과와 마찬가지로 TRMM 3B42v6을 제외한 나머지는 상당히 과소 추정하는 것을 알 수 있었다. 한강 권역의 경우 2002년부터 2009년까지 지상관측

Fig. 4. Comparison of the Annual Precipitation Amounts between the Three Multi-satellite Precipitation Products and Ground-gauged Data in (a) the Han River Basin, (b) the Nakdong River Basin, (c) the Geum River Basin, and (d) the Sumjin and Yeongsan River Basin.

Table 2. Statistics Evaluating the Quantitative Performance of the Satellite Precipitation

Index	Region	Multi-satellite precipitation products		
		TRMM 3B42	CMORPH	GSMaP-MVK
MAE	Han	2.0542	2.2408	2.2775
	Nakdong	1.9376	2.0199	2.0027
	Geum	2.2224	2.0026	2.1758
	Sumjin and Yeongsan	2.0867	2.2218	2.2280
ME	Han	-0.1046	-1.8103	-1.4176
	Nakdong	0.1033	-1.5381	-1.2128
	Geum	0.2144	-1.4965	-1.0668
	Sumjin and Yeongsan	0.0390	-1.7245	-1.4274
BIAS	Han	0.9727	0.5285	0.6308
	Nakdong	1.0276	0.5891	0.6760
	Geum	1.0606	0.5766	0.6982
	Sumjin and Yeongsan	1.0100	0.5569	0.6332
EFF	Han	0.7773	0.6499	0.6800
	Nakdong	0.7406	0.6917	0.7201
	Geum	0.5984	0.6725	0.6576
	Sumjin and Yeongsan	0.7420	0.7023	0.7195

Fig. 5. Comparison of (a) MAE, (b) ME, (c) BIAS, and (d) EFF for Daily Precipitation from the Multi-satellite Products.

자료의 연평균강수량은 약 1402.5 mm였으나, TRMM 3B42v6은 약 1364.3 mm로 약 2.7%, CMORPH는 약 741.3 mm로 약 47.1%, 그리고 GSMaP-MVK는 약 884.7 mm로 약 36.9% 정도로 과소 추정하고 있는 것으로 나타났다.

Table 2와 Fig. 5는 다중위성자료로부터 추정된 일강수량에 대한 평가지수를 4대강 권역별로 비교한 것이다. MAE의 경우 대략 2.0 mm 정도로 지역별 그리고 다중위성자료별로 뚜렷한 차이를 찾아볼 수 없었다. 금강 권역을 제외한 나머지 지역에서 모두 TRMM 3B42v6가 역시 다른 다중위성자료보다 MAE가 낮은 것으로 나타났다. 그러나 금강 권역에서는 오히려 TRMM 3B42v6의 MAE가 가장 컸으며, CMORPH가 가장 낮은 것으로 나타났다. ME의 경우에는 TRMM 3B42v6가 다른 다중위성자료에 비해서 가장 우수하였으며, 지역별로는 섬진 및 영산강 권역에서 가장 우수한 결과를 나타내고 금강 권역에서 가장 차이가 큰 것으로 나타났다. BIAS의 경우도 ME와 동일한 결과를 보여주었다. 역시 TRMM 3B42v6의 BIAS가 1에 가장 근접하게 나타났으며, CMORPH의 BIAS는 0.6 미만으로 가장 차이가 컸다. EFF의 경우도 다른 평가지수들과 마찬가지로 금강 권역을 제외한 나머지 지역에서 TRMM 3B42v6가 가장 우수함을 보여주었으나, 금강 권역에서는 다른 다중위성자료에 비해서 EFF가 낮은 것으로 나타났다.

3.2 강수일수

Fig. 6은 다중위성 강수자료와 지상관측 강수자료의 연강수

일수를 비교한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 강수일수의 경우 연강수량합계에 비해서 상대적으로 지상관측자료의 연 변화를 제대로 표현하지 못 하는 것으로 나타났다. 또한 2002년부터 2009년까지 8년간에 대하여 지상관측자료로부터 계산된 한강 권역의 연평균강수일수는 약 105일이었으나, TRMM 3B42v6의 경우 연평균강수일수가 약 94일로 지상관측자료와 대략 11일의 차이가 있었으며, CMORPH는 약 76일로 약 29일의 차이가, GSMaP-MVK는 약 94일로 약 11일의 차이가 있었다.

그러나 월별 평균 강수일수를 분석한 결과(Fig. 7)에서는 다중위성 강수자료로부터 계산된 강수일수가 지상관측자료의 계절변동특성을 비교적 잘 표현하고 있는 것으로 나타났다. 월별로는 다소 차이는 있으나 다중위성 강수자료의 강수일수가 지상관측자료에 비해서 대체로 적은 것으로 나타났으며, 지역별로는 뚜렷한 차이가 없는 것으로 나타났다. 또한 다중위성자료에 따라서도 뚜렷한 차이를 나타내지는 않았으나, 7월과 8월에 TRMM 3B42v6가 다른 위성자료에 비해서 지상관측자료와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

Table 3은 다중위성 강수자료의 강수 감지 정확도를 검증하기 위한 평가지수를 지역별로 비교한 것이다. 표에서 보는 바와 같이 FBS, POD, FAR, HSS 등 4개 평가지수들에서 다중위성자료별로 또는 분석 지역에 따라 뚜렷한 차이를 찾아볼 수 없었다. 그러나 한강 권역에 대한 일강수량에 따른 평가지수의 변화를 분석한 결과(Fig. 8), TRMM 3B42v6의 경우 비교적 일강수량이 큰 강수사상에 대해서도 다른 위성자료들에

Fig. 6. Comparison of the Annual Total Number of Rainy Days between the Satellite Precipitation Data and Grounded Measurements in (a) the Han River Basin, (b) the Nakdong River Basin, (c) the Geum River Basin, and (d) the Sumjin and Yeongsan River Basin.

Fig. 7. Comparison of the Monthly Mean of Rainy Days between the Satellite Precipitation Data and Grounded Measurements in (a) the Han River Basin, (b) the Nakdong River Basin, (c) the Geum River Basin, and (d) the Sumjin and Yeongsan River Basin.

비해서 그 정확도가 잘 유지되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 반면에 CMORPH와 GSMaP-MVK의 경우 일강수량이 클수록 FBS, POD, HSS가 지속적으로 감소하였으며, FAR도 일

강수량 50 mm 이상의 강수사상에 대해서 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 낙동강, 금강, 섬진영산강 권역에서도 동일하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Table 3. Statistics Evaluating the Qualitative Performance of the Satellite Precipitation Products

Index	Region	Multi-satellite precipitation products		
		TRMM 3B42	CMORPH	GSMaP-MVK
FBS	Han	0.8909	0.7189	0.8897
	Nakdong	1.0091	0.8700	0.9233
	Geum	0.8773	0.7534	0.8911
	Sumjin and Yeongsan	0.9109	0.7723	0.8342
POD	Han	0.7094	0.6311	0.6773
	Nakdong	0.7932	0.7594	0.7503
	Geum	0.6871	0.6571	0.6746
	Sumjin and Yeongsan	0.7067	0.6782	0.6795
FAR	Han	0.2037	0.1221	0.2387
	Nakdong	0.2139	0.1271	0.1873
	Geum	0.2168	0.1279	0.2430
	Sumjin and Yeongsan	0.2242	0.1218	0.1855
HSS	Han	0.6571	0.6498	0.6113
	Nakdong	0.7140	0.7514	0.7060
	Geum	0.6400	0.6725	0.6140
	Sumjin and Yeongsan	0.6464	0.6909	0.6538

Fig. 8. Comparison of (a) FBS, (b) POD, (c) FAR, and (d) HSS Computed for Daily Precipitation Thresholds over the Han River Basin.

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 TRMM 3B42v6, CMORPH, GSMaP-MVK 자료와 지상관측 강수량자료를 이용하여 4대강 권역별로 평균강수량을 계산하고, 이를 비교함으로써 다중위성 강수량자료의 우

리나라 지역에 대한 수문학적 활용성을 검토하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 2002년부터 2009년까지 총 8년간에 대한 일강수량을 비교한 결과, 다른 위성자료에 비해서 TRMM 3B42v6이 지상관측자료와 가장 잘 일치하였으며, 지상관측 강수량

료의 연변동특성과 계절변동특성을 잘 반영하고 있는 것으로 나타났다.

- 2) 정량적 평가지수(MAE, ME, BIAS, EFF)를 비교한 결과에서도 금강 권역(MAE, EFF)을 제외한 나머지 지역에서 모두 TRMM 3B42v6가 다른 위성자료들에 비해서 우수함을 확인할 수 있었다.
- 3) 일강수량 1 mm 이상의 강수일수를 비교한 결과에서는 지상관측자료에 비해 강수일수가 적은 것으로 나타났으나, 월별 평균 강수일수에서는 다중위성자료의 종류에 상관없이 대체로 지상관측자료와 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- 4) 정성적 평가지수(FBS, POD, FAR, HSS)를 이용한 결과, 다중위성자료의 종류에 따른 차이나 분석 지역에 큰 영향을 받지 않고 유사하였다. 그러나 일강수량이 증가함에 따라 다중위성자료의 강수 감지 정확도에서도 역시 TRMM 3B42v6가 가장 우수한 것으로 확인되었다.

본 연구결과를 토대로 TRMM 3B42v6가 4대강 권역에서 모두 다른 다중위성 강수자료에 비해 정량적 그리고 정성적으로 가장 우수한 강수정보를 제공하고 있음을 확인할 수 있었다. 향후 추가적으로 다중위성 강수자료의 유출분석에 대한 활용성 검토 및 위성강수가 가진 지역적 편의를 보정하는 기법 개발에 대한 연구들이 필요할 것으로 판단된다. 이와 더불어 한국 지역에 특화된 위성강수 추정 알고리즘 개발, 다양한 위성기반 강수정보를 지상관측정보와 융합할 수 있는 기술 개발, 위성강수자료 기반의 유출분석 기법 및 불확실성을 평가하는 기술 개발, 실시간 위성강수 정보를 활용한 수자원 예측기술 개발 등의 후속연구가 진행되어야 할 것이다. 이러한 연구들을 통해 다양한 위성기반의 수문기상학적 정보가 수자원 예측 및 관리에 효과적으로 활용된다면 기후변화와 변화무쌍한 기후변동 조건 하에서도 안정적인 수자원 관리를 수행할 수 있는 역량을 강화하는데 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(13AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

References

- Back, J.J. and Choi, M. (2012) Availability of land surface temperature from the COMS in the Korea Peninsula, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 8, pp. 755-765.
- Bitew, M.M. and Gebremichael, M. (2011) Evaluation of satellite rainfall products through hydrologic simulation in a fully distributed hydrologic model, *Water Resources Research*, Vol. 47, W06526, doi:10.1029/2010WR009917.
- Cho, H., Hwang, S., Cho, Y., and Choi, M. (2013) Analysis of spatial precipitation field using downscaling on the Korean Peninsula, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 11, pp. 1129-1140.
- Dinku, T., Ruiz, F. Connor, S.J., and Ceccato, P. (2010) Validation and intercomparison of satellite rainfall estimates over Colombia, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol. 49, pp. 1004-1014.
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F., and Wolff, D.B. (2007) The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 8, pp. 38-55.
- Hsu, K.L., Gao, X., Sorooshian, S., and Gupta, H.V. (1997) Precipitation estimation from remotely sensed information using artificial neural networks, *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 36, pp. 1176-1190.
- Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A., and Xie, P. (2004) CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 5, pp. 487-503.
- Kang, S.M., Shin, H.J., Kwon, H.J., and Kim, S.J. (2006) Extraction of snowmelt factors using NOAA satellite images and meteorological data, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 10, pp. 845-854.
- Kim, J.P. (2013). *Application of multi-satellite precipitation estimates for daily runoff simulation of the watersheds in South Korea*, Ph.D. Dissertation, Kyungpook National University. 140p.
- Kim, J.P., Park, K.W., Jung, I.W., Han, K.S., and Kim, G. (2013) Application of high resolution multi-satellite precipitation products and a distributed hydrological modeling for daily runoff simulation, *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 29, No. 2, pp. 263-274.
- Lee, B.J., Bae, D.H., and Jeong, C.S. (2003) Runoff curve number estimation for cover and treatment classification of satellite image(II): Application and verification, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 6, pp. 999-1012.
- Lee, G.S., Park, J.H., Hwang, E.H., and Koh, D.K. (2005) Application of SPOT 5 satellite image and landcover map for the examination of soil erosion source area, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 38, No. 11, pp. 927-935.
- Likolopoulos, E.I., Anagnostou, E.N., and Borga, M. (2013) Using high-resolution satellite rainfall products to simulate a major flash flood event in Northern Italy, *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 14, pp. 171-185.
- Mason, I.B. (2003) Binary events, In *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, Edited by Jolliffe, I.T. and Stephenson, D.B., Wiley, pp. 37-76.
- Shin, S.C., Hwang, M.H., and Ko, I.H. (2008) Development of a monitoring technique of dryness and wetness in watershed using climatic water budget, *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 173-184.

- Sorooshian, S., AghaKouchak, A., Arkin, P., Eylander, J., Foulfa-Georgiou, E., Harmon, R., Hendrickx, Jan M.H., Imam, Bisher, Kuligowski, R., Skahill, B., and Skofronick-Jackson, G. (2011) Advanced concepts on remote sensing of precipitation at multiple scales, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 92, pp. 1353-1357.
- Sorooshian, S., Hsu, K.-L., Gao, X., Gupta, H.V., Imam, B., and Braithwaite, D. (2000) Evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 81, pp. 2035-2046.
- Stisen, S. and Sandholt, I. (2010) Evaluation of remote-sensing-based rainfall products through predictive capability in hydrological runoff modelling, *Hydrological Process*, Vol. 24, pp. 879-891.
- Ushio, T., Kubota, T., Shige, S., Okamoto, K., Aonashi, K., Inoue, T., Takahashi, N., Iguchi, T., Kachi, M., Oki, R., Morimoto, T., and Kawasaki, Z. (2009) A Kalman filter approach to the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 87A, pp. 137-151.

Received ■ February 12, 2014

Revised ■ February 17, 2014

Accepted ■ March 24, 2014