고해상도 다중위성 강수자료와 분포형 수문모형의 유출모의 적용

김종필*[†] · 박경원* · 정일원* · 한경수** · 김광섭***

*(재) APEC 기후센터 연구본부, **부경대학교 공간정보시스템공학과, ***경북대학교 건축토목공학부

Application of High Resolution Multi-satellite Precipitation Products and a Distributed Hydrological Modeling for Daily Runoff Simulation

Jong Pil Kim*[†], Kyung-Won Park*, Il-Won Jung*, Kyung-Soo Han** and Gwangseob Kim***

*Climate Research Department, APEC Climate Center

**Department of Spatial Information Engineering, Pukyong National University

***School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University

Abstract : In this study we evaluated the hydrological applicability of multi-satellite precipitation estimates. Three high-resolution global multi-satellite precipitation products, the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA), the Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP), and the Climate Prediction Center (CPC) Morphing technique (CMORPH), were applied to the Coupled Routing and Excess Storage (CREST) model for the evaluation of their hydrological utility. The CREST model was calibrated from 2002 to 2005 and validated from 2006 to 2009 in the Chungju Dam watershed, including two years of warm-up periods (2002-2003 and 2006-2007). Areal-averaged precipitation time series of the multi-satellite data were compared with those of the ground records. The results indicate that the multi-satellite precipitation can reflect the seasonal variation of precipitation in the Chungju Dam watershed. However, TMPA overestimates the amount of annual and monthly precipitation while GSMaP and CMORPH underestimate the precipitation during the period from 2002 to 2009. These biases of multi-satellite precipitation products induce poor performances in hydrological simulation, although TMPA is better than both of GSMaP and CMORPH. Our results indicate that advanced rainfall algorithms may be required to improve its hydrological applicability in South Korea.

Key Words : Multi-satellite Precipitation, Distributed Hydrologic Model, TMPA, GSMaP, CMORPH, CREST

요약 : 본 연구에서는 다중위성 강수자료의 수문학적 적용성을 평가하기 위하여 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA), Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP), Climate Prediction Center (CPC) Morphing technique

접수일(2013년 4월 18일), 수정일(1차 : 2013년 4월 23일), 게재확정일(2013년 4월 23일).

[†] 교신저자: 김종필(jpkim@apcc21.org)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(CMORPH) 등 전 지구 규모의 고해상도 다중위성 강수량자료와 분포형 수문모형을 이용하여 유출모의를 수행하였다. 충주댐 유역에 대하여 2002년 1월 1일부터 2009년 12월 31일까지의 기간에 대하여 Coupled Routing and Excess Storage (CREST) 모형을 적용하였다. 분석기간은 준비기간(2002-2003년, 2006-2007년), 보정기간(2004-2005년), 그리고 검증기간(2008-2009년)으로 구분하여 모의를 수행하였다. 각 다중위성 강수량자료를 지상관측자료와 비교결과, 강수의 계절적 변동특성은 잘 반영하고 있으나 연강수량합계 및 월평균강수량에서 TMPA는 과대추정을, GSMaP과 CMORPH는 과소추정하는 경향을 보여주었다. 또한 유출분석결과, TMPA를 제외한 GSMaP과 CMORPH의 충주댐 유역에 대한 수문학적 적용성이 매우 낮은 것을 알 수 있었으며, 향후 다중위성 강수량자료의 활용에 앞서 통계적 보정이나 강수 알고리즘에 대한 개선이 필요한 것으로 판단된다.

1. 서론

홍수, 가뭄 등 극한수문사상의 발생 빈도 및 규모의 증가로 인한 수자원 환경의 변화로 과거 사용되던 수문예측 및 해석방법을 벗어나 더욱 복잡하고 종합적인 방법이 요구되고 있으며, 새로운 융합과학기술의 개발에 대한 필요성이 증가하고 있다. 최근 수문분야에서는 기상 레이더 및 인공위성 등 원격탐사자료로부터 추정된 강수정보를 이용한 연구가 활발하게 수행되고 있다(예, Vieux, 2004; Bonnifait *et al.*, 2009; Li *et al.*, 2012).

인공위성을 이용한 강수관측은 전 지구적 규모에서 시공간적으로 균질한 강수정보를 지속적으로 제공할 수 있으며, 지상에서 관측할 수 없는 해양의 강수정보까지 제공할 수 있다는 장점이 있다. 인공위성을 이용한 강수관측의 초기에는 정지기상위성(Geostationary Meteorological Satellite, GMS)에 탑재된 적외선(infrared, IR)을 이용하여 관측된 구름정상온도(cloud top temperature)로부터 강우강도를 파악할 수 있었다. 그러나 강우강도는 구름의 종류나 발달 상태, 시공간적 위치에 따라 그 변화특성이 다양하기 때문에 강우강도를 계산하는데 어려움이 있었다(Jee and Lee, 2010). 이후에 마이크로파(microwave)를 이용하여 강수에서 복사된 에너지를 보다 직접적으로 측정할 수 있게 되면서 강수 추정 정확도가 크게 향상되었다.

최근에는 열대 및 아열대 지역의 강우관측을 목적으로 한 Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 위성의 자료와 여러 다른 위성들의 자료로부터 추정된 강수량자료를 조합함으로써 전 지구 규모의 고해상도 강수량자료 생산이 가능해졌다. 이러한 고해상도 강수량자료

는 Climate Prediction Center (CPC)의 CPC Morphing technique (CMORPH) (Joyce *et al.*, 2004), National Aeronautics and Space Administration (NASA)의 TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) (Huffman *et al.*, 2007) 그리고 Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)의 Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) (Kubota *et al.*, 2007; Ushio *et al.*, 2009) 등이 대표적인 예이다.

인공위성을 이용한 관측 및 강수추정기술의 괄목할 만한 발전으로 최근 이를 이용한 수문학적 적용과 관련된 연구가 활발하게 수행되어 왔다(예, Hong *et al.*, 2007; Su *et al.*, 2007; Stisen and Sandholt, 2010; Tobin and Bennett, 2010; Bitew and Gebremichael, 2011; Khan *et al.*, 2011; Wu *et al.*, 2012; Likolopoulos *et al.*, 2013). 선행연구들은 사용된 강수량자료, 대상 지역 및 적용된 수문모형에 따라 인공위성 강수량자료의 수문학적 적용성에 대한 다양한 평가결과를 제시하고 있다. 원격탐사자료의 수문학적 활용에 있어 고려될 수 있는 불확실성은 관측 당시 대기상태, 관측기기, 시공간적 대표성 문제 등에서 기인될 수 있다. 그뿐만 아니라 전 지구 규모를 대상으로 설정된 알고리즘으로부터 추정된 강수량자료를 지역적인 수문현상 분석에 이용함으로써 지역특성에 따라 강수량자료의 품질에 차이가 나타날 수 있다. 그렇기 때문에 인공위성 추정강수량을 이용함에 앞서 수문학적 적용성에 대한 평가가 이루어져야 할 것이다. 그럼에도 불구하고 우리나라 유역에 대하여 인공위성 강수량자료의 수문학적 적용에 관한 연구는 현재까지 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 연구에서는 충주댐 유역을 중심으로 우리나라 유역에서 인공위성 강수량자료가 가지는 변화특성을 분석하고, 수문학적 적용성에 대하여 검토하고자 하였다.

2. 연구 지역 및 자료

1) 대상 유역

본 연구에서는 다중위성 강수량자료와 전구수문모형의 적용성 평가를 위하여 남한강 상류지역에 위치하고 있는 충주댐 유역을 대상지역으로 선정하였다. 충주댐 유역은 면적 약 6,648 km²으로 우리나라 전체 국토면적의 약 26.0%를 차지하는 국내 최대 규모의 유역이다(한국대매회, www.kncold.or.kr). 이 유역의 상류부는 고산지대로 협곡으로 되어 있으며, 하류부에는 넓은 준평원지대를 이루고 있다. 평균하폭은 약 600 m, 하천구배는 약 0.8~4.3 m/km로 상류로 갈수록 급격히 증가하는 형상을 띄고 있으며, 연평균강수량은 약 1,113 mm이고 연평균유입량은 약 4,872백만 m³이다. 충주댐 유역은 다른 유역으로부터 하천 유량의 유입이 없고, 댐 운영에 의한 인위적인 유량변화 영향이 없다. 또한 이 유역은 대부분의 면적이 산림(약 82.4%)으로 구성되어 있고, 시가지 지역은 약 0.7%로 교량, 제방, 관망, 도로, 건물 등 구조물의 영향이 비교적 적다.

2) TMPA(or TRMM 3B42) 강수량자료

TRMM 3B42 자료는 NASA의 Goddard Space Flight Center (GSFC)에서 개발된 강수추정 알고리즘을 이용하여 생산되며, 60°S부터 60°N까지 3시간 간격으로 공

간해상도 0.25×0.25°의 강우강도(mm/hr)를 제공하고 있다.

또한 이 자료는 TRMM 위성의 TRMM Microwave Imager (TMI), Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) 위성의 Special Sensor Microwave Imager (SSM/I), AQUA 위성의 Advanced Microwave Scanning Radiometer—Earth observing system (AMS—E) 그리고 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) 위성의 Advanced Microwave Scanning Unit—B (AMSU—B) 등 4가지 수동형 마이크로파 자료로부터 각 센서별로 특화된 강수 알고리즘(Kummerow *et al.*, 1996; Olson *et al.*, 1999; Zhao and Weng, 2002; Weng *et al.*, 2003)을 적용하여 추정된 강수량자료들이 조합되어 만들어진다.

TMPA 알고리즘은 크게 4단계를 거쳐 강수량을 추정한다. 그 첫 번째 단계는 SSM/I, TMI, AMS—E, AMSU—B 등의 저궤도 위성들의 수동형 마이크로파로부터 추정된 강수량자료를 수집, 보정하고 이들을 조합하는 것이다. 두 번째 단계는 이 강수추정자료를 기반으로 GMS, Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES), Meteosat—5, Meteosat—7 등의 정지궤도 위성 IR 자료 및 NOAA 위성군의 저궤도 위성 IR 자료를 이용하여 강수추정치의 생산한다. 세 번째 단계에서는 마이크로파와 적외선 강수추정자료를 조합하며, 마지막 단계에서 우량계 자료와 조합하게 된다.

Fig. 1. Overview of the study area.

3) CMORPH 강수자료

CMORPH 강수자료는 NOAA CPC의 강수추정기법을 이용하여 전 지구 규모의 고해상도 강수 추정 자료를 제공하고 있다. CMORPH 알고리즘에서 사용되는 수동 마이크로파 복사계는 DMSP-13, -14 및 -15 위성의 SSM/I, AQUA 위성의 AMSU-B 및 TRMM 위성의 TMI 등이다. 이 기법은 30분 간격으로 제공되는 정지 궤도위성의 IR 영상으로부터 이동벡터(motion vector)를 계산한 다음 마이크로파 자료를 사용할 수 없는 시점과 장소로 전파시킨다(Joyce *et al.*, 2004). 그 뿐만 아니라 강수의 형태나 강도와 같은 특성도 시간에 따른 가중 선택 보간법을 이용하여 추정할 수 있다.

CMORPH 강수 추정 자료는 공간 해상도 8×8 km(적도 기준) 또는 $0.25 \times 0.25^\circ$, 시간 해상도 30분 간격 또는 3시간 간격 자료로 제공되고 있으나, 본 연구에서는 TRMM 3B42와 동일한 시공간 해상도(3시간, $0.25 \times 0.25^\circ$) 자료를 사용하였다.

4) GSMaP 강수자료

GSMaP는 Japan Science and Technology Agency (JST)에서 2002년부터 2007년까지 수행하던 Core Research for Evolutional Science and Technology (CREST)사업의 일환으로 개발되었으며, 전 지구 규모에서 $0.1 \times 0.1^\circ$ 해상도의 1시간 간격 강수자료를 생산하는 것을 목적으로 하고 있다(Ushio *et al.*, 2009).

GSMaP 알고리즘은 극궤도 위성들의 수동 마이크로

파 자료와 구름의 이동벡터를 결합한다는 점에서 CPC의 CMORPH 기법과 비슷하지만, 강수 시스템의 시간적 변동특성을 보다 정확하게 반영하기 위한 목적으로 Kalman 필터(filter)를 사용한다는 차이점이 있다.

5) 지상관측 강수자료

다중위성 강수자료의 수문모의 적용결과와 비교를 위하여 기상청으로부터 2002년 1월 1일부터 2009년 12월 31일까지 총 39개 관측지점의 강수자료를 수집하였다. 이 자료는 Table 1에서 보는 바와 같이 충주댐 유역에 해당되는 관측지점을 선택한 것으로, 강릉(105), 동해(106), 원주(114), 영월(121), 충주(127), 태백(216), 제천(221), 봉화(271), 영주(272) 등 9개 지점의 종관기상관측 시스템 자료와 30개 지점의 자동기상관측시스템 자료로 구성된다. 분포형 수문모형은 격자형 강수자료가 요구되기 때문에 본 연구에서는 Thiessen 방법을 이용하여 면적강수를 계산한 후 다시 격자자료로 변환하여 모형의 입력자료로 사용하였다.

6) 잠재증발산량

잠재증발산량은 강수량과 함께 장기유출모의에서 가장 중요한 입력 시계열자료 중 하나이다. 잠재증발산량을 추정하기 위한 방법은 여러 연구자들에 의해서 제안된 바 있다(Thornthwaite, 1948; Monteith, 1965; Allen *et al.*, 1998). 본 연구에서는 Food and Agriculture Organization (FAO)에서 제안한 수정 Penman-Monteith 방법(Allen *et*

Table 1. Locations of rainfall stations used in this study

ID	LAT.(°)	LON.(°)	ID	LAT.(°)	LON.(°)	ID	LAT.(°)	LON.(°)
105	37.751	128.891	527	37.417	128.667	584	37.471	128.725
106	37.507	129.124	535	37.712	128.187	591	37.430	128.030
114	37.338	127.947	537	37.496	128.854	597	37.493	128.459
121	37.181	128.458	559	37.773	128.392	601	36.980	128.370
127	36.970	127.953	560	37.670	128.600	620	37.083	127.916
216	37.170	128.989	561	37.582	128.156	621	36.999	128.172
221	37.159	128.194	562	37.270	128.270	622	36.842	127.994
271	36.944	128.915	563	37.265	128.747	638	37.076	128.489
272	36.872	128.517	566	37.820	128.700	639	36.913	128.191
324	36.867	128.067	579	37.344	128.948	660	37.550	128.350
325	37.133	128.033	580	37.612	129.042	814	36.981	128.656
525	37.616	128.383	582	37.228	128.083	818	36.731	128.111
526	37.370	128.420	583	37.410	128.157	838	36.766	128.318

Fig. 2. Hydrological processes in the CREST model.

al., 1998)을 이용하여 잠재증발산량을 계산하였다. 이 방법을 이용하기 위하여 기상청으로부터 전국 종관기상관측시스템의 일최고기온 및 일최저기온, 상대습도, 24시간 풍정합, 일조시간 등 모두 5가지 기상관측자료를 수집하여 계산에 이용하였다. 또한 각 관측지점에 대하여 계산된 잠재증발산량은 분포형 수문모형에 적용하기 위하여 역거리가중평균법을 이용하여 공간자료로 변환하였다.

7) 댐유입량

수문모형의 매개변수 보정과 모의결과의 검증을 위하여 유역 출구지점에 위치한 충주댐의 일단위 유입량을 자료를 이용하였으며, 충주댐 유입량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)으로부터 획득하였다.

3. 분포형 수문모형

1) CREST 모형 및 매개변수 추정

CREST 모형(Wang *et al.*, 2011)은 미국 Oklahoma 대학과 NASA SERVIR 연구팀(www.servir.net)의 공동연구로 개발되었다. 이 모형은 원래 인공위성 강수량 자료를 이용하여 전 지구의 유출량 정보를 파악하기 위한 목적으로 개발되었으나, 유역 규모의 수문모의에도 활용될 수 있도록 설계되었다. 이 모형에서 묘사된 각 계산격자 내 수직 구성요소는 식생피복에 의한 차단, 침투수

량과 지표면 및 지표하 유출을 제어하기 위한 3개 토양층 그리고 차단 및 각 토양층에서 발생하는 증발 및 증산에 의한 수분손실 등이다. 또한 침투수와 지표면 유출수를 분리하기 위하여 Xinanjiang 모형(Zhao and Liu, 1995)과 Variable Infiltration Capacity (VIC) 모형(Liang *et al.*, 1994)에서 적용된 방법과 유사한 가변침투곡선(variable infiltration curve)을 적용하였다. CREST는 또 지표면 유출과 지표하 유출을 모의하기 위하여 선형 저수지 개념을 적용하였으며, 각 계산격자 간 물의 이동을 모의하기 위하여 운동파(kinematic wave) 개념을 적용하였다. Fig. 2는 CREST 모형에서 묘사된 각 격자셀에서의 수문학적 과정을 보여주고 있다.

일반적으로 분포형 수문모형은 각 계산격자에서의 표고, 흐름방향(flow direction), 누적흐름수(flow accumulation) 등의 자료를 이용하여 물리적 매개변수를 추정한다. NASA에서는 Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) 자료를 제공하고 있다. SRTM은 전 지구 규모에서 3" (직도에서 약 90 m) 해상도의 Digital Elevation Model (DEM) 자료이다. 본 연구에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 3" DEM 자료(Fig. 3a)는 모형 실행시간을 고려하여 1 km 해상도의 DEM(Fig. 3b)으로 변환하였다. 이렇게 구축된 1 km DEM은 다시 각 계산격자와 주변 격자 사이의 표고값을 이용하여 최급구배를 계산하고 흐름의 방향을 결정하게 된다(Fig. 3c). 누적흐름수는 임의의 계산격자에서 그 격자의 상류지역에 해당하는 격자수 즉, 강우가 발생하여 유출이 일어날 때 해당 격자로 유입되는 유입량에 기여하는 격자의 개수를 의미하며(Fig. 3d), 유역

Fig. 3. Geographical information for estimating physical parameters.

Table 2. Model parameters requiring optimization in the CREST model

Parameter	Description	Range
coeM	Slope flow speed multiplier	1.0~150.0
expM	Slope flow speed exponent	0.2~0.9
River	Multiplier used to convert slope flow speed to channel flow speed	0.1~3.0
Under	Multiplier used to convert slope flow speed to interflow speed	0.01~1.0
LeakO	Overland reservoir discharge multiplier	0.1~1.0
LeakI	Interflow reservoir discharge multiplier	0.01~0.5
Th	Flow accumulation needed for a cell to be marked as a channel cell	10.0~100.0
GM	Change in DEM used for calculating the slope when the DEM for the downstream cell is higher than the upstream or the downstream cell is a nodata / outside region cell	0.5~2.0
pWm	Maximum soil water capacity of three soil layers	10.0~100.0
pB	Exponent of the variable infiltration curve	0.05~1.5
pIM	Impervious area ratio	0.0~100.0
pKE	Multiplier to convert between input PET and local actual ET	0.1~3.0
pFc	Soil saturated hydraulic conductivity	1.0~10.0
iWU	Initial value of soil water	1.0~100.0
iSO	Initial value of overland reservoir	1.0~10.0
iSU	Initial value of interflow reservoir	1.0~50.0

출구지점에서는 유역 전체 계산격자수와 동일한 값을 가지게 된다.

2) 모형 매개변수 보정

DEM이나 토양도, 토지피복도 등 보조자료를 활용하여 추정될 수 있는 매개변수를 제외한 나머지 매개변수는 보정(calibration)을 통하여 결정된다. CREST 모형은 전역 최적화(global optimization) 방법 중 하나인 Adaptive Random Search (ARS) 기법(Brooks, 1958)을 이용한 모형 보정기능을 제공하고 있다. Table 2는 본 연구에서 CREST 모형 최적화를 위하여 사용된 매개변수들과 각 매개변수의 범위를 보여주고 있다. 이 모형은 또한 최적화를 위한 목적함수로 다음과 같이 Nash-Sutcliffe Coefficient of Efficiency (NSCE)와 Percent Bias (PBIAS)를 사용한다.

$$NSCE = 1 - \sum (Q_i - \bar{Q})^2 / \sum (Q_i - \bar{Q}_o)^2 \quad (1)$$

$$PBIAS = (\sum Q_i - \sum \bar{Q}_o) / \sum \bar{Q}_o \times 100(\%) \quad (2)$$

여기서, 위첨자 i 는 시간적 위치, Q_i 와 $\bar{Q}_o$ 는 각각 관측유량과 모의유량을 의미한다.

4. 분석결과

본 연구에서는 각 자료의 관측기간을 고려하여 2002년부터 2009년을 대상기간으로 결정하였으며, 유출모의에 앞서 Fig. 4와 같이 Thiessen방법을 이용하여 충주댐 유역의 평균강수량을 계산하였다. 또한 각 위성추정 강수량자료와 지상관측 강수량자료에 대하여 간단한 비

교분석을 수행하였다.

1) 유역평균강수량

분석기간에 대한 연평균강수량 비교결과, 우량계 자료의 경우 약 1,393.8 mm였고, TMPA는 1,483.4 mm로 관측 강수량보다 연간 약 6.4%(89.6 mm)가 많은 것으로 나타났으며, GSMaP와 CMORPH는 934.8 mm와 802.5 mm로 연간 약 32.9%(459.0 mm)와 약 48.9%(680.9 mm)가 적은 것으로 나타났다.

Fig. 5는 지상관측 강수량자료와 각 인공위성 강수량자료의 상관성을 보여주는 산점도이다. TMPA, GSMaP, CMORPH와 지상관측자료 사이의 상관계수 및 평균제곱근오차를 계산한 결과 상관계수는 0.726, 0.690, 0.647로 TMPA가 가장 높은 것으로 나타났으며, 평균제곱근오차는 각각 9.4, 9.8, 10.1 mm/day로 CMORPH가 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 그림에서 보는 바와 같이 지상관측 강수량자료에 비해 TMPA는 과대추정을, CMORPH와 GSMaP는 과소추정을 하는 것을 알 수 있었다.

월별평균강수량 비교결과(Fig. 6), TMPA의 경우 3월과 12월에는 과소추정을, 나머지는 모두 과대추정을 하는 것으로 나타났으며, GSMaP나 CMORPH에 비하여 오차가 작고 연중 계절변동특성을 잘 묘사하고 있는 것을 알 수 있었다. 그러나 1월 PBIAS가 약 42.1%로 과대추정, 12월은 약 -41.7%로 과소추정하여 연중 PBIAS가 $\pm 10\%$ 내외임을 감안할 때 12월과 1월에 TMPA는 강수량추정 정확도가 매우 낮게 나타남을 알 수 있었다. GSMaP의 경우 1월에는 과대추정을 나머지 기간에는 모두 과소추정하는 경향을 보여주었다. 5월에는

Fig. 4. The Thiessen's polygons and spatial locations of raingauges and three multi-satellite precipitation products.

Fig. 5. Scatter plots of comparison between multi-satellite precipitation estimates and ground measurements in the study area.

Fig. 6. Comparison of seasonal variation of precipitation.

Fig. 7. Comparison of total annual precipitation.

PBIAS가 약 -3.7% 로 가장 작았으며, 11월에는 약 -50.7% 로 가장 큰 오차를 보여주었다. CMORPH의 경우 전 기간에 대하여 과소추정하는 경향을 보이고 있으며, TMPA나 GSMaP에 비해서 PBIAS가 가장 크게 나타났다. 특히 12월, 1월, 2월에는 PBIAS가 각각 -77.6% , -89.0% , -82.5% 로 연중 PBIAS가 가장 큰 기간으로 나타

났다. 연강수량합계를 비교한 결과(Fig. 7), TMPA, GSMaP, CMORPH의 연평균 PBIAS는 각각 6.1% , -32.4% , -42.2% 로 TMPA가 과대추정을 하지만 가장 관측자료에 근접한 것을 알 수 있었다.

2) 유출모의결과

전체 분석기간 중 2002년과 2003년 및 2006년과 2007년을 준비기간, 2004년부터 2005년을 보정기간, 그리고 2008년부터 2009년을 검증기간으로 구분하였다. 각 강수량자료에 대하여 준비기간과 보정기간에 대한 모의를 수행한 다음 보정기간에 대하여 매개변수를 보정하고, 이들 매개변수를 이용하여 검증기간에 대하여 모의를 수행하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 보정기간과 검증기간에 대하여 관측유량과 모의유량을 비교한 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 지상관측 강수량뿐만 아니라 다중위성 강수량자료를 이용한 모의유량은 일단위 유출량의 변동 특성을 비교적 잘 묘사하고 있는 것으로 나타났다. Table 3에서 제시된 통계자료에서도 검증기간의 GSMaP를 이용한 모의결과(상관계수 0.728)를 제외하고 모두 0.767 이상의 높은 상관계수(R)를 보여주고 있다. 그러나 보정기간 중 2004년 6월 21일, 7월 17일, 8월 19일 등과 검증기간 중 2008년 7월 25일, 2009년 7월 13일과 15일 등 유출량이 상대적으로 많았던 홍수사상에 대하여 과소추정됨을 알 수 있었다.

모형 보정기간동안 관측유량의 평균은 $194.8 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 우량계 자료를 사용한 모의유량에 대한 평균은 $180.7 \text{ m}^3/\text{sec}$, TMPA는 $181.9 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 약 10% 의 오차를 나타냈다. 반면에 GSMaP와 CMORPH는 $135.9 \text{ m}^3/\text{sec}$ 과

Fig. 8. Comparison hydrographs between the observed discharge and the simulated discharge during the calibration period.

Fig. 9. Comparison hydrographs between the observed discharge and the simulated discharge during the validation period.

Table 3. Summary statistics for daily streamflow simulation in the study basin.

	Calibration Period (2004-2005)				Validataion Period (2008-2009)			
	Gauge	TMPA	GSMaP	CMORPH	Gauge	TMPA	GSMaP	CMORPH
NSCE	0.751	0.687	0.599	0.602	0.682	0.632	0.526	0.534
PBIAS	7.228	6.616	30.206	26.153	-11.437	-5.656	3.780	21.160
R	0.878	0.844	0.784	0.797	0.833	0.808	0.728	0.767

143.8 m³/sec로 우량계 자료나 TMPA를 사용하였을 경우와 비교해서 오차가 큰 것으로 나타났다. 또한 검증기간동안 관측유량 평균은 112.2 m³/sec이며, 지상관측자료를 사용한 모의유량 평균은 약 125.0 m³/sec, TMPA는 약 118.5 m³/sec, GSMaP는 약 107.9 m³/sec, 그리고 CMORPH는 약 88.4 m³/sec로 나타났다. 검증기간에는 우량계 자료를 사용한 경우보다 TMPA와 GSMaP를 사용한 경우의 평균유량이 관측유량에 더욱 가깝게 나타났다(Table 3의 PBIAS).

보정기간동안 TMPA, GSMaP, CMORPH 자료를 이용

한 모의결과 NSCE는 각각 0.687, 0.599, 0.602로 비교적 낮은 것을 알 수 있었다. 그러나 우량계 자료를 사용한 경우에도 NSCE가 0.751로 높지 않았으며, 이를 기준으로 보면 TMPA는 지상관측자료를 이용한 모의결과의 약 91.5%, GSMaP는 약 79.8%, CMORPH는 약 80.2%의 성과를 보여준다고 할 수 있다. 검증기간동안의 NSCE는 모두 보정기간에 비해서 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 보정기간에 대해 최적화된 모형 매개변수를 검증기간에 대해 적용한 것에 따른 당연한 결과라 할 수 있다. 보정기간을 기준으로 검증기간에 대한 NSCE

를 보면, 우량계 자료를 사용한 경우 약 90.8%, TMPA의 경우 약 92.0%, GSMaP는 약 87.8%, CMORPH는 약 88.7%인 것을 알 수 있었다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 고해상도 다중위성 강수자료인 TMPA, GSMaP, 그리고 CMORPH 자료를 이용하여 일 단위 유출모의 적용성을 평가하고자 하였다. 충주댐 유역을 대상으로 2002년부터 2009년까지 기간에 대하여 분포형 수문모형인 CREST 모형을 적용하였다. 또한 유출모의에 앞서 각 다중위성 강수자료와 지상관측 강수자료의 비교분석을 수행하였다.

유역평균강수량 비교결과, 2002년부터 2009년까지 TMPA의 연평균강수량은 우량계 관측자료보다 약 6.4% 과대추정을, GSMaP와 CMORPH는 약 32.9%와 약 48.9% 과소추정하였다. 연강수량합계에서도 해마다 다소 차이는 있으나 TMPA는 과대추정을, GSMaP와 CMORPH는 과소추정하고 있었다. 월별 강수분포는 우량계 자료와 동일하게 7, 8월에 집중되어 있는 전형적인 우리나라 강수분포형태를 잘 표현하고 있으나 연평균강수량에서 나타난 것과 같이 GSMaP와 CMORPH는 과소추정하고 있으며, 오차가 매우 큰 것을 알 수 있었다.

상관계수(R)를 토대로 지상관측 강수자료를 이용한 유출모의와 다중위성 강수자료를 이용한 유출모의결과 모두 일 단위 유출변화특성을 잘 묘사하고 있는 것으로 분석되었다. Nash-Sutcliffe 효율계수(NSCE) 분석결과 대상유역에 대하여 대체로 낮게 나타났으나, 지상관측 강수자료를 이용한 모의결과를 기준으로 판단할 경우 TMPA는 지상관측 강수자료의 모의성과 대등한 결과를 보여주었다고 판단된다. 그러나 강수분석결과와 마찬가지로 GSMaP와 CMORPH는 지상관측자료의 성능에는 미치지 못하는 결과를 보여주었다.

이상의 분석결과를 토대로 할 때 분석에 사용된 다중위성 강수자료 중 TMPA를 제외한 GSMaP와 CMORPH의 충주댐 유역에 대한 유출모의 활용성이 매우 낮으며, 향후 이러한 자료의 활용성을 높이기 위한 편의보정이나 강수 알고리즘 개선이 필요할 것으로

판단된다.

참고문헌

- Allen, R., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italy.
- Bitew, M.M. and M. Gebremichael, 2011. Assessment of satellite rainfall products for streamflow simulation in medium watersheds of the Ethiopia highlands, *Hydrology and Earth System Sciences*, 15: 1147-1155.
- Bonnifait, L., G. Delrieu, M.L. Lay, B. Boudevillain, A. Masson, P. Belleudy, E. Gaume, and G.M. Saulnier, 2009. Distributed hydrologic and hydraulic modelling with radar rainfall input: Reconstruction of the 8-9 September 2002 catastrophic flood event in the Gard region, France, *Advances in Water Resources*, 32: 1077-1089.
- Hong, Y., R.F. Adler, F. Hossain, S. Curtis, and G.J. Huffman, 2007. A first approach to global runoff simulation using satellite rainfall estimation, *Water Resources Research*, 43, W08502, doi: 10.1029/2006WR005739.
- Huffman, G.J., R.F. Adler, D.T. Bolvin, G. Gu, E.J. Nelkin, K.P. Bowman, Y. Hong, E.F. Stocker, and D.B. Wolff, 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales, *Journal of Hydrometeorology*, 8: 38-55.
- Jee, J.-B. and K.-T. Lee, 2010. Estimation of rainfall intensity for MTSAT-1R data using microwave rainfall, *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(5): 511-525.
- Joyce, R.J., J.E. Janowiak, P.A. Arkin, and P. Xie, 2004. CMORPH: A method that produces global

- precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution, *Journal of Hydrometeorology*, 5: 487-503.
- Khan, S.I., Y. Hong, J. Wang, K.K. Yilmaz, J.J. Gourley, R.F. Adler, G.R. Brakenridge, F. Policelli, S. Habib, and D. Irwin, 2011. Satellite remote sensing and hydrologic modeling for flood inundation mapping in Lake Victoria Basin: Implications for hydrologic prediction in ungauged basin, *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(1): 85-95.
- Kubota, T., S. Shige, H. Hashizume, K. Aonashi, N. Takahashi, S. Seto, M. Hirose, Y.N. Takayabu, K. Nakagawa, K. Iwanami, T. Ushino, M. Kachi, and K. Okamoto, 2007. Global precipitation map using satelliteborne microwave radiometers by the GSMaP project: Production and validation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(7): 2259-2275.
- Kummerow, C., W.S. Olson, and L. Giglio, 1996. A simplified scheme for obtaining precipitation and vertical hydrometeor profiles from passive microwave sensors, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34: 1213-1232.
- Li, X.H., Q. Zhang, and C.Y. Xu, 2012. Suitability of the TRMM satellite rainfalls in driving a distributed hydrological model for water balance computations in Xinjiang catchment, Poyang lake basin, *Journal of Hydrology*, 426-427: 28-38.
- Liang, X., D.P. Lettenmaier, E.F. Wood, and S.J. Burges, 1994. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, *Journal of Geophysical Research*, 99(D7): 14415-14428.
- Likolopoulos, E.I., E.N. Anagnostou, and M. Borga, 2013. Using high-resolution satellite rainfall products to simulate a major flash flood event in Northern Italy, *Journal of Hydrometeorology*, 14: 171-185.
- Monteith, J.L., 1985. Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948, *Advances in Evapotranspiration, Proceedings of the ASAE Conference on Evapotranspiration*, ASAE, St. Joseph, Michigan: Chicago: 4-12.
- Olson, W.S., C. Kummerow, Y. Hong, and W.-K. Tao, 1999. Atmospheric latent heating distributions in the Tropics derived from satellite passive microwave radiometer measurements, *Journal of Applied Meteorology*, 38: 633-664.
- Stigen, S., and I. Sandholt, 2010. Evaluation of remote-sensing-based rainfall products through predictive capability in hydrological runoff modelling, *Hydrological Processes*, 24: 879-891.
- Thorntwaite, C. W., 1948. An approach towards a rational classification of climate, *Geographical Review*, 38: 55-94.
- Tobin, K.J. and M.E. Bennett, 2010. Adjusting satellite precipitation data to facilitate hydrologic modeling, *Journal of Hydrometeorology*, 11: 966-978.
- Ushino, T., T. Kubota, S. Shige, K. Okamoto, K. Aonashi, T. Inoue, N. Takahashi, T. Iguchi, M. Kachi, R. Oki, T. Morimoto, and Z. Kawasaki, 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*, 87(A): 137-151.
- Vieux, B.E. 2004. *Distributed Hydrologic Modeling using GIS*, ISBN 0-7923-7002-3, Kluwer Academic Publisher, Norwell, Massachusetts, Water Science and Technology Library, 48: 293.
- Wang, J., Y. Hong, L. Li, J.J. Gourley, S.I. Khan, K.K. Yilmaz, R.F. Adler, F.S. Policeli, S. Habib, D. Irwin, A.S. Limaye, T. Korme, and L. Okello, 2011. The coupled routing and excess storage (CREST) distributed hydrological model, *Hydrological Science Journal*, 56(1): 84-98.
- Weng, F., L. Zhao, R. Ferraro, G. Poe, X. Li, and N. Grody, 2003. Advanced microwave sounding unit

- cloud and precipitation algorithm, *Radio Science*, 38: 8068-8079.
- Wu, H., R.F. Adler, Y. Hong, Y. Tian, and F. Policelli, 2012. Evaluation of global flood detection using satellite-based rainfall and a hydrologic model, *Journal of Hydrometeorology*, 13: 1268-1284.
- Zhao, R.J. and X.R. Liu, 1995. The Xinanjiang model, *Computer Models of Watershed Hydrology*, V.P. Singh, Ed., Water Resources Publications: 215-232.
- Zhao, L. and F. Weng, 2002. Retrieval of ice cloud parameters using the Advanced Microwave Sounding Unit, *Journal of Applied Meteorology*, 41: 384-395.