



미계측 유역에서의 수문 분석을 위한 글로벌 격자형 기후 자료의 활용성 평가

조재필* · 김철겸** · 황세운*** · 신지현**** · 박지훈*†

*APEC기후센터 기후사업본부 선임연구원, **한국건설기술연구원 국토보전연구본부 연구위원
 경상대학교 애그로시스템공학부 부교수, *APEC기후센터 기후사업본부 연구원

Hydrologic Evaluation of Grid-based Global Climate Data for Use in Ungauged Watershed

Cho, Jaepil*, Kim, Chul Gyum**, Hwang, Syewoon***, Shin, Jihyeon**** and Park, Jihoon*†

*Research Fellow, Climate Service and Research Department, APEC Climate Center, Busan, Korea

**Research Fellow, Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ilsan, Korea

***Associate Professor, Department of Agricultural Engineering, Institute of Agriculture and Life Science, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

****Researcher, Climate Service and Research Department, APEC Climate Center, Busan, Korea

ABSTRACT

We assessed the usability of satellite and reanalysis data for estimating streamflow amount in an ungauged watershed in consideration of the spatial distribution of precipitation. We used CHIRPS, PERSIANN-CDR, CFSR, ERA-Interim, and MERRA2 to obtain grid-based global data and daily GHCN as measured data for comparison. Evaluation results of daily GHCN data through comparison to the ASOS data from Gangneung station adjacent to Chungju Dam basin showed a greater than 60% missing data rate. The GHCN data underestimated extreme rainfall events caused by typhoons and overestimated rainfall events in certain years compared to the normal range. In the comparison of grid-based global data, MERRA2 data showed the best reproducibility, with a 0.86 correlation coefficient, on the daily time scale. The SWAT model was applied to Chungju Dam basin for estimating streamflow and showed -16.1% total error when the MERRA2 data was used as model input without bias-correction. However, both total error and RMSE were decreased when the monthly biases of MERRA2 data at the weather stations were corrected by comparing to the 30-year average values. In addition, the biases were spatially interpolated for areas in the basin without a station. Total error was slightly improved to -13.1% when the bias was corrected using the GHCN data from Gangneung station, while the total error showed a satisfactory -6.3% when using ASOS data from Daegwallyeong station for streamflow estimation after bias-correction. In the absence of measured weather data, it is desirable to use the most appropriate grid-based data after bias-correction through comparison with neighboring weather stations to reflect the characteristics of the area.

Key words: Ungauged watershed, Reanalysis, Uncertainty, Chungju Dam, SWAT

1. 서 론

댐 또는 저수지 등의 수리시설물 신축에 있어 안정적 구조물 설계를 위해서는 지역의 기후특성을 포함하는 수문기상 정보가 필수적으로 고려된다. 일반적으로 홍수량 추정에 필요한 기상 정보는 수집이 용이한 인근지역의 관측 자료를 활

용하고 수문 모델링 등을 통해 검정된 홍수량 모의결과를 바탕으로 유출 특성의 재현성을 확보하게 된다. 한편 관측 자료가 부족하거나 부재한 미계측 지역의 경우에는 신뢰할 수 있는 유출량 산정을 위해서 인근의 계측지역에 대한 모델 평가나 간접적 기상정보를 활용한 검증 등을 통해 최선의 과학적인 평가가 이루어지는 것이 보통이다.

† Corresponding author: gtjihoon@apcc21.org (12, Centum 7-ro, Haeundae-gu Busan 48058 Korea APEC Climate Center, Tel : +82-51-745-3963)

Received December 2, 2018 / Revised December 21, 2018 1st, January 18, 2019 2nd / Accepted January 30, 2019

유역규모의 장기유출 모형으로는 Soil and Water Assessment Tool (SWAT)와 Hydrologic Simulation Program-Fortran (HSPF) 이 널리 활용되고 있다. HSPF 모형은 개념적인 분포형 모형의 특성을 갖고 있는 반면 (Donigan et al. 1984), SWAT 모형의 경우는 미국의 농업유역에 적합하게 고안되어 다양한 시비, 경운, 관개 등 농업관련 관리방안 (managements)들을 고려할 수 있다. 특히 SWAT은 많은 기작들이 경험식을 기반으로 구현되고 있기는 하지만 매개변수들이 물리적 의미를 가지고 있어 미계측 유역에 적합한 것으로 알려져 있다 (Neitsch et al. 2011). 모형의 검·보정을 위한 유량 관측 자료가 존재하는 유역에 대한 적용성 비교 평가에서는 두 모형 모두 만족할 만한 결과를 보였으나 HSPF가 다소 좋은 결과를 보이는 것으로 알려져 있다 (Im et al. 2007; Xie and Lian 2013). 하지만 관측유량 자료가 없는 미계측 유역의 특성에서는 개념적 매개변수들로 구성된 HSPF의 경우 SWAT 과 비교하여 모의값의 변동 폭이 크게 나타나 SWAT 모형이 보다 적합한 것으로 알려져 있다 (Xie and Lian 2013). 더불어 SWAT 모형은 토양, 토지이용, 기상, 영농기법 등을 포함한 입력자료 생성 프레임워크 개발을 통해 미계측 지역인 Upper Mississippi River Basin 유역에 적용되어 그 적용성이 검증된 바 있다 (Srinivasan et al. 2010). 미계측 유역에서의 모델링 적용성 평가의 경우에는 기상 관측정보가 존재하는 상황에서 관측 유량이 존재하지 않는 유역에서의 유출량 모의 성능 향상을 위한 매개변수 전역화 관점의 미계측유역 적용성이 연구되어 왔다 (Gitau and Chaubey 2010; Emam et al. 2016; Sisay et al. 2017). 기상 및 수문에 대한 직접적 관측이 이루어지고 있지 않거나 부족한 경우 활용할 수 있는 관련 자료나 적용기법에 대한 연구는 미계측 지역에 대한 합리적인 모델링과 시나리오 적용을 위해 선행되어야 할 과제이다.

국가별 관측 자료를 수집하기 어려운 일반 사용자가 유역 수문 분석에 활용 가능한 전지구 대상 관측 자료로 Global Historical Climatology Network (GHCN) 자료가 있다 (Menne et al. 2012). GHCN 자료는 전 세계의 지상 관측소 자료를 통합하여 제공하고 있는 데이터베이스로서 매일 갱신되는 공개 자료이다. 본 연구에서 사용한 일단위 자료 (GHCN-Daily)는 180여 개국의 100,000개가 넘는 관측소로부터 강수량, 최고 및 최저 기온, 강설량 등의 기상변수에 대하여 미국의 National Center for Environmental Information (NCEI)을 통해 제공하는 자료이다. GHCN 자료는 국가별 기상청을 통해서 공개되는 자료로서 한반도의 경우 11개 관측소가 제공되고 있어 관측소가 없는 지역에서는 활용이 불가능하다.

SWAT 모형의 미계측 유역에서의 적용성 관점에서 기상

자료가 없는 유역에 대한 적용을 위해 미국의 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 제공하는 재분석자료 (Reanalysis)의 하나인 Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)자료를 이용하여 격자형 기반의 Global Weather Data for SWAT 서비스를 제공하고 있다 (Dile and Srinivasan 2014a). 재분석자료는 일반적으로 초기조건에 민감한 기상·기후예측모형의 입력 자료로 활용하기 위해 과거 관측 자료를 기반으로 자료동화를 통해 생산·제공되는 자료이다. 앞서 언급한 CFSR 자료는 SWAT 모형에서 필요로 하는 강수, 최저기온, 최고기온, 상대습도, 풍속, 일사량 등 6개 변수에 대해 SWAT 모형의 입력 포맷 형태로 변환하여 자료를 제공하고 있으며 이를 이용한 유출량 적용성 연구가 수행된 바 있다 (Dile and Srinivasan 2014b; Fuka et al. 2014; Worqlul et al. 2017). 재분석자료 이외에 미계측 유역에 활용 가능한 격자형 자료로 위성자료가 있다. 위성자료는 재분석자료와 비교하여 높은 공간해상도를 갖고 있으며 실제 위성에 의해 측정된 시그널을 기반으로 가공된 자료라는 장점을 갖고 있는 반면 강수량에 대한 정보만을 제공하는 한계를 가진다. 재분석 자료의 경우는 위성자료와 비교하여 공간해상도가 낮은 격자형 자료로 자료동화에 사용된 관측소의 공간적 밀도와 관측 자료의 품질 및 사용된 자료동화 기법에 따라 대상지역별 데이터 질이 다를 수 있다.

격자형 자료들은 결측이 없는 장기간의 자료를 제공함으로써 계측자료가 부족한 지역의 기후 특성을 이해하는데 활용될 수 있다. 더 나아가 미계측 유역에서 기후변화에 따른 수문전망 및 영향 평가를 수행하는데 있어서도 전지구기후모형의 편의보정을 위한 레퍼런스 자료로 활용될 수 있다. 이와 같이 최근 생산되고 있는 다양한 격자형 자료의 재현성 비교·평가와 선정된 격자형 자료의 수문 분석 관점에서의 활용성 평가는 이들 자료의 합리적인 적용을 위해 선행되어야 하나 관련연구는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 미계측 유역에서의 위성 또는 재분석 자료의 활용을 위해서 격자형 관측 자료들 중에서 실측 기상 특성에 대한 재현성을 비교·평가하고 SWAT 모델링 실험을 통한 격자형 관측 자료의 활용성을 평가하고자 하였다.

2. 연구 재료 및 방법

2.1 수문 모형 선정 및 대상 유역

수문분석을 위한 유역모형으로서 계측자료가 많지 않은 지역에서의 글로벌 자료의 활용 가능성을 평가하기 위한 연

구의 목적을 고려하여 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형을 선정하였다. SWAT은 미국 농무성 (USDA-ARS)에서 개발한 연속형 준분포형 유역모형으로 (Arnold et al. 1993), 대규모의 복잡한 유역에 대해 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사, 농업화학물질의 거동과 관련한 토지관리 방법의 영향을 예측하기 위한 모형이다 (Neitsch et al. 2011). 대상 유역으로 선형연구 (Kim et al. 2011; Kim et al. 2018)를 통해 SWAT 모형의 유량 및 수질 모의 적용성이 검증되고, 미래 기후변화 영향 평가가 수행되었던 충주댐 유역을 선정하였다 (Fig. 1).

2.2 기상 자료

본 연구에서는 미계측 유역에 대해 강수량 정보로 활용할 수 있도록 공개된 자료들 중에서 5종의 위성자료 및 재분석 (meteorological reanalysis) 자료를 선정하여 적용성을 검토하였다. Table 1은 사용된 위성자료와 재분석 자료의 특성을 정리한 표이다. 우선 Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 자료는 SWAT 모형에 필요한 6개 변수를 쉽게 사용할 수 있도록 제공하고 있어 편의성 관점에서 선정하였다. 다

만 CFSR 자료는 2014년 7월 이후 자료가 주기적으로 갱신되지 않고 있다. 나머지 4종의 자료는 정기적으로 갱신되는 자료를 대상으로 선정하였다. 반면에 많이 사용되고 있는 APHRODITE 및 TRMM 자료들의 경우 최근 자료가 갱신되지 않아 제외하였다. 따라서 위성자료는 Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) 자료와 PERSIANN Precipitation Climate Data Record (PERSIANN-CDR) 자료를 선택하였고, 재분석 자료로는 유럽중기예보센터 (ECMWF)에서 생산된 ERA-Interim 재분석 자료와 미국의 NASA에서 제공하고 있는 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA2) 자료를 사용하였다. ERA-Interim 자료는 12시간 간격의 강수 자료와 4시간 간격의 기온 자료를 일단위로 변환하여 사용하였고, MERRA2 자료는 시간단위 강수자료를 일단위로 변환하여 사용하였으며 기온 변수들은 일단위 자료를 직접 다운받아 사용하였다. 일단위로의 변환을 위해서 협정세계시 (UTC)로 제시된 격자형 자료와 9시간 빠른 한국표준시 (KST)를 기준으로 계측된 관측 자료 사이의 시간차를 고려하였다. 즉, 시간단위 MERRA2는 9시간을 ERA-Interim은 12시간을 앞당겨 강수량의 경우는 누적하고 기온의 경우는 평균

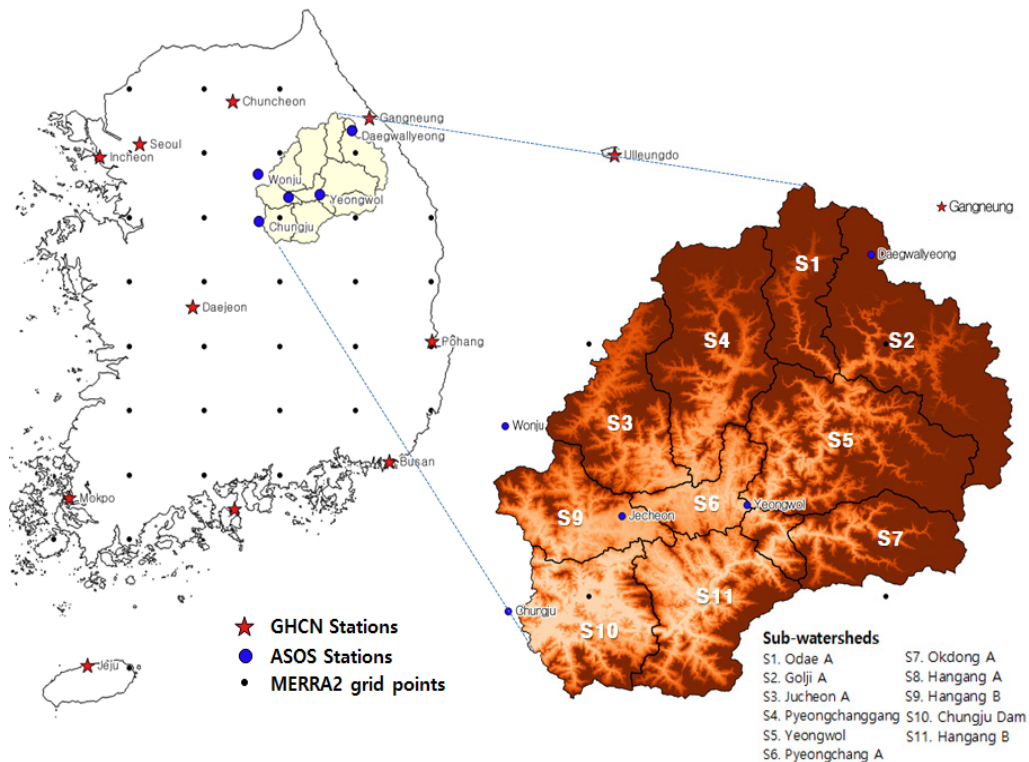


Fig. 1. Sub-watershed delineation of the study watershed.

하여 일단위 값을 산정하였다.

격자형 관측 자료의 평가를 위해 필요한 기상관측자료는 Global Historical Climatology Network (GHCN) 일단위 자료를 사용하였다. GHCN을 통해 제공되는 한반도 일단위 자료는 11개 관측소에서 83년 이후 자료가 존재하나 격자형 자료 중에서 CFSR 자료가 존재하지 않는 제주 및 울릉도 관측소를 제외한 9개 관측소를 최종 평가에 사용하였다.

2.3 격자형 관측자료 선정

미계측 유역에 가장 적합한 격자형 관측 자료는 유출량에 가장 큰 영향을 미치는 강수량을 기준으로 선정하였다. 대상 유역에 기상관측소 자료가 없는 경우 가장 가까이에 위치한 GHCN 자료를 사용할 수 있다. 따라서 미계측 유역에서의 격자형 자료의 활용성 평가를 위해서 동일한 조건에서 활용 가능한 GHCN 자료를 가용한 유일한 관측 자료로 가정하여 사용하였다. 공개되어 있는 일단위 GHCN 자료의 관측소 개수 및 질은 국가별로 다를 수 있다. 따라서 본 연구는 실제 미계측 유역에서 공개되어 있는 위성, 재분석, GHCN 자료 기반의 평가가 목적이다. 한반도에서의 GHCN 자료의 품질 및 활용 가능성을 평가하기 위하여 기상청에서 quality control (QC)을 거쳐 제공하고 있는 종관기상관측시스템 (ASOS: Automated Surface Observing System)의 일단위 자료와 비교하였다.

격자형 자료의 평가는 다운로드 받은 일단위 GHCN 강수량 자료와 5가지 격자형 자료로부터 관측소 별로 추출한 일

단위 (daily) 강수량을 이용하여 월단위 (monthly) 및 연단위 (annual) 강수량, 30년 기간의 월평균 강수량을 계산한 후 시간규모별로 비교하였다. 5개 격자형 자료의 경우 1983년 이후 자료가 공통적으로 존재하지만 유출량의 민감도 분석을 위해서는 충주댐 관측 유입량 자료가 존재하는 1986년부터 30년 기간 (1986~2015)을 분석기간으로 선정하였다. 일단위 자료로부터 월단위, 연단위, 월평균 강수량을 산정하는데 있어서 사용된 관측 또는 격자형 자료 중에서 결측이 하나라도 존재하는 날은 모두 분석에서 제외하였다.

비교는 일단위, 월단위, 연단위 및 월평균 강수량에 대하여 관측자료와의 전체적인 편차를 살펴보기 위해 총오차 (Err), RMSE를 관측의 표준편차로 나누어 표준화한 Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), 관측 자료의 경향을 잘 반영하는지를 살펴보기 위한 Pearson Correlation Coefficient (CC)를 식 (1) ~ (3)에서와 같이 사용하였다.

$$Err = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad \text{식 (1)}$$

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} \quad \text{식 (2)}$$

Table 1. List of used satellite and reanalysis dataset and descriptions

Data type	descriptions						
	Spatial scale	Temporal scale of raw data	variables provided	data period	Update	Reference	
Satellite	CHIRPS	25 km	daily	prec only	1981~2018	monthly update with 1-month delay	Funk et al. 2015
	PERSIANN-CDR	25 km	daily	prec only	1983~2017	Annual update	Ashouri et al. 2015
Reanalysis	CFSR	35 km	daily	prec, tmax, tmin, tavg, rhum, srad, wspd	1979~2014	not updated	Dile and Srinivasan 2014b
	MERRA2	50 km	prec: hourly temp: daily	prec, tmax, tmin	1980~2018	monthly update with 1-month delay	Gelaro et al. 2017
	ERA-Interim	75 km	prec: 12-hourly temp: 4-hourly	prec, tmax, tmin	1979~2018	monthly update with 1-month delay	Dee et al. 2011

prec: precipitation, tmax: maximum temperature, tmin: minimum temperature, tavg: average temperature, rhum: relative humidity, srad: solar radiation, wspd: wind speed

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n ((O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad \text{식 (3)}$$

n : 샘플 개수, O_i : 특정 시점의 관측값, P_i : 특정 시점의 모의값, \bar{O} : 관측 평균, \bar{P} : 모의 평균

2.4 기상관측 자료에 따른 장기 유출 불확실성 분석

미계측 유역에서 기상 자료에 따른 장기유출의 불확실성 평가를 위해서는 비교의 기준으로 사용될 수 있는 장기유출 모의결과가 필요하다. 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 충주댐 말단과 주요 합류점을 기준으로 11개 소유역으로 구분하여 보정 및 검정을 수행한 SWAT 매개변수 (Kim et al. 2011)를 기반으로 모델링 조건을 변경하여 수행된 미래 기후변화 영향 평가 (Kim et al. 2018) 결과를 이용하였다. 즉, 기후변화에 따른 유출량 변화를 모의하기 위해서는 30년 이상의 장

기 유출 모의가 필요하기 때문에 유역내외의 5개 기상 관측소 (대관령, 원주, 영월, 충주, 제천) 중에서 관측기간이 짧은 영월 관측소를 제외한 4개 관측소 자료를 이용하였다. 기후변화 시나리오 자료의 경우 잠재증발산량 산정에 필요한 모든 기상변수에 대한 자료의 수집이 어려운 점을 고려하여 Penman-Monteith 기법 대신에 최고기온 및 최저기온 자료만을 필요로 하는 Hargreaves 방법을 이용하여 모의한 30년 (1986-2015) 기간의 유출량 결과를 사용하였다.

동일한 기간에 대하여 앞서 평가를 통해 선정된 격자형 관측 자료로부터 SWAT 소유역별 기상 입력 자료를 추출한 후 모의한 결과를 기준 유출량과 비교하였다. 정량적인 평가를 위해서 격자형 관측 자료의 평가에 사용되었던 NRMSE 및 CC에 총오차 (Err)를 사용하였다. 격자형 자료의 경우 실제 관측소 자료와 비교하여 편의 (bias)가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 유역모델링을 이용한 유출량 분석에 있어서 격자형 관측 자료를 편의보정 없이 바로 사용한 경우와 가용한 기상 관측소의 자료를 이용하여 편의를 보정한 후 사용한 경우에 대해 비교하였다. 격자형 자료의 편의보정 (Bias

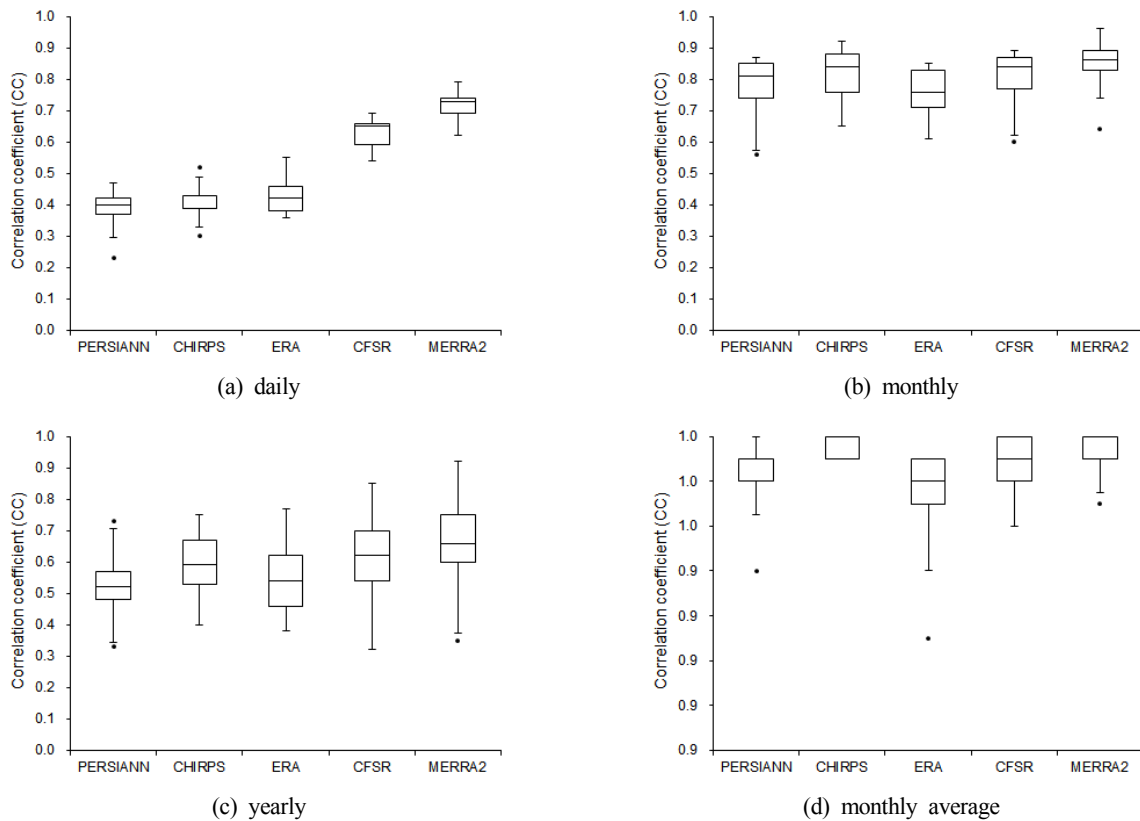


Fig. 2. Performance of grid-based observation data for precipitation by comparison with GHCN data.

Correction)은 우선 관측소가 존재하는 격자점들에 대하여 관측 및 격자 자료의 월별 평균이 같아지도록 보정계수를 정한다. 이후 앞서 산정된 보정계수들을 입력으로 공간적 내삽을 통하여 관측지점이 없는 격자점들에 대한 보정계수를 결정한다. 이후 편의보정은 강수량의 경우는 비율을 곱하여 기온의 경우는 차이를 더하거나 빼서 편의를 보정하였다.

3. 연구 결과

3.1 격자형 관측자료 선정

수집할 수 있는 기상 관측 자료가 인근의 GHCN 자료가 유일하다는 가정하에 격자형 관측 자료와 GHCN 자료와의 비교를 통한 평가 결과는 Fig. 2와 같다. 전체적으로 상관계수 (Correlation Coefficient)가 높은 경우 NRMSE는 낮은 반비례 경향을 보였다. 이는 경향을 잘 모의하는 격자형 자료가 전체적인 편의도 작게 잘 재현하고 있음을 보여 준다. 일단위 강수량의 경우 상관계수는 MERRA2가 모든 관측소에 대하여 가장 높은 값을 보였다. 가장 높은 상관계수는 인천 및 목포 관측소에서 0.79의 값을 보였고 가장 낮은 값은 강릉 관측

소에서 0.62의 값을 보였다. CFSR 자료가 두 번째로 좋은 결과를 보였으며 나머지 3개 자료는 서로 비슷한 결과를 보였다. 이는 MEERA 자료와 비교하여 MERRA2의 개선된 자료 동화 기법에 더하여 시간단위 자료로부터 지역 시간대를 고려하여 일단위 강수량을 산정한 복합적인 영향으로 판단된다. 격자형 자료에 따른 상관계수에 있어 월단위, 연단위, 월평균 비교에서는 서로 간에 큰 차이를 보이지 않고 있어 모든 자료들이 월단위, 연단위, 그리고 월평균 강수량의 경향성을 비슷하게 재현하고 있는 것으로 나타났다.

GHCN 일단위 자료 대신에 QC를 거친 기상청의 일단위 ASOS 강수량 자료를 이용하여 동일한 분석을 수행하였다 (Table 2). 일단위 평가에서 MERRA2의 경우 다른 격자형 자료와 비교하여 가장 높은 CC값과 가장 낮은 NRMSE의 결과를 나타내 일관적인 결과를 보여주었다. 월단위, 연단위, 월평균 강수량의 경우에는 CHIRPS가 높은 값을 보이는 경우가 있지만 MEERA2의 결과와 0.01의 차이를 보여 주었다. 상관계수의 값은 격자형 자료별로 유의한 차이를 보이고 있지 않지만 NRMSE의 경우에는 MERRA2 자료가 다른 격자형 자료와 비교하여 상대적으로 낮은 경향을 보였다.

비록 MEERA2의 자료가 GHCN 및 ASOS 관측 자료에 상

Table 2. Performance comparison of grid-based precipitation data using GHCN and ASOS

Time step	Criteria	Observed data	Grid data				
			PERSIANN	CHIRPS	ERA	CFSR	MERRA2
Daily	CC	GHCN	0.38	0.40	0.43	0.63	0.72
		ASOS	0.48	0.52	0.57	0.75	0.86
	NRMSE	GHCN	0.96	0.99	0.93	0.78	0.70
		ASOS	0.90	0.95	0.83	0.67	0.53
Monthly	CC	GHCN	0.77	0.81	0.75	0.80	0.84
		ASOS	0.90	0.95	0.86	0.89	0.95
	NRMSE	GHCN	0.68	0.61	0.78	0.61	0.55
		ASOS	0.45	0.32	0.62	0.47	0.33
Yearly	CC	GHCN	0.53	0.59	0.54	0.61	0.66
		ASOS	0.88	0.93	0.76	0.82	0.92
	NRMSE	GHCN	1.27	1.10	1.46	0.90	0.84
		ASOS	0.64	0.42	1.11	0.65	0.45
Monthly average	CC	GHCN	0.98	1.00	0.97	0.99	0.99
		ASOS	0.98	1.00	0.97	0.98	0.99
	NRMSE	GHCN	0.46	0.36	0.69	0.32	0.29
		ASOS	0.26	0.12	0.51	0.22	0.17

CC : Correlation coefficient

NRMSE : Normalized root mean square error

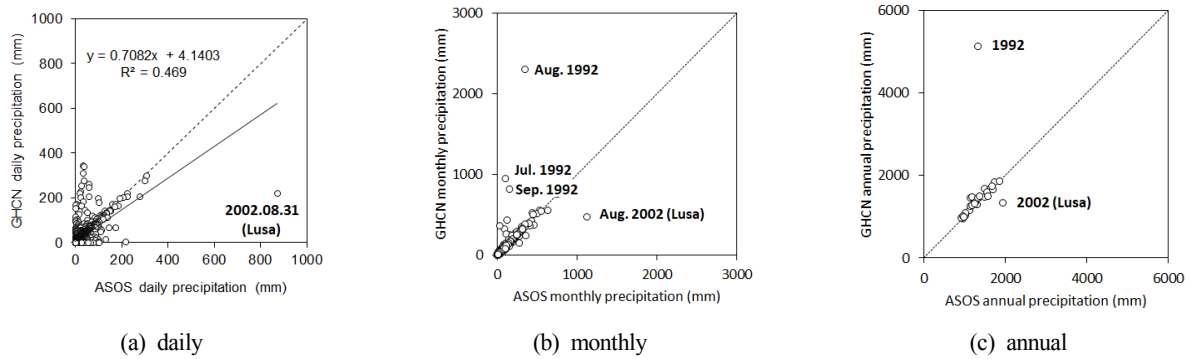


Fig. 3. Comparison between GHCN daily and KMA ASOS station data.

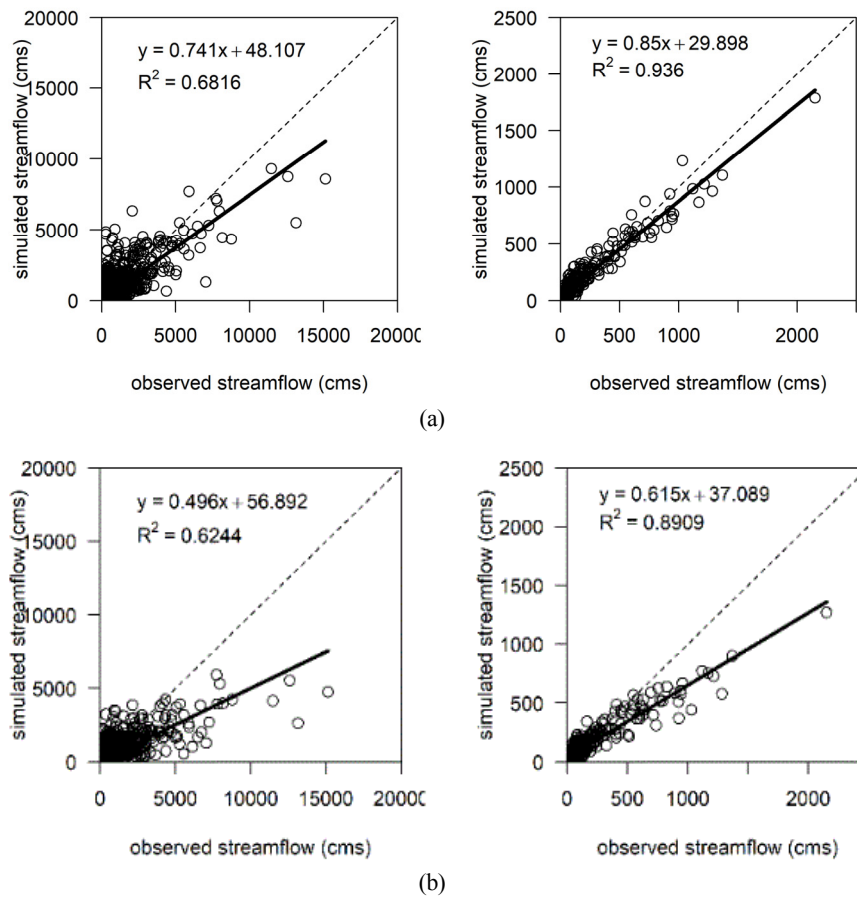


Fig. 4. Comparison of observed streamflow and simulated streamflow based on (a) ASOS station-based observed weather input, (b) MERRA2 without bias-correction.

관없이 가장 좋은 결과를 보였지만 관측 자료에 따라서 CC 및 NRMSE 모두 큰 차이를 보인다. 충주댐 유역과 가장 가까운 강릉 관측소에서의 기상청 ASOS 및 GHCN 자료와의 일 단위, 월단위, 연단위 강수량을 비교한 결과는 Fig. 3과 같다.

전체 자료 기간 중 GHCN 일단위 강수 자료의 경우 64.0%의 결측률을 보였다. 강수량의 경우 기상청 관측자료 중 2002년 8월 31일 태풍 루사에 의한 870.5 mm 강수량은 GHCN의 경우 223.5 mm로 큰 차이를 보였다. 이로 인해 월단위 및 연단

Table 3. Comparison of watershed-average precipitation and temperature between ASOS and MERRA2

Criteria	Precipitation (mm)		Max. Temperature (°C)		Min. Temperature (°C)	
	ASOS	MERRA2	ASOS	MERRA2	ASOS	MERRA2
Annual average or total	1477	1308	16.0	14.0	4.35	4.41
% Error	-11.5		-12.3		1.2	

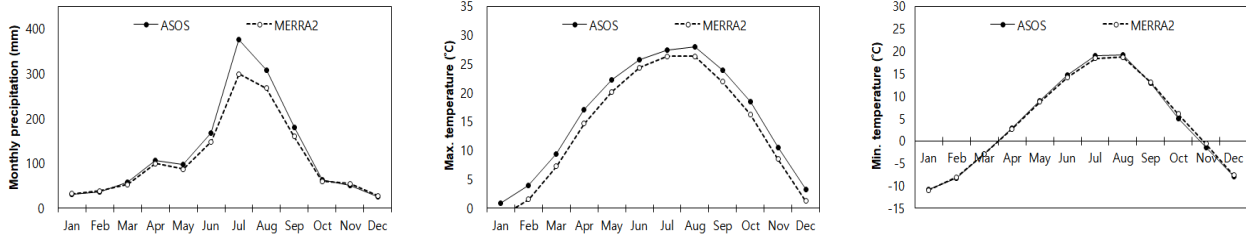


Fig. 5. Comparison of monthly average of precipitation, maximum temperature and minimum temperature between ASOS and MERRA2 without bias-correction.

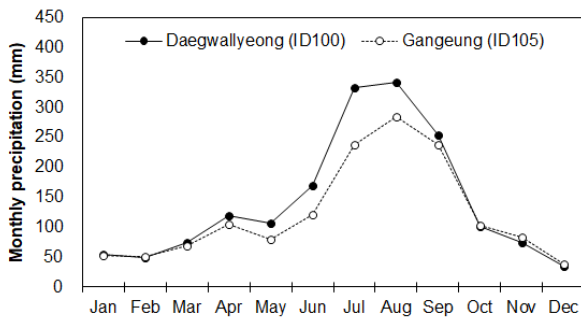


Fig. 6. Comparison of monthly average precipitation at Daegwallyeong and Gangneung using KMA ASOS station data.

위 그래프에서 GHCN이 ASOS와 비교하여 낮은 값을 보였다. 또한 일단위 그래프에서 ASOS 값과 비교하여 GHCN의 값이 높게 나타나고 있는데 이는 1992년에 발생하는 것으로 나타났다. 결과적으로 월단위 및 연단위 그래프에서도 1992년의 값이 GHCN의 경우 매우 높은 값을 보여 주고 있다. 1992년 기상청 자료에는 34.5 mm가 GHCN의 자료에는 342.9 mm로 기록되어 있어 소수점과 같이 자료 표기 방법의 변경 가능성을 고려한 QC의 필요성을 시사하고 있다.

3.2 SWAT 유출량 분석 결과

Fig. 4(a)는 4개 관측소 자료와 Hargreaves 방법을 이용하여 충주댐 유량 자료가 존재하는 1986년 이후 30년 (1986~2015)에 대한 관측과 모의값의 비교 결과이다. 총오차

는 3.1%로서 10% 미만이었고 일단위 및 월단위 결정계수 (R2)가 각각 0.68 및 0.94로서 만족스런 결과를 보였다. 반면 Fig. 4(b)는 관측 기상 자료가 없다는 가정에서 MERRA2로부터 각 소유역의 중심에 가장 가까운 격자로부터 추출된 강수량, 최고기온, 최저기온을 입력으로 하여 계산된 댐 유입량과 관측과의 비교 결과이다. 일단위 및 월단위 결정계수는 0.62 및 0.89로 감소하였고 총오차는 -16.1%로 MERRA2를 사용하는 경우 유출량이 현저히 감소하는 결과를 보였다.

ASOS 및 MERRA2로부터 충주댐 유역에 대해 계산된 평균 강수량, 최고기온, 최저기온은 Table 3과 같다. 강수량의 경우는 MERRA2가 ASOS 자료와 비교하여 11.5% 작은 경향을 보였다. 최고기온은 MERRA2가 12.3% 작은 경향을 보인 반면 최저기온은 1.2% 큰 경향을 보였다. Fig. 5는 30년 월평균값의 변화를 비교한 결과로서 강수량은 MERRA2 자료가 여름철 홍수기를 중심으로 ASOS 값과 비교하여 낮은 경향을 보인 반면, 최고기온의 경우 모든 월에 대하여 전체적으로 작은 경향을 보여준다. 이와 같이 ASOS와 비교하여 낮은 경향을 보이는 MERRA2의 유역 평균 강수량 자료는 충주댐 유입량 과소모의에 직접적인 영향을 미치는 것으로 나타났다.

대상 유역 내에 기상 관측소가 없는 미세측 유역이더라도 유역 밖의 지역에 관측소가 존재하는 경우 MERRA2 자료의 편의를 보정하는 경우 유출량 모의에 미치는 영향을 평가하였다. 앞서 한반도 GHCN 자료의 ASOS 자료와의 비교에서 자료의 QC가 이뤄지지 않은 점을 고려하여 GHCN 자료를 사용하는 대신 GHCN 관측소에 해당되는 ASOS 관측 자료

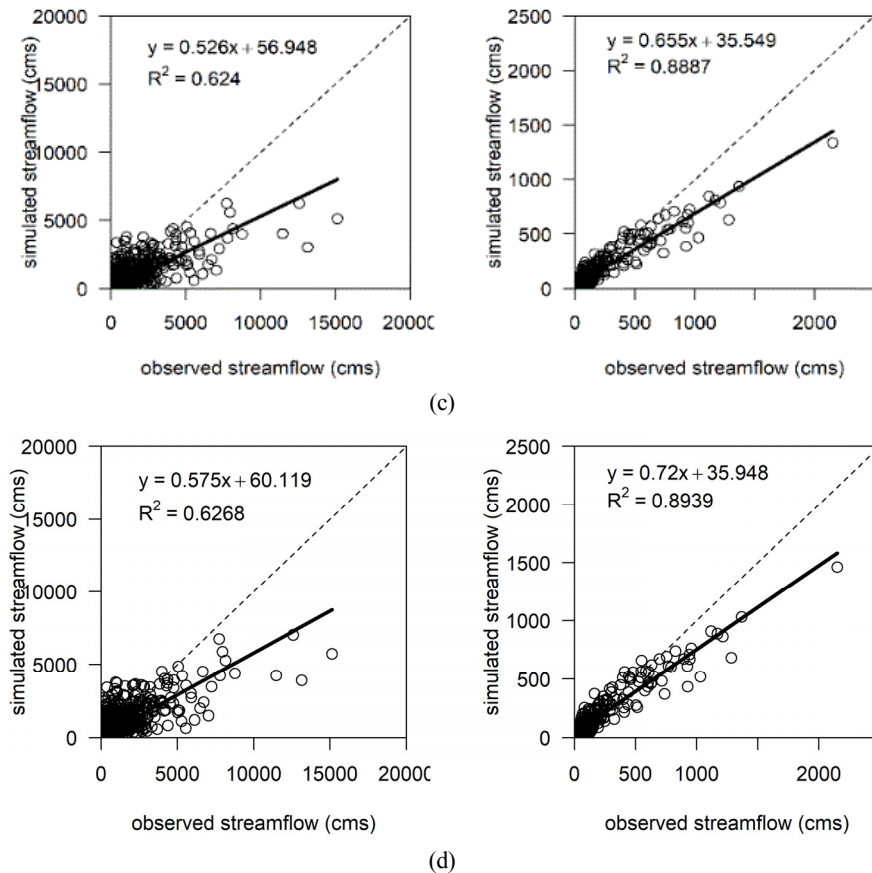


Fig. 7. Comparison of observed streamflow and simulated streamflow based on (a) MERRA2 with bias-correction using GHCN (ID105) and (b) MERRA2 with bias-correction using ASOS station (ID100).

를 이용하였다. 충주댐 유역에 가장 가까운 GHCN 제공 관측소는 Fig. 1에서와 같이 강릉 (105) 관측소이지만 강릉 관측소는 태백산맥 동쪽에 위치하여 산맥의 서쪽에 위치한 유역의 기후 특성과는 차이가 있다. 태백산맥 서쪽에 위치한 관측소 중에서 충주댐 유역과 가장 근접한 관측소는 대관령 (ID100) 관측소이며 Fig. 6은 강릉 및 대관령 관측소에서의 30년 (1986~2015) 월평균 강수량 패턴을 비교한 결과로서 대관령 관측소의 경우 태백산맥 서쪽에 위치하여 강릉 관측소와 비교하여 모든 기간 동안에 강수량이 높은 지역적 특성을 보인다.

따라서 MERRA2의 편의보정 (Bias-Correction)은 두 가지 경우를 고려하였다. 우선 강릉 관측소를 포함하여 11개 GHCN 관측소의 자료를 사용한 경우와 다른 하나는 강릉 관측소의 GHCN 자료 대신에 대관령의 ASOS 자료를 사용한 경우에 대하여 충주댐의 유입량 산정에 미치는 영향을 평가하였다. 편의보정은 월별로 11개 관측소에서의 관측값과 해

당 MERRA2 격자값 사이의 보정계수를 계산한 후 관측소가 존재하지 않는 MERRA2 격자점에 대해서는 역거리가중 (IDW) 기법을 이용하여 보정계수를 산정한 후 일단위 MERRA2 자료를 보정하였다.

강릉 (GHCN) 및 대관령 (ASOS) 자료를 이용하여 MERRA2 자료를 보정한 후 산정된 유출량 결과는 Fig. 7과 같다. 강릉의 GHCN 자료를 사용하여 보정한 경우에는 Fig. 7(a)에서와 같이 총오차가 보정 전의 -16.1%와 비교하여 -13.1%로 감소하였으나 여전히 10%보다 큰 오차를 보여 만족스럽지 못한 결과를 보였다. 이와 같은 오차는 앞서 살펴본 관측소의 지리적 위치에 따른 기상학적 영향에 기인할 수 있다. 하지만 대관령 지점에도 가용한 관측 자료가 존재하는 경우를 가정하여 강릉의 GHCN 자료 대신 대관령의 ASOS 자료를 이용하여 MERRA2 자료를 보정한 후 유출량 분석 결과는 Fig. 7(b)에서와 같이 일단위 및 월단위 결정계수는 크게 증가하지 않았으나 총오차의 경우 -6.3%로 감소하여 만족

Table 4. Performance summary of streamflow simulation using SWAT based-on different weather input

Criteria	Cases	Daily	Monthly	Yearly	Monthly Average
Err (%)	ASOS weather stations			3.1	
	MERRA2 without BC			-16.1	
	MERRA2 with BC using GHCN (ID105)			-13.1	
	MERRA2 with BC using ASOS (ID100)			-6.3	
NRMSE	ASOS weather stations	1.77	0.42	0.13	0.14
	MERRA2 without BC	1.99	0.71	0.24	0.39
	MERRA2 with BC using GHCN (ID105)	1.96	0.66	0.22	0.34
	MERRA2 with BC using ASOS (ID100)	1.92	0.59	0.18	0.25
CC	ASOS weather stations	0.83	0.97	0.95	0.99
	MERRA2 without BC	0.79	0.94	0.90	0.98
	MERRA2 with BC using GHCN (ID105)	0.79	0.94	0.90	0.98
	MERRA2 with BC using ASOS (ID100)	0.79	0.95	0.91	0.98

스러운 결과를 보였다. Table 4는 ASOS 관측을 입력으로 하는 경우, 편의보정 없이 MERRA2를 입력으로 하는 경우, GHCN 자료를 이용하여 MERRA2를 편의보정 한 후 입력으로 하는 경우, ASOS를 이용하여 MERRA2를 편의보정 한 후 입력으로 사용하는 경우 등 4가지 경우에 대하여 관측 유량과의 비교를 통한 모의 성능 결과를 보여 준다.

앞에서 제시된 접근 방법은 대상 유역 내에 관측소가 한 개도 존재하지 않고 가장 가까운 관측소 또한 멀리 떨어져 있는 경우에 활용성이 높을 것이다. 우선, 대상 유역 인근의 가용한 관측소 자료를 이용하여 지역의 기후 특성을 가장 잘 재현하는 격자형 자료를 선택한 후 사용하는 것은 특정 격자형 자료를 평가 없이 사용하는 경우와 비교하여 수문 분석의 질을 향상시킬 수 있다. 또한 가장 적합한 격자형 자료더라도 관측 자료와 비교하여 30년 월평균 강수량과 같은 기후 특성 값에 있어서 편의 (bias)가 생길 수 있다. 이 경우 가용한 관측소들의 편의를 공간적으로 내삽하여 관측소가 위치하지 않은 지역의 기후 특성 값을 보정하는 것은 격자형 자료를 보정 없이 사용하는 경우와 비교하여 기후 특성의 재현성을 향상시키는데 도움일 될 수 있다.

4. 결론

기상 미계측 지역에서 공간적인 강수량 분포를 고려한 유출량 산정을 위해 위성 및 재분석 자료의 활용성을 평가하였다. 주기적으로 갱신되는 자료를 중심으로 위성자료의 경우는 CHIRPS와 PERSIANN-CDR 자료를 선택하였고, 재분석

자료로는 ERA-Interim 자료와 MERRA2 자료 등 4개를 선정하였다. 또한 선택된 SWAT 모형 입력의 편의를 고려하여 CFSR 재분석 자료를 추가적으로 고려하였다.

격자형 자료의 평가를 위해서 일단위 GHCN 자료를 관측 자료로 사용하였고 한반도의 ASOS 관측자료와의 비교를 통해 GHCN의 활용성을 평가하였다. 충주댐 유역에 인접한 강릉 관측소 자료와의 비교 결과 GHCN 자료의 경우 강수량의 경우 결측률이 60%보다 큰 값을 보였고, 2000년도 태풍 루사에 의한 극한강우를 낮게 산정하고 있으며, 특정 연도에는 강수량을 가능 범위보다 높게 산정하는 결과를 보여 사용에 신중을 기해야 할 것으로 판단된다. 이는 태풍 루사와 같은 극한 강우사상 자료를 이상치 (Outlier)로 처리하지만 반대로 소수점 등의 문제로 특정 기간의 월 및 연 강수량이 발생 가능 범위를 넘어 가는 경우에는 정상적인 자료로 고려하는 것으로 판단된다.

GHCN 자료의 불확실성을 고려하여 ASOS 관측 자료를 추가적으로 이용하여 5개 격자형 자료의 한반도 기후특성에 대한 재현성을 비교·평가한 결과 MERRA2 자료가 일단위 규모에서 0.86의 상관계수를 보이는 등 다른 격자형 자료와 비교하여 높은 재현성을 가지는 것으로 나타났다. 월단위, 연단위, 월평균 시간 규모에서는 CHIRPS가 비교적 좋은 결과를 보이는 경우도 있지만 상관계수 및 NRMSE의 값에서 MERRA2의 결과와 유의한 차이를 보이지않은 수준으로 평가되었다. 상관계수의 경우 격자형 자료별로 큰 차이를 보이고 있지 않지만 NRMSE의 경우에는 MERRA2 자료가 다른 격자형 자료와 비교하여 상대적으로 낮은 경향을 보여 수문

모델링의 입력자료로 최종 선정하였다.

유출량의 경우 보정 없이 MERRA2 자료를 사용한 경우 -16.1%의 총오차를 보였으나, 월별로 인근 관측소의 30년 평균 강수량을 이용하여 공간적인 내삽을 통해 MERRA2 자료를 보정하여 사용하는 경우에 총오차 및 RMSE 등이 줄어들어 정확도가 높아지는 결과를 보였다. 태백산맥 서쪽의 높은 강우 특성을 고려하지 않고 GHCN의 강릉 관측소를 활용하여 편의를 보정한 경우에는 총오차가 -13.1%인 반면, 강릉의 GHCN 관측소 대신 대관령의 ASOS 자료를 이용하여 편의보정을 수행한 후 유출량을 분석한 결과는 -6.3%의 만족할만한 결과를 얻었다.

MERRA2 격자형 자료가 한반도 전체 지역에 대해 다양한 시간 규모에서의 강우 패턴을 가장 잘 고려하고 가장 낮은 오차를 보이는 것으로 나타났으나 타 지역에서는 다른 결과가 도출될 수도 있으므로 적합한 격자형 자료 선정을 위해서는 제시한 절차를 고려한 심도 있는 분석이 필요할 것이다. 본 연구에서는 유역 내 기상 관측 자료가 존재하지 않는 경우 다양한 격자형 관측 자료의 활용성과 방법론을 제시하고자 하였다. 최적의 자료를 선정하기 위해서는 인근 관측자료와의 비교·평가가 선행되어야 할 것이며 지역 특성을 반영한 인근 관측 자료를 이용한 편의보정을 거쳐 사용하는 것이 바람직할 것이다.

사 사

본 연구는 환경부/한국환경산업기술원의 지원으로 수행되었음 (과제번호 18AWMP-B083066-05).

REFERENCES

- Arnold JG, Allen PM, Bernhardt G. 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of hydrology*. 142 (1-4): 47-69.
- Ashouri H, Hsu K-L, Sorooshian S, Braithwaite DK, Knapp KR, Cecil LD, Nelson BR, Prat OP. 2015. PERSIANN-CDR: Daily precipitation climate data record from multisatellite observations for hydrological and climate studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 96 (1): 69-83.
- Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, Berrisford P, Poli P, Kobayashi S, Andrae U, Balmaseda MA, Balsamo G, Bauer d P. 2011. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*. 137 (656): 553-597.
- Dile YT, Srinivasan R. 2014a. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 50 (5): 1226-1241.
- Dile YT, Srinivasan R. 2014b. Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*. 50 (5): 1226-1241. doi:10.1111/jawr.12182.
- Donigan AS, Imhoff JC, Bicknell BR, Kittle JL. 1984. Application Guide for Hydrological Simulation Program: FORTRAN (HSPF). EPA-600/3-84-065 June 1984 Environmental Research Laboratory, Athens, GA 177 p, 19 fig, 17 tab, 3 app, 20 ref 68-01-6207.
- Emam AR, Kappas M, Nguyen LHK, Renchin T. 2016. Hydrological Modeling in an Ungauged Basin of Central Vietnam Using SWAT Model. Manuscript under review for journal *Hydrol Earth Syst Sci* Published. 18.
- Fuka DR, Walter MT, MacAlister C, Degaetano AT, Steenhuis TS, Easton ZM. 2014. Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes*. 28 (22): 5613-5623.
- Funk C, Peterson P, Landsfeld M, Pedreros D, Verdin J, Shukla S, Husak G, Rowland J, Harrison L, Hoell A. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data*, 2, 150066.
- Gelaro R, McCarty W, Suárez MJ, Todling R, Molod A, Takacs L, Randles CA, Darmenov A, Bosilovich MG, Reichle R. 2017. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*. 30 (14): 5419-5454.
- Gitau MW, Chaubey I. 2010. Regionalization of SWAT model parameters for use in ungauged watersheds. *Water*. 2 (4): 849-871.
- Im S, Brannan KM, Mostaghimi S, Kim SM. 2007. Comparison of HSPF and SWAT models performance for runoff and sediment yield prediction. *Journal of Environmental Science and Health Part A*. 42 (11):

- 1561-1570.
- Kim CG, Park SW, Kim NW. 2011. Analyzing Hydrological Transport Characteristics of Nonpoint Source Pollutants Using SWAT. *Applied Engineering in Agriculture* 27: 905-915.
- Kim CG, Park JH, Cho J. 2018. Future Climate Change Impact Assessment of Chungju Dam Inflow Considering Selection of GCMs and Downscaling Technique. *Journal of Climate Change Research*. 9 (1): 47-58.
- Menne MJ, Durre I, Korzeniewski B, McNeal S, Thomas K, Yin X, Anthony S, Ray R, Vose RS, Gleason BE. 2012. Global historical climatology network-daily (GHCN-Daily), Version 3. NOAA National Climatic Data Center.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Williams JR. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute.
- Sisay E, Halefom A, Khare D, Singh L, Worku T. 2017. Hydrological modelling of ungauged urban watershed using SWAT model. *Modeling Earth Systems and Environment*. 3 (2): 693-702.
- Srinivasan R, Zhang X, Arnold J. 2010. SWAT ungauged: hydrological budget and crop yield predictions in the Upper Mississippi River Basin. *Transactions of the ASABE*. 53 (5): 1533-1546.
- Worqlul AW, Yen H, Collick AS, Tilahun SA, Langan S, Steenhuis TS. 2017. Evaluation of CFSR, TMPA 3B42 and ground-based rainfall data as input for hydrological models, in data-scarce regions: The upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *CATENA*. 152:242-251. doi:10.1016/j.catena.2017.01.019.
- Xie H, Lian Y. 2013. Uncertainty-based evaluation and comparison of SWAT and HSPF applications to the Illinois River Basin. *Journal of Hydrology*. 481:119 - 131. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.12.027.