가뭄대응을 위한 주간단위 강우-유출모형 개발

Development of Weekly Rainfall-Runoff Model for Drought Preparedness and Response

강신욱* · 박진혁** · 강현웅*** · 김형산****

Kang, Shin Uk*, Park, Jin Hyeog**, Kang, Hyun Woong***, and Kim, Hyung San****

Abstract

In this study, we developed a rainfall-runoff model based on a weekly scale that can perform weekly hydrological forecasting using single-month weather forecasting data from the Korea Meteorological Administration. The developed rainfall-runoff model derives information on weekly precipitation and average temperature using monthly forecasts and annual data. Potential evapotranspiration was estimated using the Hargreaves equation. To improve the accuracy of the rainfall-runoff model, a snow melting module was also included. To evaluate the applicability of the developed model, 26 sites were selected nationwide, and the parameters of the model were estimated using the shuffled complex evolution-university of arizona global optimization algorithm. Results of model analyses of the 26 stations revealed that observation flow was well simulated in most areas. The statistics were also excellent. These weekly hydrological analytical results from the developed rainfall-runoff model could be used as a basis for preemptive drought response.

Key words : Drought Response, Weekly Rainfall-runoff Model, Abcd Model

요 지

본 연구에서는 기상청에서 주간단위로 발표되는 1개월 기상전망자료를 활용하여 주간단위로 수문전망을 수행할 수 있는 주간단위 강우-유출 모형을 개발하였다. 개발된 강우-유출 모형은 1개월 전망자료와 평년값을 이용하여 주간단위 강수량, 평균기온을 생산하여 수행되도록 하였다. 잠재증발산량은 Hargreaves식에 의해 산정하였으며, 강우-유출 모형의 정확도 개선을 위해 융적설 모듈을 포함시켰다. 개발된 모형의 적용성을 평가하기 위해 전국 26개 지점을 선정하였으며, 모형의 매개변수는 SCE-UA 전역 최적화 알고리즘으로 추정하였다. 26개 지점의 모형 분석결과 대부분의 대상지역에서 관측유량을 잘 모의하는 것으로 분석되었으며, 통계량 또한 우수한 것으로 분석되었다. 개발된 강우-유출 모형에 의한 주간단위 수문분석 결과는 선제적 가뭄대응에 기초자료로 사용할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 가뭄대응, 주간단위 강우-유출모형, abcd 모형

1. 서 론

가뭄은 가장 큰 피해를 주는 자연재해 중 하나이다. 이러한 가뭄은 전 세계적인 기후변화의 영향으로 인해 발생빈도

및 심각성이 증가할 것으로 예상되고 있다(WMO, 2009). 가뭄발생은 비교적 느린 속도로 진행되고, 그 영향의 복잡성 때문에 다른 자연재해 보다 더 많은 영향을 주고 심각한 사회적, 경제적, 환경적 비용을 초래한다. Kwon et al. (2016)

*정회원, K-water연구원 책임연구원(E-mail: sukang@kwater.or.kr)

Member, Principal Researcher, K-water Institute, K-water

**정회원, K-water연구원 수석연구원

Member, Head Researcher, K-water Institute, K-water

***정회원, 한국수자원조사기술원 전임연구원

Member, Associate Researcher, Korea Institute of Hydrological Survey

****교신저자, 정회원, K-water연구원 위촉선임연구원(Tel: +82-42-870-7482, Fax: +82-42-870-7499, E-mail: hskim@kwater.or.kr)

Corresponding Author, Member, Postdoctoral Research Associate, K-water Institute, K-water

은 이러한 가뭄 피해를 저감하는 방법으로 가뭄의 진행 상황 파악, 사전 용수 비축 및 향후 전망을 통한 대응을 제시하였으며, 향후 전망을 통한 대응을 위해서는 지역에 적합하고 다양한 대책의 발굴·선정, 각종 계획의 수립과 실행이 수반되어야 한다. 이를 위해서 물부족 위험지역을 포함한 전국단위 가뭄정보가 우선적으로 확보되어야 한다.

우리나라는 지난 2014년부터 시작된 가뭄이 2015년에 43년만의 유례없는 극심한 가뭄으로 이어지면서, K-water에서 관할하는 다목적댐 17개소 가운데 절반이 넘는 9개소가 저수량 저하로 댐 운영에 어려움을 겪었고, 특히 충남 중서부 지역 등 26개 시·군·구에서 생활 및 공업용수 이용에 제한을 받았다(K-water, 2017). 이러한 가뭄으로 인해 가뭄 상황을 사전에 알려주고 대비할 수 있도록 하는 가뭄 예·경보 체계 도입에 대한 범부처, 사회적 관심과 필요성이 증대되었으며, 가뭄대비 관계부처 합동 TF, 물관리실무협의회 등 협의 과정을 거쳐 2016년 2월 국무총리실 물관리협의회를 통해 가뭄 대응 의사결정을 지원할 수 있는 가뭄 예·경보 시행방안을 확정하였다.

가뭄 예·경보의 수문전망에 적용될 기상자료는 기상청에서 제공하는 것으로 결정되었으며, 기상청은 영국 기상청과 계절예측시스템 공동구축 및 운영에 대한 협정을 2010년 체결하고, 2014년부터 Hadley Center Global Environmental Model (HadGEM) 전지구 기후모델을 기반으로 개발된 앙상블 예측시스템 Global Seasonal Forecasting System 5 (GloSea5) 모델을 현업에 활용중이다(Moon et al., 2016). 기상청에서 생산되는 정량적 기상전망 자료는 기상청 59개 관측소의 관측평년값에 GloSea5 모델의 경향성(편차)을 반영하여 산출되며, 매일 1일에 생산되는 정량적 기상자료는 월강수량과 평균기온이다. 1개월 기상전망 자료는 주간단위, 3개월 기상전망 자료는 월간단위로 각각 생산되어 수문전망에 적용되고 있다. 기상전망 자료를 활용한 수문분석에 대한 연구로 Kang et al. (2007)은 기상청의 월간 강수전망의 정량적 활용을 위해 일단위 순강수량앙상블을 구성한 후 Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation (SSARR)모형을 기반으로 하는 Rainfall-Runoff Forecasting Model (RRFS)을 이용하였으며, Lee et al. (2010)은 기상청에서 제공되는 정성적 기상예보와 연계한 Ensemble Streamflow Prediction (ESP)를 활용하여 용담유역을 대상으로 기법별의 비교 분석을 통해 월유출 예측의 개선효과를 평가하였다. Park et al. (2011)은 대형댐 및 용담댐유역을 대상으로 기상청에서 제공하는 공간해상도 27 km 지역규모의 AIB시나리오를 이용하여 미래 유출량 전망을 월단위로 분석하였다.

이처럼 기상청의 전망자료를 활용하기 위한 강우-유출 분석에는 월단위, 일단위의 수문모형이 주로 적용되었으나 주간단위로 제공되는 1개월을 기상전망 자료를 적용하여 가뭄심화에 따른 빠른 대응 및 정량적 분석을 위해서는 주간단위의 수문전망을 분석할 수 있는 모형이 필요하지만

주간단위 강우-유출 모형에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 기상청의 정량적 기상전망 자료를 활용하여 주간단위로 분석할 수 있는 체계를 구축하고 이를 분석할 수 있는 강우-유출 모형을 개발하였다. 개발된 모형은 기상전망 자료를 이용하여 신뢰도 있는 가뭄분석 정보를 주간단위로 분석하여 제공함으로써 기존 월단위로 제공되는 가뭄 예·경보 대비 선제적 가뭄대응에 도움을 줄 수 있을 것이다.

2. 주간단위 강우-유출 모형 개발

2.1 개발모형 선정

기상전망자료의 시간적 제약으로 인해 수문전망을 위한 강우-유출 모형은 월단위 모의가 가능한 모형이어야 한다. 월단위로 강우-유출을 모의할 수 있는 모형은 물수지(water balance) 개념을 근간으로 하는 abcd 모형, Palmer 모형, GR2M 모형, Thornthwaite & Mather 모형 등이 있으며, 이중 abcd 모형(Thomas, 1981)은 국내외에서 다양한 분야에 적용되고 있다.

abcd모형은 1981년 Thomas에 의해 제시된 이후 물수지 모형으로 가장 많이 사용되고 있으며(Hwang et al., 2007), 수자원분야의 다양한 연구에 사용되어 왔다(Sankarasubramanian and Vogel, 2002; Westphal et al., 2003; Kirshen et al., 2005; Martinez and Gupta, 2010; Li and Sankarasubramanian, 2012; Al-Lafta et al., 2013). 국내의 경우 Kim et al. (1991)은 전국 20개의 하천유역에 대하여 abcd모형을 적용한 후 기상, 지형, 지질특성인자 등을 사용하여 지역화기법으로 미계측 지역의 월 유출량을 산정하였으며, Park and Kim (2013)은 안동 임하댐 유역을 대상으로 미래 유입량 변화에 대응하기 위한 다목적댐 운영 전략 수립시 abcd 모형의 미래 전망 유입량을 산정하였고 Kim et al. (2017)은 충주댐 유역에 대한 다목적댐 예측유입량 산정기법을 개발하고 평가하는데 abcd 모형을 활용하였다. abcd 모형에 대한 상세한 내용은 Park and Kim (2013)과 Al-Lafta et al. (2013)에서 확인할 수 있다.

본 연구에서는 주간단위 강우-유출 모형개발을 위해 현재 국내에서 월단위 유출모형으로 적용되고 있는 abcd 모형을 개발모형으로 선정하였다. 선정된 모형의 주간단위 모형 개발을 위해 용적설 모듈을 포함시켰으며, 잠재증발산량 산정방안 및 모형을 구성하였다.

2.2 용적설 반영

기상청의 한국기후도(KMA, 2010)에 의하면 우리나라의 연최심적설은 1.1~82.6 cm이고, 최솟값은 제주도 고산에서, 최댓값은 강원도 대관령에서 관측되었다. 여기서 연최심적설은 적설값의 연도별 극값을 평균한 평년값이다. 한후기(10월 ~ 다음해 4월)의 일별 최심신적설을 합계한 값인 연신적설 합계는 1.9~261.1 cm이다. 이와 같이 강원도 대관령의 적설에

상응하는 강수량은 약 82.6 mm 정도로 겨울철 강수량으로는 많은 양이다.

강설이 많은 지역은 추운기간동안 눈이 쌓여 있다가 봄철 기온상승에 따라 서서히 녹아 유출되며, 지표유출과 지하수에 영향을 미친다. 강원 영서, 전북, 충남 등 지역에 대한 동·춘계 수문전망 예측의 신뢰성 확보를 위해 기존 월단위 강우-유출(abcd) 모형에 융적설 모듈의 추가가 필요하다.

우리나라의 다설 지역인 강원도, 전라북도 등에 융적설에 의한 강수의 지체현상을 고려하기 위해 McCabe and Markstrom (2007)가 제안한 일종의 온도지수법 방법을 사용하였다. 기존 abcd 모형에 Fig. 1과 같은 구조로 융적설을 고려하도록 모형을 구성하였다. 융적설 고려에 필요한 매개변수는 4개이고, 초기값 1개이다.

강우-유출 모의의 첫 번째 계산은 P_{rain} 또는 P_{snow} 와 같은 주간단위 강수량(P)을 추정하는 것이다. 유역의 주간평균기온(T)이 T_{snow} 보다 낮으면 모든 강수량은 눈으로 간주한다. 또한 평균기온이 T_{rain} 보다 높으면 모든 강수량은 비로 간주한다. 평균기온이 T_{snow} 와 T_{rain} 범위에서는 주간단위 강수량 중 눈의 비율은 100%에서 0%로 선형적으로 감소한다. 이러한 관계는 Eq. (1)로 표현된다.

$$P_{snow} = P \times \left[\frac{T_{rain} - T}{T_{rain} - T_{snow}} \right], P_{rain} = P - P_{snow} \quad (1)$$

여기서 P_{snow} 는 강설량(mm), P_{rain} 은 강수량에서 강설량을 제외한 강우량(mm), T_{rain} 은 눈에서 비로 바뀌는 시점의 유역 평균기온($^{\circ}\text{C}$), T_{snow} 는 비에서 눈으로 바뀌는 시점의 유역 평균기온($^{\circ}\text{C}$)이다.

미국의 몇 개 유역에 대한 강우-유출 분석에 의하면 T_{rain} 은 3.3°C 가 적당한 값이며(McCabe and Wolock, 1999), T_{snow}

는 유역의 평균고도에 따라 다르게 나타난다. 1,000 m보다 낮은 유역의 경우는 $T_{snow} = -10^{\circ}\text{C}$ 가 적당하고, 1,000 m보다 높은 유역은 $T_{snow} = -1^{\circ}\text{C}$ 가 적당하다. 이러한 값은 미국 전역의 유량관측 지점에 대한 매개변수 추정과정에서 결정된 값이며, P_{snow} 는 적설 저류지(snow storage, $snstor$)에 누적된다.

주간융설률(snow melt fraction, SMF)은 주간평균기온과 최대융설률(maximum melt rate, $meltmax$)에 의해 결정되며, 최대융설률은 보통 0.5이다(McCabe and Wolock, 1999; Wolock and McCabe, 1999). 적설저류지에서 융설되는 비율은 Eq. (2)로 계산된다.

$$SMF = \frac{T - T_{snow}}{T_{rain} - T_{snow}} \times meltmax \quad (2)$$

만약 계산된 SMF 가 $meltmax$ 보다 크다면 SMF 의 값은 $meltmax$ 가 된다. 주간단위로 융설되는 양(snow melting, SM)은 Eq. (3)과 같이 계산된다. SM 값은 토양층의 저류양에 입력된다.

$$SM = snstor \times SMF \quad (3)$$

겨울철 강설이 많은 유역에 대해 과거 강수량, 평균기온 등을 입력하고 주간단위 강우-유출 모형에 추가하여 융적설 모듈 유무에 따른 모의결과를 비교하였다. Fig. 2는 충주댐 및 소양강댐유역의 융적설 모듈 유무에 따른 관측유량과 모의유량을 비교한 결과이다. 그림에서 가로축은 관측유량이고 세로축은 모의유량이다. 1:1 직선에 근접하는 결과가 많은 경우는 관측유량을 잘 모사함을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 유량 100 m³/s 이하에서 융적설을 고려하였을 때가 관측유량에 더 근접함을 볼 수 있다.

Fig. 1. Flowchart of Abcd Model Considering Snow Melt

Fig. 2. Comparison of Inflow for Snow Module Application

2.3 잠재증발산량 산정

abcd 모형은 유역 유출량을 산정하기 위해 강수량과 잠재 증발산량이 필요하다. 잠재증발산량을 산정하는 방법은 Thornthwaite의 월 열지수법(monthly heat index method)과 Hargreaves식에 의한 방법(Hargreaves and Samani, 1985)이 있으며, 월 열지수법에 의한 계산에는 평균기온과 일조시간이 입력되어야 한다. 반면 Hargreaves식에 의한 방법은 최고기온과 최저기온만을 입력하여 잠재증발산량을 산정할 수 있으며, FAO PM-56에 의한 잠재증발산량 결과와 상관성이 매우 높은 것으로 알려져 있다. 이와 같은 이유로 유역의 잠재증발산량 산정에 Hargreaves식에 의한 방법을 적용하였으며, 산정식은 Eq. (4)와 같다.

$$ET_0 = 0.0023 \cdot 0.408RA \cdot (T_{avg} + 17.8) \cdot TD^{0.5} \quad (4)$$

여기서 RA 는 외기복사량($\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$), T_{avg} 는 평균기온

($^{\circ}\text{C}$), TD 는 최고기온과 최저기온으로 결정되는 온도범위($^{\circ}\text{C}$), 상수 0.408은 외기복사량을 mm단위로 변경할 때의 상수이다. 기상청의 59개 관측소에 대한 최고·최저기온은 과거 관측자료를 이용하여 평균기온과의 관계식을 구하여 산정하였다.

2.4 모형의 구성

주단위의 강우-유출 모형을 개발하기 위해서는 1주 단위 강수량, 평균기온, 증발산량 자료의 구축 및 매개변수 추정이 필요하다. 주간 단위 수문자료의 처리를 위해 국제표준기구(International Organization for Standardization, ISO)에서 제시하는 기준(ISO 8601)에 따랐다. ISO 8601은 월요일부터 일요일까지를 1주로 정의하며 현재 사용하고 있는 날짜체계와 1대1로 대응되도록 하였다. 예를 들면 1981년 2월 22일은 '1981-W07-7' 또는 '1981W077'로 표시한다. 표시된 형식은 1981년 7번째주 일요일을 뜻한다. 이 기준에 따라 수문자료

를 정리할 수 있도록 Intel Visual Fortran으로 프로그램을 개발하였다.

주간 단위 잠재증발산량 산정을 위해 1주단위로 잠재증발산량을 산정할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 내용 중 외기복사량은 지구가 태양을 1년 주기로 공전하여 특정 위도에서 특정날짜에 따라 복사량이 달라지므로 주간단위의 월요일부터 일요일에 해당하는 날짜의 외기복사량을 각각 계산하고 이를 평균하여 주간단위 대푯값으로 사용하도록 하였다. 계산된 주간단위 외기복사량과 최고·최저기온을 입력하여 Hargreaves식에 의해 잠재증발산량을 산정하도록 하였다.

현재 기상청에서 제공하고 있는 1개월(4주)의 총강수량과 평균기온을 주간단위로 모형에 적용하기 위해서는 월별 제곱 자료를 주간단위로 조정할 필요가 있다. 본 연구에서는 평년 일단위 강수량과 평균기온의 패턴을 적용하여 전망값을 배분하였다. 강수량의 경우 4주의 총강수량을 일단위로 강수량 패턴에 따라 배분 후 주별로 합산하는 방법을 적용하였으며, 평균기온의 경우 4주 평균기온과 동기간 평년 평균기온의 차이를 주별 평년 평균기온에 반영하도록 하였다.

3. 모형적용 및 평가

3.1 SCE-UA 전역 최적화 방법

모형의 초기값을 포함한 매개변수를 추정하기 위해 Shuffled Complex Evolution-University of Arizona (SCE-UA) 전역 최적화 알고리즘을 적용하였다. Duan (1991)에 의해 개발된 집합체 혼합진화 알고리즘은 자연 진화의 과정을 최적해 탐색에 도입하였으며, Duan et al. (1992, 1994) 등의 다양한 연구에서 적용된 전역 최적화 알고리즘이다. 집합체 혼합진화 알고리즘은 다음과 같은 특성을 갖는다 (Duan et al., 1994). 확정론적이고 확률론적인 접근 방법의 결합(combination of deterministic and probabilistic approaches), 전역해 탐색을 위한 점들로 구성된 집합체의 조직적 진화(systematic evolution), 경쟁적 진화(competitive evolution), 집합체의 혼합(complex shuffling)이다(Kang et al., 2014). SCE-UA 전역 최적화 알고리즘의 개발 이후 Lee (2006) 및 Kang et al. (2014)은 수자원분야 모형의 보정에 활용하였으며, 최적화 연구에도 활용되고 있다(Jeon et al., 2009; Chung et al., 2012).

3.2 대상유역선정 및 매개변수 추정

본 연구의 대상지는 응적설을 포함한 주간단위 강우-유출 모형의 매개변수를 추정하기 위해 유역의 인위적 물사용 인프라가 적은 전국 다목적댐, 용수댐 및 주요지점에서 가능한 신뢰적이고 장기간의 수문자료를 사용할 수 있는 전국 26개 지점을 선정하였다. 유역별로는 한강유역의 충주댐, 소양강댐, 화천댐, 횡성댐, 괴산댐, 광동댐, 달방댐, 금강유역

의 안동댐, 임하댐, 합천댐, 남강댐, 밀양댐, 영천댐, 운문댐, 금강유역의 대청댐, 용담댐, 보령댐, 부안댐, 공주, 석화, 섬진강 및 영산강유역의 섬진강댐, 장흥댐, 주암댐, 보성강댐, 수어댐 및 나주이다. 연구대상지역은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3. Study Area

응적설을 포함한 주간단위 강우-유출 모형의 매개변수를 추정하기 위해 연구대상지에 위치한 기상청, 환경부, K-water에서 운영하고 있는 관측소의 수문자료를 활용하여 주간단위 모형의 입력자료를 구성하였으며, abcd 모형과 응적설모형의 초기값 포함 11개 매개변수를 SCE-UA 전역 최적화 알고리즘으로 추정하였다.

3.3 분석결과

26개 지점을 대상으로 모형을 통해 산정된 유량과 관측유량의 신뢰성을 평가하기 위해 Moriasi et al. (2007)과 Kim et al. (2012)에서 적용한 지시오차 통계기법인 평균편차의 비율(Percent BIAS, PBIAS), 무차원 지수인 효율성 지수(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)와 더불어 추정량 오차비율(Proportional Error of Estimate, PEE), 관측유출에 대한 비율(Ratio Of Volume, ROV)을 적용하였으며, 분석된 결과는 Table 1 및 Fig. 4와 같다. 여기서 R^2 , NSE 및 ROV는 1에 가까울수록 분석결과가 좋을 의미하며, PBIAS와 PEE는 작을수록 좋은 결과를 나타낸다.

분석결과 26개 지점의 통계량 범위는 R^2 0.78-0.93, PBIAS

Table 1. Results of Weekly Rainfall-runoff Model

Watershed	Statistics					Average		Standard deviation	
	R ²	PBIAS (%)	PEE	NSE	ROV	Observed (mm)	Simulated (mm)	Observed (mm)	Simulated (mm)
Chungju Dam	0.86	0.19	0.56	0.86	1.00	13.6	13.6	31.0	29.5
Soyanggang Dam	0.93	0.50	2.55	0.93	1.01	15.0	15.1	35.6	33.0
Hoengseong Dam	0.93	5.23	0.80	0.92	1.05	15.1	15.9	43.0	45.2
Hwacheon Dam	0.82	-5.26	0.74	0.81	0.95	14.6	13.9	28.4	26.7
Goesan Dam	0.85	4.50	0.53	0.81	1.05	12.7	13.3	26.6	30.0
Gwangdong Dam	0.88	9.62	3.22	0.85	1.10	11.1	12.2	26.0	29.0
Dalbang Dam	0.83	8.28	5.30	0.82	1.08	13.1	14.1	29.6	30.1
Andong Dam	0.85	7.10	0.92	0.82	1.07	10.0	10.7	22.4	24.9
Imha Dam	0.79	5.81	0.96	0.76	1.06	6.9	7.3	17.3	18.5
Hapcheon Dam	0.86	3.49	1.36	0.83	1.04	13.2	13.7	27.4	29.7
Namgang Dam	0.85	-5.82	0.41	0.85	0.94	19.4	18.3	42.4	38.6
Miryang Dam	0.92	-4.13	-	0.92	0.96	16.8	16.2	39.6	38.6
Youngchun Dam	0.83	0.16	4.60	0.82	1.00	8.5	8.5	21.0	20.2
Unmun Dam	0.79	-0.08	1.97	0.78	1.00	10.1	10.1	24.4	24.2
Daecheong Dam	0.84	3.53	1.08	0.83	1.04	11.5	11.9	26.2	27.1
Yongdam Dam	0.88	6.54	4.98	0.86	1.07	13.0	13.9	29.5	31.3
Boryeong Dam	0.86	-5.19	15.30	0.86	0.95	14.9	14.1	35.9	33.2
Buan Dam	0.89	2.79	-	0.89	1.03	12.3	12.6	33.3	33.9
Gongju	0.78	-6.24	0.66	0.78	0.94	12.3	11.5	19.2	17.3
Seokhwa	0.83	-13.88	0.51	0.81	0.86	16.8	14.5	33.8	26.3
Seomjingang Dam	0.91	2.96	2.61	0.91	1.03	14.6	15.1	33.1	34.4
Jangheung Dam	0.89	6.42	3.06	0.87	1.06	14.0	14.9	29.1	31.6
Juam Dam	0.87	2.89	2.03	0.85	1.03	15.0	15.4	31.8	34.8
Boseonggang Dam	0.84	-18.34	3.68	0.81	0.92	18.2	14.9	37.4	29.3
Suo-Dam	0.87	-3.85	1.01	0.87	0.96	23.6	22.7	44.4	43.4
Naju	0.78	-8.56	0.86	0.77	0.91	15.9	14.5	30.3	27.1

(a) Chungju Dam (2005~2017)

(b) Soyanggang Dam (2004~2017)

Fig. 4. Results of the Runoff Comparison Observed and Simulated

-18.34~9.62%, PEE 0.41~15.3, NSE 0.76~0.93, ROV 0.86~1.1로 나타났다. Moriasi et al. (2007)은 관측자료와 모형의 모의결과를 토대로 NSE 및 PBIAS을 4단계(매우 좋음, 좋음, 충분함, 불충분함)으로 구분하였으며, 본 연구결과와 비교한 결과 NSE는 모든 지점에서 매우 좋음으로 분석되었고, PBIAS는 보성강댐의 경우 충분함, 석화 지점은 좋음, 그이외의 24개 지점은 매우 좋음으로 분석되어 전체적으로 모의값이 관측값을 잘 반영하는 것으로 나타났다. R^2 , PEE 및 ROV의 분석결과 또한 PEE의 보령댐을 제외하고 전체적으로 결과가 우수한 것으로 나타났다. Fig. 4의 충주댐과 소양강댐의 분석결과 또한 도식적으로 관측유량을 잘 모사하는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 월단위로 제공되고 있는 가뭄 예·경보를 개선하여 주간단위 분석결과를 제시할 수 있는 주간단위 강우-유출 모형을 개발하였다. 예·경보에 필요한 기상전망자료는 기상청에서 제공하는 주간단위 1개월 자료를 활용할 수 있도록 하였으며, 모형의 정확도 개선을 위해 움직설을 고려하도록 구성하고 잠재증발산량 산정을 위한 프로그램을 개발하였다. 개발된 모형의 적용성을 평가하기 위하여 유역의 인위적 물사용 인프라가 적은 전국 26개 지점을 선정하였으며, 모형의 매개변수를 SCE-UA 전역 최적화 알고리즘으로 추정하였다. 26개 지점의 모형 분석결과 대부분의 대상지역에서 관측유량을 잘 모의하는 것으로 분석되었으며, 통계량 또한 R^2 0.78~0.93, PBIAS -18.34~9.62%, PEE 0.41~15.3, NSE 0.76~0.93, ROV 0.86~1.1로 우수한 것으로 분석되었다. 본 연구에서 개발된 모형을 적용한다면 기상청에서 주간단위로 제공되는 기상전망자료를 통해 주간단위 분석 및 주간단위 가뭄 예·경보가 가능할 것으로 판단되며, 이를 기반으로 가뭄심화에 따른 빠른 대응 및 정량적 분석이 가능할 것이라 판단된다. 현재 개발된 모형의 결과를 기반으로 토양배수·심도, 지질, 유역특성 인자를 사용한 군집분석을 통해 유사성이 큰 중권역으로 매개변수를 적용하여 전국에 대한 주간단위 예·경보를 시행할 수 있는 체계를 구축하였으며, 현재 월단위로 제공되고 있는 예·경보와 더불어 주간단위 분석결과를 내부적으로 활용되고 있다. 향후 가뭄예보의 신뢰도 있는 정보제공과 더불어 가뭄에 선제적으로 대응할 수 있는 연구가 지속적으로 추진된다면 좀 더 가뭄에 대응할 수 있는 기반이 마련될 것이라 판단된다.

감사의 글

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 물관리연구사업의 지원을 받아 연구되었습니다(과제번호 83078).

References

- Al-Lafta, H.S., Al-Tawash, B.S., and Al-Baldawi, B.A. (2013). Applying the “abcd” monthly water balance model for some regions in the United States. *Advances in Physics Theories and Applications*, Vol. 25, No. 1, pp. 36-47.
- Chung, G.H., Park, H.S., Sung, J.Y., and Kim, H.J. (2012). Determination and evaluation of optimal parameters in storage function method using SCE-UA. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 11, pp. 1169-1186.
- Duan, Q. (1991). *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models*. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 4, pp. 1015-1031.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, Vol. 158, No. 3-4, pp. 265-284.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 1, No. 2, pp. 96-99.
- Hwang, J.S., Jeong, D.I., Lee, J.K., and Kim, Y.O. (2007). Application of monthly water balance models for the climate change impact assessment. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 2, pp. 147-158.
- Jeon, J.H., Choi, D.H., Kim, J.J., and Kim, T.D. (2009). Regionalization of CN parameters for Nakdong River basin using SCE-UA algorithm. *Journal of Korea Society on Water Quality*, Vol. 25, No. 2, pp. 245-255.
- Kang, B.S., Rieu, S.Y., and Ko, I.H. (2007). Long-term probabilistic streamflow prediction using weather outlook weighted ensemble streamflow prediction. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 2B, pp. 183-191.
- Kang, S.U., Kang, T.U., and Lee, S.H. (2014). Application of the SCE-UA to derive zone boundaries of a zone based operation rule for a dam. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 10, pp. 921-934.
- Kim, H.S., Kang, S.W., Hwang, P.S., and Hur, Y.T. (2012).

- Snow melting simulation of Gwangdong Dam basin in the spring season using developed K-DRUM model. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 6B, pp. 355-361.
- Kim, S.H., So, J.M., Kang, S.U., and Bae, D.H. (2017). Development and evaluation of dam inflow prediction method based on Bayesian method. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 50, No. 7, pp. 489-502.
- Kim, W.S., Yoon, Y.N., and Choi, Y.B. (1991). A Study on the application of Thomas monthly runoff prediction model for ungauged watersheds. *Water for Future*, Vol. 24, No. 4, pp. 85-91.
- Kirshen, P., McCluskey, M., Vogel, R., and Strzepek, K. (2005). Global analysis of changes in water supply yields and costs under climate change: A case study in China. *Climatic Change*, Vol. 68, No. 3, pp. 303-330.
- Korea Meteorological Administration (KMA). (2010). *The climate atlas of Korea*. KMA, Seoul, Korea.
- K-water. (2017). *Drought information analysis annual report*. K-water, Daejeon, Korea.
- Kwon, M.S., Park, D.H., Jun, K.S., and Kim, T.W. (2016). Probabilistic prediction of reservoir storage considering the uncertainty of dam inflow. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 7, pp. 607-614.
- Lee, D.H. (2006). Automatic calibration of SWAT model using LH-OAT sensitivity analysis and SCE-UA optimization method. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 8, pp. 677-690.
- Lee, S.J., Kim, J.C., Hwang, M.H., and Maeng, S.J. (2010). Forecasting monthly runoff using ensemble streamflow prediction. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 52, No. 1, pp. 13-18.
- Li, W., and Sankarasubramanian, A. (2012). Reducing hydrologic model uncertainty in monthly streamflow predictions using multimodel combination. *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 12. doi:10.1029/2011WR011380
- Martinez, G.F., and Gupta, H.V. (2010). Toward improved identification of hydrological models: A diagnostic evaluation of the "abcd" monthly water balance model for the conterminous United States. *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 8. doi:10.1029/2009WR008294
- McCabe, G.J., and Markstrom, S.L. (2007). A monthly water-balance model driven by a graphical user interface. Open-File Report No. 2007-1088, U.S. Geological Survey.
- McCabe, G.J., and Wolock, D.M. (1999). General-circulation-model simulations of Future snowpack in the western United States. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, pp. 1473-1484.
- Moon, S.J., Han, S.H., Choi, K.S., and Song, J.H. (2016). Data processing system and spatial-temporal reproducibility assessment of GloSea5 model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 9, pp. 761-771.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 885-900.
- Park, J.H., and Kim, Y.O. (2013). Coping with climate change through coordinated operations of the Andong & Imha Dams. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 12, pp. 1141-1155.
- Park, J.H., Kwon, H.H., and No, S.H. (2011). Outlook of discharge for Daechong and Yongdam Dam watershed using A1B climate change scenario based RCM and SWAT model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 929-940.
- Sankarasubramanian, A., and Vogel, R.M. (2002). Annual hydroclimatology of the United States. *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 6, pp. 19(1)-19(12). doi:10.1029/2001WR000619
- Thomas, H.A. (1981). *Improved methods for national water assessment*. Report WR15249270, U.S. Water Resource Council, Washington, DC.
- Westphal, K.S., Vogel, R.M., Kirshen, P., and Chapra, S.C. (2003). Decision support system for adaptive water supply management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 129, No. 3, pp. 165-177.
- Wolock, D.M., and McCabe, G.J. (1999). Estimates of Runoff using water-balance and atmospheric general circulation models. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 6, pp. 1341-1350.
- World Meteorological Organization (WMO). (2009). *Experts agree on a universal drought index to cope with climate risks*. WMO Press Release No. 872.

Received	July 18, 2019
Revised	July 19, 2019
Accepted	July 29, 2019