RCP 배출 시나리오와 SWAT 모형을 이용한 기후변화가 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가

Assessing Climate Change Impact on Hydrological Components of Yongdam Dam Watershed Using RCP Emission Scenarios and SWAT Model

박종윤* · 정혁** · 장철희*** · 김성준****,†

Jong-Yoom Park · Hyuk Jung · Cheol-Hee Jang · Seong Joon Kim

ABSTRACT

This study was to evaluate the potential climate change impact on watershed hydrological components of evapotranspiration, surface runoff, lateral flow, return flow, and streamflow using Soil and Water Assessment Tool (SWAT). For Yongdam dam watershed (930 km²), the SWAT model was calibrated for five years (2002-2006) and validated for three years (2004-2006) using daily streamflow data at three locations and daily soil moisture data at five locations. The Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) and coefficient of determination (R^2) were 0.43-0.67 and 0.48-0.70 for streamflow, and 0.16-0.65 and 0.27-0.76 for soil moisture, respectively. For future evaluation, the HadGEM3-RA climate data by Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 and 8.5 scenarios were adopted. The biased future data were corrected using 30 years (1982-2011, baseline period) of ground weather data. The HadGEM3-RA 2080s (2060-2099) temperature and precipitation showed increase of +4.7 °C and +22.5 %, respectively based on the baseline data. The impacts of future climate change on the evapotranspiration, surface runoff, baseflow, and streamflow showed changes of +11.8 %, +36.8 %, +20.5 %, and +29.2 %, respectively. Overall, the future hydrologic results by RCP emission scenarios showed increase patterns due to the overall increase of future temperature and precipitation.

Keywords: Climate change; Hydrologic components; RCP scenarios; SWAT; Water balance; Watershed hydrology

1. 서 론

기후변화로 인해 이상기후 현상이 잦아지면서 기후변화에 따른 수문순환의 영향에 대한 관심이 높아지고 있으며, 최근 이에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 보고서 (IPCC, 2013)에 따르면 동아시아 지역의 21세기 말 평균기온은 2.4 °C 증가하고, 강수량은 7 % 증가하며, 계절간 강수량의 차이도 커질 것으로 전망하고 있다. 지구온난화에 의한 기온상승, 강수량의 규모 및 패턴의 변화는 유출량의 변화와 증발산량 증가의 원인이 되며 토양수분의 변

화가 예상되어 궁극적으로는 수문순환의 변화에 많은 영향을 미치게 된다 (Ahn et al. 2013).

이처럼 기후변화에 의한 수문순환의 변화를 예측하기 위해서는 유역을 대상으로 현재의 수문순환을 모의함에 있어 모의된 결과를 실측자료와 비교하여 검증하는 과정을 통해 수문모형의 정확도를 향상시키고 불확실성을 줄이고자 하는 노력이 필요하다. 일반적으로 수문모형의 보정과정 중에 다양한 실측자료에 근거하여 보정된 매개변수는 모형의 적정성을 검토하여 신뢰성 있는 분석결과를 얻게 된다 (Jang, 2003). 최근의 수문모형을 활용한 연구들을 살펴보면, 대부분의 경우 실측 유출량만을 이용하여 매개변수 보정이 이루어져 왔다 (Arnold and Allen, 1996; Manguerra and Engel, 1998; Peterson and Hamlett, 1998; Sophocleous et al., 1999). 이러한 유출량만을 이용한 보정은 수문 순환과정을 제대로 모의하는데 있어 한계가 있으며, 과정의 불확실성을 효과적으로 줄이기 위해서는 추가적인 실측자료와의 비교를 통한 보정이 필요하다 (Ambroise et al., 1995; Kuczera and Mroczkowski, 1998). 국내에서는 Lee et al. (2007)이 광릉 시험유역을 대상으로 실측 유출량 및 토양수

* 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사후연구원

** 건국대학교 사회환경시스템공학과 석사

*** 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원

**** 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수

† Corresponding author Tel.: +82-2-450-3749

Fax: +82-2-444-0186

E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

2013년 9월 4일 투고

2014년 4월 21일 심사완료

2014년 4월 23일 게재확정

분자료를 이용하여 RHESSys (Regional Hydro-Ecologic Simulation System) 수문생태모형을 평가한 바 있다. Kim et al. (2008)은 설마천 유역을 대상으로 실측 유출량 및 FAO Penman-Monteith 잠재증발산량을 이용한 SWAT 모형의 보정을 시도한 바 있다. Hong et al. (2009)은 충주댐 유역을 대상으로, MODIS NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)와 토양수분의 상관성 분석을 통하여 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형의 모의 토양수분의 신뢰도를 뒷받침하고자 하였다. Joh et al. (2010)은 설마천 유역을 대상으로 실측 증발산량과 토양수분을 이용한 SWAT 모형의 보정을 통해 유역의 수문순환 모의결과에 신뢰성을 높이고자 하였다. 국외에서도 Bastidas et al. (2003), Koren et al. (2008)의 연구에서와 같이 유출자료 외에 실측 토양수분자료를 이용하여 모형의 검·보정이 시도된 바 있다.

한편, 기후변화에 의한 수문순환을 평가하기 위하여 수문모형과 기후변화 시나리오를 연계한 연구도 활발히 진행되고 있다. 미래 기후변화 시나리오의 불확실성에도 불구하고, 지난 10여년간 IPCC AR4 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 시나리오를 이용한 연구들이 주를 이루어 왔다. 최근 IPCC (2012)에서는 보다 신뢰성 있는 AR5 RCP (Representative Concentration Pathway) 시나리오를 작성하여 제공함으로써 수자원 분야에 활용가능토록 하는 노력을 지속하고 있다. SRES 시나리오를 적용한 연구로 Lee et al. (2008)은 안성천 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 SRES A2, B2 기후변화 시나리오 및 토지이용 시나리오를 적용하여 유역의 수문 및 수질 영향평가를 수행하였다. Park et al. (2009)은 충주댐 유역을 대상으로 SWAT 모형과 SRES A2, A1B, B1 기후변화 시나리오를 이용하여 미래 수문학적 거동 및 하천수질 변화를 전망하였고, Park et al. (2011)은 충주댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 미래 기후(MIROC3.2 HiRes A1B) 및 토지이용(CLUCE-s) 변화에 따른 유출특성 변화를 분석하였다. 최신의 RCP 시나리오를 적용한 연구로 Jung et al. (2013)는 RCP 시나리오를 SWAT 모형에 적용하여 충주댐의 물공급에 미치는 영향을 평가하였고, Ahn et al., (2013)은 설마천 유역을 대상으로 RCP 기후변화 시나리오에 따른 수문순환 영향을 평가하였다.

따라서 본 연구에서는 기후변화 영향평가에 많이 활용되는 수문모형인 SWAT 모형을 선정하였으며, 용담댐 유역을 대상으로 5개 지점의 실측 토양수분자료와 3개 지점의 실측 유출량자료를 이용하여 모형의 검보정을 실시하고, 기상청에서 제공하고 있는 RCP 4.5와 8.5 기후변화 시나리오를 적용하여 미래 기후변화가 유역 수문에 미치는 영향을 평가하고자 한다. 본 연구는 기존 연구와는 달리 유출량뿐만 아니라 토양수분 자료를 이용

한 모형의 보정을 실시함으로써 각 수문요소별(증발산, 지표유출, 중간유출, 기저유출, 토양수분함량, 하천유출) 예측결과에 대한 신뢰성을 확보하고 기후변화 영향평가에 대한 불확실성을 줄이고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. SWAT 모형의 개요

본 연구에서는 장기간에 걸친 증발산량, 토양수분 및 유출량을 모의하고 각 수문성분에 관련된 매개변수의 조절을 통해 모형의 모의 결과를 향상시키기 위하여 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 SWAT 모형(Arnold et al., 1998)을 선정하였다. SWAT 모형은 물리적 기반의 준분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출의 영향을 예측하기 위해 개발되었으며 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수, 토양수분 등에 대한 모의를 각 수문반응단위(Hydrologic Response Units, HRUs) 별로 계산할 수 있다. SWAT 모형에서 사용되는 물수지 방정식은 다음과 같다(Neitsch et al., 2002).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t 는 최종 토양수분량(mm), SW_0 는 i 일의 초기 토양수분량(mm), t 는 시간(day), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량(mm), E_a 는 i 일의 증발산량(mm), W_{seep} 는 i 일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm), 마지막으로 Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량(mm)이다. 이때, 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산하게 된다. 한편, SCS(USDA-SCS, 1972)의 유출곡선법(Curve Number)에 의해 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 동역학적 저류모형(Kinematic Storage Model)을 이용하였다. 하도추적은 Muskingum(Cunge, 1969; Chow et al., 1988), 잠재증발산량은 Penman-Monteith(Allen et al., 1998) 방법을 이용하였다.

2. RCP 시나리오

IPCC AR4에서 인구, 기술, 경제발전 등 미래 온실가스 배출에 영향을 미치는 요소들을 다루어 크게 4개의 SRES 시나리오(A1, A2, B1, B2)로 구분한 것과는 달리, AR5(Fifth Assessment

Report)의 RCP는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실 가스 농도를 산정하였다. RCP 시나리오는 SRES 자료의 노후화 및 해당도 문제를 보완하고 정확도 향상을 위해 새로운 시나리오 도입의 필요성에 의해 개발된 것이다. 이에 따른 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 나타날 수 있으며, 이 중 하나는 측면에서 ‘대표 (Representative)’라는 의미를 가지고 있다. 또한 온실가스 농도가 시간에 따라 변화하는 것을 강조하기 위하여 ‘경로 (Pathway)’라는 의미를 포함한다. RCP 시나리오는 복사강제력 (W/m^2)을 기준으로 RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5로 구분한다 (NIMR, 2011).

미래 기후변화 영향평가를 위해 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 지역기후모형 (Regional Climate Model, RCM)의 모의결과값을 이용하였다. HadGEM3-RA 기후모형의 공간해상도는 12.5 km이며, RCP 4.5, 8.5 기반의 일별 강수량, 최고·최저기온, 상대습도, 풍속 자료 (2006~2099년)를 제공하고 있다 (NIMR, 2011). 한편, 기후모형의 결과물을 연구에 사용할 때에는 신뢰성을 높이기 위하여 기후모형 결과를 현재 관측된 자료와 비교하여 확인하는 과정이 필요하다 (Carter et al., 1999). 따라서, 본 연구에서는 Alcamo et al. (1997)이 제안한 편보정 (Bias Correction) 방법을 이용하여 기온과 강수에 대해 Eq. (2)와 (3)을 이용하여 통계적인 유사성을 가지도록 보정을 실시하였다.

$$T'_{GCM,fut} = T_{meas} + (\overline{T_{GCM,fut}} - \overline{T_{GCM,his}}) \quad (2)$$

$$P'_{GCM,fut} = P_{meas} \times (\overline{P_{GCM,fut}} / \overline{P_{GCM,his}}) \quad (3)$$

여기서, $T'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래 기온, T_{meas} 는 과거 기준기간 동안 관측된 기온, $\overline{T_{GCM,fut}}$ 는 RCM에서 모의된 미래 기온에 대한 평균값, $\overline{T_{GCM,his}}$ 는 과거 기준기간 동안의 RCM에서 모의된 기온의 평균을 의미한다. 강수량의 경우, $P'_{GCM,fut}$ 는 보정된 미래의 강수량, P_{meas} 는 과거 기준기간 동안 관측된 강수량, $\overline{P_{GCM,fut}}$ 는 RCM에서 모의된 미래 강수량의 평균, $\overline{P_{GCM,his}}$ 는 과거 기준기간 동안의 RCM에서 모의된 강수량의 평균이다. 본 연구에서 과거 30년 (1982~2011년, Baseline) 기상자료를 이용하여 편보정을 실시하였으며, RCP4.5, 8.5 시나리오별 결과 값을 2040s (2020~2059년), 2080s (2060~2099년)의 두 기간으로 구분하여 분석을 수행하였다.

3. 대상유역 및 자료구축

본 연구의 대상유역은 금강 상류의 용담댐 유역으로 북위 35°35'~36°00', 동경 127°20'~127°45'의 범위에 위치하고

있으며 무주군, 진안군, 장수군을 포함한 충청남도, 전라북도, 경상남도의 경계에 걸쳐있다 (Fig. 1). 유역면적은 930 km²로 금강 유역면적의 약 9.5 %를 차지하고 있으며, 대부분이 산지와 농업지역으로 각각 70 %, 21 %를 차지하고 있다. 유역의 연평균 기온은 11.6 °C이며, 연평균 강수량은 1,362.3 mm이다. 특히, 본 대상유역은 2001년부터 한국수자원공사 K-water 연구원에서 운영하고 있는 시험유역으로써, 신뢰도 높은 수문관측 자료의 생산을 위해 현재 수위, 우량, 중발산량 관측소를 운영하고 있다 (K-water, 2008).

SWAT 모형의 지형입력자료로서 본 연구에서는 NGIS (National Geographic Information System)의 1:5,000 수치지도로부터 검수과정을 거쳐 격자크기 30 m의 DEM (Digital Elevation Model)을 제작하였다. 토지이용도는 환경부에서 제공하는 중분류 토지이용 항목에 대하여 SWAT 모형에서 요구하는 LULC (Land Use/Land Cover)항목으로 재작성 하였으며, 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하여 미국 NRCS (The U.S. Natural Resource Conservation Service formerly the Soil Conservation Service) 토양분류 기준 (Soil Survey Staff, 1996)에 따른 수문학적 토양그룹 (Hydrologic Soil Group) A, B, C, D로 분류하였다. 토양층의 개수 및 토양층별 깊이 등은 농업과학기술원의 자료를 사용하여 구축하였으며 토양층의 유효수분량, 포화수리전도도 등의 물리적 값들은 Saxton et al. (1986)의 결과를 토대로 SWAT에서 요구하는 형식의 토양 속성값을 부여하였다.

용담댐 유역의 관측소 현황은 전주, 금산, 임실, 거창, 장수 총 5개의 기상관측소가 위치해 있으며, 1982년부터 2011년까지의 30년 치 일별 강우량 (mm), 기온 (°C), 풍속 (m/sec), 상대습도 (%) 및 일사량 (MJ/m²) 자료를 기상청으로부터 제공받아 모형의

Fig. 1 Location of the Yongdam Dam Watershed and Observation Stations

기상입력 자료로 사용하였다. 모형의 적용성 평가를 위한 수문 자료는 K-water 연구원 (<http://www.ydew.or.kr>)에서 제공하고 있는 2002~2010년까지의 용담 (QYD), 천천 (QCC), 동향 (QDH) 3개 지점의 유출량 자료와 농촌진흥청 농업기상정보시스템 (<http://weather.rda.go.kr>)에서 제공하는, 장수 (JS), 계북 (GB), 부귀 (BG), 안천 (AC), 천천 (CC) 지점의 토양수분 측정자료를 사용하였다 (Fig. 1). 토양수분 자료는 TDR (Time Domain Reflectometry)를 사용하여 평균깊이 10 cm를 기준으로 측정된 자료이며, 측정기간은 장수지점이 2004년 6월부터 2008년 5월, 계북, 부귀, 안천, 천천 지점은 2008년 5월부터 8월까지이다.

III. 결과 및 고찰

1. SWAT 모형의 적용성 평가

SWAT 모형의 적용성 평가를 위해 2001년을 안정화기간 (Warm-up Period)으로 설정하고, 2002~2006년과 2007~2009년에 대해 보정 및 검증을 실시하였다. 보정방법은 SWAT Theoretical Documentation (Neitsch et al., 2002)에서 제시하고 있는 유출 및 토양수분 관련 매개변수를 이용하여 Fig. 1의 관측지점에 대해 공간적으로 최상류부터 순차적으로 실시하였다. 보정결과에 따른 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적함수로는 결정계수 (Determination Coefficient, R^2), Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율성계수 (NSE) 및 절대백분율오차 (Absolute Percent Bias, APB)를 사용하였다.

모형의 보정방법은 유출량 및 토양수분을 기준으로 먼저 유출에 관련 매개변수를 조정하고, 각 수문성분에 대한 결과를 도출하고, 이어서 토양수분에 관련된 매개변수를 조정하여 시행착오법으로 보정을 수행하였다. 보정에 사용된 6개의 매개변수 중 유출에 관련된 4개의 매개변수는 ALPHA_BF, GW_DELAY, CH_K2, SOL_K이고, 토양수분에 관련된 매개변수는 ESCO와 SOL_AWC를 선정하였다 (Table 1). Fig. 2는 유출량에 대한

각 지점별 수문곡선을 비교한 것으로, 통계분석결과를 Table 2에 정리하였다. 먼저, 천천 (QCC)와 QDH (동향) 지점의 검토기간 동안 R^2 는 0.70과 0.52, NSE는 0.67과 0.44로 나타났다. 유역출구지점 (QYD)에서의 R^2 , NSE와 APB는 각각 0.48, 0.43, 63.6%로 분석되었다. SWAT 모형은 유출량을 과소 추정하는 경향을 보였는데 특히 검증기간 (2007~2010)동안 상·하류 강수량의 지역적 편차가 크게 나타나면서 이러한 경향이 두드러지게 나타났다. 이는 토양수분을 고려한 모형의 재현능력을

Fig. 2 Comparison of the Observed and SWAT-simulated Daily Streamflow at (a) YD, (b) CC, and (c) DH Stations

Table 1 The Calibrated SWAT Model Parameters

Parameter ^[a]		Definition	Range ^[b]		Adjusted Average Value
			LB	UB	
Streamflow	ALPHA_BF	Baseflow recession constant	0	1	+ 0.52
	GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	0	500	+ 17.3
	CH_K2	Effective hydraulic conductivity of channel (mm/hr)	0	150	+ 27.7
	SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	-25	25	*0.50
Soil Moisture	ESCO	Soil evaporation compensation coefficient	0	1	+ 0.28
	SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	0	1	- 0.06

^[a] Source: Neitsch et al. (2002)

^[b] LB: Lower Bound, UB: Upper Bound

종합적으로 평가한 것으로 다음의 토양수분 모의결과를 통해 유출모의 결과에 대한 신뢰성을 확보하였다. 다음 Fig. 3은 각 토양수분 관측지점에 대한 일별 실측값과 모의값을 비교한 것으로 토양특성 및 토지피복 상태에 따른 토양수분 (%) 변화를 Table 3에 정리하였다. 모의결과 5개 관측지점에서의 평균 R^2 와 NSE는 0.48과 0.37로 나타났으며, 특히, 토양성분이 사양토 (Sandy Loam)이면서 혼효림 (Mixed Forest)의 토지이용을 나타내는 안천 (AC)지점에서 토양수분의 변동폭 (최대·최소)을 비교적

잘 재현하면서 높은 상관성을 보여주었다. 토양수분 실측자료의 기간이 짧고 5~8월 사이에 집중되어 있어 시·공간적 토양수분의 재현능력을 평가하는 것은 한계가 있으나, 전체적으로 모형은 실측치에 비해 다소 과대모의 하는 경향을 보였다. 이러한 토양수분 모의특성은 유출량의 과소 추정에 주요한 영향을 미치게 된다. 하지만, 검·보정기간 동안의 유출율과 토양수분의 변동폭, 통계분석결과로부터 SWAT 모형은 용담댐 유역의 유출특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

Table 2 Statistical Summary of the Model Calibration and Validation Results for Streamflow at Three Locations

Gauging station	Static		Calibration (2002~2006)	Validation (2007~2010)	All data
QCC	Precipitation (mm/yr)		1618.3	1406.1	1524.0
	Streamflow (mm/yr)	Obs.	948.7	793.0	879.5
		Sim.	868.3	650.1	771.3
	Runoff ratio (%)	Obs.	58.6	56.4	57.7
		Sim.	53.7	46.2	50.6
	Evaluation criteria	R^2	0.73	0.71	0.70
		NSE	0.64	0.71	0.67
		APB (%)	49.3	48.0	48.8
QDH	Precipitation (mm/yr)		1586.9	1190.9	1410.9
	Streamflow (mm/yr)	Obs.	1065.6	1009.5	1040.7
		Sim.	965.3	684.4	840.5
	Runoff ratio (%)	Obs.	67.2	84.8	73.8
		Sim.	60.8	57.5	59.6
	Evaluation criteria	R^2	0.65	0.48	0.52
		NSE	0.47	0.39	0.44
		APB (%)	61.5	65.6	63.3
QYD (outlet)	Precipitation (mm/yr)		1586.7	1190.9	1410.8
	Streamflow (mm/yr)	Obs.	1064.6	668.7	888.6
		Sim.	954.9	748.5	863.2
	Runoff ratio (%)	Obs.	67.1	56.2	63.0
		Sim.	60.2	62.9	61.2
	Evaluation criteria	R^2	0.44	0.55	0.48
		NSE	0.38	0.52	0.43
		APB (%)	62.0	66.7	63.6

Table 3 Statistical Summary of the Model Calibration and Validation Results for Soil Moisture at Five Locations

Gauging station	No. of data	Soil type	Land use	Soil moisture (%)		R^2	NSE
				Obs.	Sim.		
GB	86	Sandy Loam	Evergreen	32.7	33.1	0.47	0.40
BG	95	Silt Loam	Evergreen	34.7	35.4	0.27	0.16
CC	96	Loam	Evergreen	24.2	25.6	0.40	0.20
AC	96	Sandy Loam	Mixed Forest	27.7	28.0	0.76	0.65
JS	989	Sandy Loam	Evergreen	35.3	36.4	0.50	0.42

Fig. 3 Comparison of the Observed and SWAT-simulated Daily Soil Moisture at (a) GB, (b) BG, (c) CC, (d) AC, and (e) JS Stations

2. 미래 기후전망

편이보정에 따른 HadGEM3-RA의 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 대한 월별 평균기온 및 강수량 변화를 Fig. 4에 도시하였으며, Table 3에 연별 변화를 정리하였다. 먼저, 월별 변화로부터 평균기온은 4월부터 10월까지의 증가가 두드러지게 나타났으며, 특히 봄과 가을의 증가폭이 크게 나타났다. 한편, RCP 4.5 2040s 시나리오에서 1~2월의 평균기온이 다소 감소하였으나, RCP 8.5 2080s 시나리오에서 겨울철 평균기온은 최대 기준기간 (Baseline) 대비 3.4 °C 까지 증가하였다. 강수량변화를 살펴보면, RCP 4.5와 8.5 시나리오 모두 봄철 50 % 이상의 강수량 증가를 보였

으며, 여름철 7, 8월 강수량은 -14.6~+4.4%의 변화를 보였다. Table 4의 결과로 부터 용담댐 유역의 미래 연평균 기온 및 강수량은 각각 1.1~4.7 °C, 11.1~22.5 %의 증가경향을 보이는 동시에 상대습도와 풍속은 Baseline과 비슷한 수치를 보이고 있다. 전반적으로 CO₂농도가 높은 RCP 8.5 시나리오에서 기온과 강수가 더 큰 변화를 보이는 것으로 나타났다. 한편, NIMR (2011) 연구결과에 따르면 RCP 8.5 시나리오에서 21세기 말 한반도 평균 기온과 강수량은 각각 +6.0 °C, +20.4% 증가할 것이라 전망하였다. 변화의 시기 (Timing)와 크기 (Magnitude)는 지역에 따라 차이는 있으나, 용담댐 유역의 미래 기후변화 시나리오는 한반도 평균값과 유사한 크기의 변화를 나타냈다.

Fig. 4 Changes in the Timing and Magnitude of Monthly (a) Mean Temperature and (b) Precipitation under the RCP 4.5 (left graphs) and 8.5 (right graphs) Scenarios in the 2040s and 2080s

Table 4 Projection Result^[a] of the RCP 4.5 and 8.5 Climate Change Scenarios in the 2040s and 2080s

Scenario		PCP	T _{mean}	T _{max}	T _{min}	RH	WS
Baseline		1443.3	11.6	18.0	6.0	71.5	1.3
RCP 4.5	2040s	1557.9 (+7.9 %)	12.7 (+1.1 °C)	19.0 (+1.0 °C)	7.1 (+1.1 °C)	70.5 (−1.0 %)	1.4 (+0.1 m/s)
	2080s	1639.3 (+13.6 %)	13.6 (+2.0 °C)	20.0 (+2.0 °C)	8.1 (+2.1 °C)	70.2 (−1.3 %)	1.4 (+0.1 m/s)
RCP 8.5	2040s	1677.8 (+16.2 %)	13.4 (+1.8 °C)	19.7 (+1.7 °C)	7.8 (+1.8 °C)	72.5 (+1.0 %)	1.4 (+0.1 m/s)
	2080s	1767.8 (+22.5 %)	16.3 (+4.7 °C)	22.7 (+4.7 °C)	10.7 (+4.7 °C)	71.6 (+0.1 %)	1.4 (+0.1 m/s)

^[a]PCP: Precipitation (mm), T_{mean}: Mean Temperature (°C) T_{max}: Maximum Temperature (°C), T_{min}: Minimum Temperature (°C), RH: Relative Humidity (%), WS: Wind Speed (m/s)

3. 미래 기후변화에 따른 유역 수문영향 평가

SWAT 모형의 적용성을 평가한 후, RCP 4.5와 8.5 기후변화 시나리오 적용에 따른 용담댐 유역의 증발산 (Evapotranspiration,

ET), 지표유출 (Surface Runoff, SR), 중간유출 (Lateral Flow, LAT), 회귀유출 (Return Flow, RF) 및 하천유출 (Streamflow, ST)에 대한 수문요소별 변동성을 분석하였다. Fig. 5는 각 수문요소에 대한 월별 변화를 나타낸 것으로, 미래 증발산량은 기온변화 (Fig. 4a)에 기인하여 3~6월 사이의 증가가 두드러지게 나타났으며, 7, 8월 감소 경향을 보였다. 유출성분별 변화를 살펴보면, 강수량의 규모와 패턴변화 (Fig. 4b)에 의해 지표유출량의 경우, 7~9월 사이의 감소 경향이 뚜렷하게 나타났으나, 봄과 가을철 증가 폭이 큰 것으로 분석되었다. 또한, 기저유출량 (Baseflow = LAT + RF)이 지표유출 변화와 비슷한 경향을 보이면서 7, 8월의 하천유출량 감소로 이어졌으나, 총 유출의 규모는 증가하는 것으로 나타났다.

용담댐과 같은 다목적댐의 경우 단일목적의 농업용 저수지 등과 비교했을 때, 상대적으로 수자원 의존도가 크기 때문에 미래 물공급 신뢰도 확보를 위한 물수지 변화 분석과 그에 따른 미래 댐 유입량 예측의 예측이 필요하다. 다음 Fig. 6은 용담댐 유역의 미래 물수지 변화를 도시한 것으로 Table 5에 정리하였다.

Fig. 5 Future Climate Change Impact on Hydrologic Components Under the RCP 4.5 and 8.5 Scenarios in the 2040s (left graphs) and 2080s (right graphs): (a) Evapotranspiration, (b) Surface Runoff, (c) Baseflow, and (d) Streamflow

Table 5 Summary of Annual Projected Annual Hydrologic Components[a] under the RCP 4.5 and 8.5 Scenarios (Values in Parentheses are Percent Changes in Each Hydrological Component Based on Baseline)

Scenario	PCP	T _{mean}	T _{max}	T _{min}	RH	WS
Baseline	1443.3	554.0	458.9	38.5	364.8	861.5
RCP 4.5	2040s 1557.9 (+7.9 %)	576.4 (+74.0 %)	519.4 (+713.2 %)	33.2 (-13.8 %)	397.9 (+79.1 %)	949.2 (+710.2 %)
	2080s 1639.3 (+713.6 %)	593.4 (+77.1 %)	549.4 (+719.7 %)	35.7 (-7.3 %)	427.9 (+717.3 %)	1011.6 (+717.4 %)
RCP 8.5	2040s 1677.8 (+716.2 %)	581.9 (+75.0 %)	587.1 (+727.9 %)	37.0 (-3.8 %)	434.4 (+719.1 %)	1057.2 (+722.7 %)
	2080s 1767.8 (+722.5 %)	619.3 (+711.8 %)	628.0 (+736.8 %)	38.4 (-0.1 %)	447.6 (+722.7 %)	1112.8 (+729.2 %)

[a] PCP: Precipitation (mm), ET: Evapotranspiration (mm), SR: Surface runoff (mm), LAT: Lateral Flow (mm), RF: Return Flow (mm), ST: Streamflow (mm)

Fig. 6 Watershed Water Balance in the 2040s and 2080s under the (a) RCP 4.5 and (b) RCP 8.5 Scenarios (Values in Parentheses Indicate Water Balance Ratios Based on Precipitation)

먼저, RCP 4.5 2080s 시나리오에서 강수량이 13.6 %, 증발산량이 7.1 %까지 증가함에 따라 총유출량은 17.5 % 증가하였다. 수문요소 중 지표유출량과 회귀유출량은 각각 19.7 %, 17.3 % 증가하였으나, 중간유출량은 7.3 % 감소하는 것으로 나타났다. RCP 8.5 2080s 시나리오에서는 강수량과 증발산량이 22.5 %, 11.8 % 증가하면서, 하천유출량은 29.2 % 증가하였다. 지표유출과 회귀유출은 36.8%, 22.7 % 증가하였다. 중간유출의 감소

폭은 0.1 %로 분석되었다. 반면, 강수량 (100 %)에 대한 물수지 요소의 구성 비율은 증발산량이 Baseline대비 증가했음에도 불구하고 38.4 %에서 35.0 % (RCP 8.5 2080s)로 다소 감소하였다. 또한, 미래 강수의 크기와 패턴변화에 따른 유출율은 59.7 %에서 최대 63.0 % (RCP 8.5 2040s)까지 비율이 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 유출율의 변화는 지표유출의 하천유출량 기여도 증가에 따른 것으로, 총 하천유출량에서 지표유출량의 비율은 53.3 %에서 56.4 % (RCP 8.5 2080s) 증가하였다.

미래 기후변화에 의한 용담댐 유역의 수문영향을 종합해보면, RCP 8.5 시나리오에서 증발산량과 유출성분별 증가량이 RCP 4.5 시나리오 보다 상대적으로 큰 것을 알 수 있으며, 먼 미래로 갈수록 영향은 증폭되나 두 시나리오의 시간적 변화패턴은 유사한 경향을 보여주었다. 이러한 영향은 유역 물수지의 변화를 초래하나 각 수문성분에 대한 구성 비율의 변화는 크지 않을 것으로 전망된다.

VI. 요약 및 결론

본 연구에서는 용담댐 유역의 미래 기후변화에 따른 수문영향을 평가하고자 HadGEM3-RA 모형의 결과로부터 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 대한 편이보정을 통해 미래 기상자료를 생산하고, 유출 및 토양수분 자료를 통해 보정된 SWAT 모형을 이용하여 미래 수문요소별 변동성의 규모 및 시기 분석과 함께 유역 물수지 변화 분석을 수행하였다.

본 연구에서 적용한 RCP 시나리오는 Baseline을 기준으로 평균기온은 4.7 °C 증가하며, 강수량은 최대 28.3 % 증가하고 있다. 특히, RCP 시나리오에서 두드러지게 나타나고 있는 강수패턴의 특징은 여름철 강수량의 감소와 봄, 가을의 증가로서 이러한 변화는 물순환 체계에 영향을 미치며 하천유출량과 토양수분의 증가에 기여했다. 기온 상승에 따라 증발산량 또한 증가하는 경향이 강하게 나타났으나, 강수량의 증가에 따라 유출량과 토양수분 변화에는 그 영향이 작은 것으로 전망되었다. 또한, 미래 유출성분별 변화 결과를 보면, 지표유출과 회귀유출은 강수량의 변화패턴과 높은 상관성을 보이며 하천유출량 (댐유입량)의 증가로 이어졌다. 이는 용담댐의 이수 및 치수 측면에서 새로운 기회가 될 수 있을 것이다. 향후, 생·공용수, 관개용수, 하천유지용수 및 발전용수에 대한 수요가 증가할 것으로 기대되는 가운데 (MLTM, 2006), 물순환 건전성을 확보하면서 용수공급의 신뢰도, 즉 물부족 해소뿐만 아니라 홍수조절, 나아가 수생태계 보전 등 긍정적인 효과를 기대할 수 있을 것이다. 비록 토지이용 및 식생 변화 등에 의한 유역환경 변화를 고려하지 않은 미래 기후변화에 의한 수문영향 평가이나, 본 연구결과

는 댐운영 및 관리를 위한 장기적 측면에서의 대응방안 수립에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

한편, HadGEM3-RA 모형의 모의결과로부터 작성된 RCP 기후변화 시나리오는 여러 가지 요인에 의한 불확실성을 내포하고 있어 그에 따른 유역모형 모의결과와 불확실성은 더욱 커지게 마련이다. 게다가 많은 매개변수를 필요로 하는 SWAT 모형과 같은 유역모형에서 매개변수 조정에 따른 불확실성을 고려하지 않았기 때문에 본 연구의 결과를 절대적 판단기준으로 적용하기에는 무리가 있다 (Park et al., 2009). 하지만 기존 유출량 자료만을 이용한 모형의 적용성 평가에서 토양수분 자료를 활용한 보정 및 검증과정을 수행함으로써 수문요소별 모의 결과에 대한 신뢰성을 높였으며, 이를 통해 물수지 분석에 따른 유역의 수자원 변동성을 정량적으로 분석할 수 있는 계기를 마련하였다.

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013-065006).

REFERENCES

1. Ahn, S. R., G. A. Park, C. H. Jang, and S. J. Kim, 2013. Assessment of Climate Change Impact on Evapotranspiration and Soil Moisture in a Mixed Forest Catchment Using Spatially Calibrated SWAT Model. *Journal of Korea Water Resources Association* 46(6): 569-583 (in Korean).
2. Alcamo, J., P. Doll, F. Kaspar, and S. Siebert, 1997. Global change and global scenarios of water use and availability: An application of Water GAP 1.0. Report A9701. Kassel, Germany: University of Kassel, Center for Environmental Systems Research.
3. Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration, Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
4. Ambroise, B., J. L. Perrin, and D. Reutenauer, 1995. Multicriterion validations of a semidistributed conceptual model of the water cycle in the Fecht catchment, Vosges, Massif. France. *Water Resources Research* 31: 1467-1481.
5. Arnold, J. G., and P. M. Allen, 1996. Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds. *Journal of Hydrology* 176(1): 57-77.
6. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of American Water Resources Association* 34(1): 73-89.
7. Bastidas, L. A., H. V. Gupta, K. Hsu, and S. Sorooshian, 2003. Parameter, structure, and model performance evaluation for land-surface schemes. *Water Science and Applications* 6: 239-254.
8. Carter, T. R., M. Hulme, and M. Lal, 1999. IPCC-TGCIAGuidelines on the use of scenario data for climate change impact and adaptation assessment. version 1, IPCC, Task Group on Scenarios for Impact Assessment.
9. Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays, 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, NY.
10. Cunge, J. A., 1969. On the subject of a flood propagation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulics Research* 7(2): 205-230.
11. Hong, W. Y., M. J. Park, J. Y. Park, R. Ha, G. A. Park, and S. J. Kim, 2009. The correlation analysis between SWAT predicted forest soil moisture and MODIS NDVI during spring season. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(2): 7-14 (in Korean).
12. IPCC, 2012. Towards new scenarios for analysis of emissions, climate change, impacts and response strategies. Intergovernmental Panel on Climate Change, Expert Meeting Report.
13. IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
14. Jang, J. S., 2003. Introduction of hydrologic models and parameters. *Korea National Committee on Irrigation and Drainage* 10(1): 95-102 (in Korean).
15. Joh, H. K., J. W. Lee, H. J. Shin, G. A. Park, and S. J. Kim, 2010. Evaluation of evapotranspiration and soil moisture of SWAT simulation for mixed forest in the Seolmacheon catchment. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(4): 289-297 (in Korean).

16. Jung, H. K., S. J. Kim, and R. Ha, 2013. Assessment of Climate Change Impact on Storage Behavior of Chungju and the Regulation Dams Using SWAT Model, *Journal of Korea Water Resources Association* 46(12): 1235-1247 (in Korean).
17. Kim, N. W., J. E. Lee, I. M. Chung, and D. P. Kim, 2008. Hydrologic component analysis of the Seolma-Cheon watershed by using SWAT-K model. *Journal of the Environmental Sciences* 17(12): 1363-1372 (in Korean).
18. Koren, V., F. Moreda, and M. Smith, 2008. Use of soil moisture observations to improve parameter consistency in watershed calibration. *Physics and Chemistry of the Earth* 33: 1068-1080.
19. Kuczera, G., and M. Mroczkowski, 1998. Assessment of hydrological parameter uncertainty and the worth of multi-response data. *Water Resources Research* 34: 1481-1489.
20. K-water, 2008. Experimental watershed in Yongdam dam basin. Daejeon, Republic of Korea: K-Water. Available at: <http://www.ydew.or.kr>.
21. Lee, B. R., S. K. Kang, E. S., Kim, T. H. Hwang, J. H. Lim, and J. Kim, 2007. Evaluation of a hydro-ecologic model, RHESSys (Regional Hydro-Ecologic Simulation System): Parameterization and application at two complex terrain watersheds. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 9(4): 247-259 (in Korean).
22. Lee, Y. J., S. R. Ahn, B. S. Kang, and S. J. Kim, 2008. Assessment of Future Climate and Land Use Change on Hydrology and Stream Water Quality of Anseongcheon Watershed Using SWAT Model (II). *Journal of Korea Society of Civil Engineers* 8(6B): 665-673 (in Korean).
23. Manguerra, H. B., and B. A. Engel, 1998. Hydrologic parameterization of watersheds for runoff prediction using SWAT. *Journal of the American Resources Association* 34(5): 1149-1162.
24. MLTM, 2006. Water vision 2020. Ministry of Land, Transportation and Maritime Affairs, Korea (in Korean).
25. Nash, J. E., and J. E. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting though conceptual models: Part I, A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282-290.
26. Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams, and K. W. King, 2002. Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation, Version 2000. TWRI Report TR-191. College Station, TX.: Texas Water Resources Institute.
27. NIMR, 2011. Climate change scenario report 2011 to respond to the IPCC 5th Assessment Report. National Institute of Meteorological Research, Korea (in Korean).
28. Park, J. Y., M. J. Park, H. K. Joh, H. J. Shin, H. J. Kwon, R. Srinivasan, and S. J. Kim, 2011. Assessment of MIROC3.2 HiRes climate and CLUE-s land use change impacts on watershed hydrology using SWAT. *Transactions of the ASABE* 54(5): 1713-1724.
29. Park, J. Y., M. J. Park, S. R. Ahn, and S. J. Kim, 2009. Watershed modeling for assessing climate change impact on stream water quality of Chungju dam watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 42(10): 877-889 (in Korean).
30. Peterson, J. R., and J. M. Hamlett, 1998. Hydrologic calibration of the SWAT model in a watershed containing fragipan soils. *Journal of the American Water Resources Association* 34(3): 531-544.
31. Saxton, K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger, and R. I. Papendick, 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science of America Journal* 50(4): 1031-1036.
32. Soil Survey Staff, 1996. National Soil Survey Handbook. Title 430-VI, USDA Natural Resources Conservation Service, U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
33. Sophocleous, M. A., J. K. Koelliker, R. S. Govindaraju, T. Birdie, S. R. Ramireddygar, and S. P. Perkins, 1999. Integrated numerical modeling for basin-wide water management: The case of the Rattlesnake Creek basin in South-Central Kansas. *Journal of Hydrology* 214(1): 179-196.
34. USDA-SCS, 1972. Section 4: Hydrology. In National Engineering Handbook. Washington, D.C.: USDA Soil Conservation Service.