韓國水資源學會論文集
第48卷 第6號·2015年 6月
pp. 439~449

J. Korea Water Resour. Assoc.
Vol. 48, No. 6:439-449, June 2015
http://dx.doi.org/10.3741/JKWRA.2015.48.6.439
pISSN 1226-6280 • eISSN 2287-6138

SWAT모형을 이용한 용담댐 유역의 유량 전망 결과 비교 연구

A Comparison Study of Runoff Projections for Yongdam Dam Watershed Using SWAT

정 차 미* / 신 문 주** / 김 영 오***

Jung, Cha Mi / Shin, Mun-Ju / Kim, Young-Oh

Abstract

In this study, reliable future runoff projections based on RCPs for Yongdam dam watershed was performed using SWAT model, which was validated by k-fold cross validation method, and investigated the factors that cause the differences with respect to runoff projections between this study and previous studies. As a result, annual average runoff compared to baseline runoff would increase 17.7% and 26.1% in 2040s and 2080s respectively under RCP8.5 scenario, and 21.9% and 44.6% in 2040s and 2080s respectively under RCP4.5 scenario. Comparing the results to previous studies, minimum and maximum differences between runoff projections over different studies were 10.3% and 53.2%, even though runoff was projected by the same rainfall-runoff model. SWAT model has 27 parameters and physically based complex structure, so it tends to make different results by the model users' setting. In the future, it is necessary to reduce the cause of difference to generate standard runoff scenarios.

Keywords : climate change, runoff projection, rainfall-runoff model, SWAT, Yongdam dam watershed

요 지

본 연구에서는 SWAT 모형을 이용해 용담댐 유역을 대상으로 k-fold cross validation 기법을 사용하여 신뢰성 있는 RCP 기반의 미래 유출량을 산정하고 이를 과거 연구와 비교하여 SWAT 모형을 이용한 기후변화 유량 전망 결과의 차이의 요인에 대해 살펴보았다. 그 결과, 총유출량은 baseline 대비 2040s, 2080s 기간에 RCP8.5 시나리오에서는 17.7%, 26.1% 증가, RCP4.5 시나리오의 경우에는 21.9%, 44.6% 증가할 것으로 전망되었다. 이를 선행 연구와 비교해 본 결과 같은 모형을 사용했음에도 불구하고 유량 전망치의 경우 연구결과 간 최저 10.3%에서 최대 53.2% 차이를 보였다. SWAT 모형에는 물리적 기반 모형으로 27개의 많은 매개변수가 존재하고 사용자마다 모형을 구축하는 과정에서 차이가 많이 발생할 수 있다. 향후 이러한 차이요인을 저감하여 표준화된 유량시나리오 생성을 위한 노력이 필요하다.

핵심용어 : 기후변화, 유량 전망, 강우-유출모형, SWAT, 용담댐유역

* 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 석사 (e-mail: jungchami@gmail.com)
Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea
** 서울대학교 보건환경연구소 박사후연구원 (e-mail: bbear96@snu.ac.kr)
Post doctoral research fellow, Ph.D., Institute of Health & Environment, Seoul National University, Seoul, Korea
*** 교신저자, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (e-mail: yokim05@snu.ac.kr, Tel: 82-2-880-8916)
Corresponding Author, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

1. 서 론

국내의 기후변화에 의한 수자원 영향평가는 2000년대부터 활발히 진행되고 있다. 특히 금강유역을 대상으로 한 수자원 영향평가 사례가 많으나 동일 유역인데도 불구하고 매우 다른 결과들을 제시하고 있다. Ahn et al. (2001)은 GCM (General Circulation Model) 결과로부터 대청댐 유역의 유출량 변화를 파악하기 위하여 물수지 모형을 적용하여 3.4% 유량 증가 결과를 산출하였고, Ministry of Science and Technology (MST; 2004)는 용담댐 유역을 대상으로 YONU GCM (Yonsei University General Circulation Model)에 의해 작성된 기후변화 시나리오를 SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Process) 모형에 입력하여 용담댐 유역의 유출량이 7.6% 증가할 것으로 전망하였다. Ministry of Environment (ME; 2006)는 지면모형인 CLM을 RCM에 접합시킨 SNURCM을 개발하였고 물수지모형과 연계하여 4대강 유역의 유출량을 산정하였으며 2030~2049년의 유출량은 8.5% 증가할 것이라고 전망하였다. Kang (2007)은 용담댐 유역을 대상으로 5개의 GCM을 이용하여 시나리오를 생성하고 abcd모형을 이용하여 기후변화가 유출에 미치는 영향을 평가하였다. MST (2007)은 A2, B2 시나리오를 이용하여 국내 5대강 139개 유역을 대상으로 PRMS 모형을 이용하여 장기유출분석을 수행하였고, Ministry of Education and Science Technology (MEST; 2010)는 국내 109개의 중권역을 대상으로 13개의 AOGCM을 사용하여 기후시나리오를 생성하였다. 강우-유출모형의 선정에 따른 영향을 고려하기 위한 최근의 연구사례로서, Park et al. (2011)은 대청댐 및 용담댐유역을 대상으로 ECHO-G의 A1B 시나리오와 SWAT 모형을 이용하여 2080년대에는 유출량이 18% 증가할 것으로 전망하였고, No et al. (2013)은 RCP 시나리오를 기반으로 ArcSWAT 모형을 이용하여 금강유역의 유출량이 2080년대에 약 43% 증가할 것으로 전망하고 댐별 용수공급 변화량을 산정하였다. Minstry of Land, Infrastructure, and Transport (MLIT; 2013)는 국내 9개의 댐유역을 대상으로 SWAT, PRMS, SLURP 모형과 RCP4.5, 8.5 시나리오를 사용하여 미래 유량을 전망하였고, Park et al. (2014)은 RCP4.5, 8.5시나리오와 SWAT 모형을 이용하여 용담댐유역의 미래 유량이 2080년대에 약 23% 증가할 것으로 전망하였다. 이처럼 금강 유역의 기후변화 수자원 연구에서는 강우-유출모형으로 SWAT 모형이 가장 많이 사용되었으며 그 결과의 차이는 컸다.

기후변화에 따른 수자원 영향평가를 위해서는 수문순환의 핵심요소인 하천유출량 산정이 선행되어야 한다. 미래 유량 산정은 일반적으로 GCM (General Circulation Model)을 이용해 산출한 기후시나리오를 입력 자료로 사용하는데 이는 일련의 인위적 강제력 시나리오를 기반으로 한다. 여기서, 인위적 강제력 시나리오는 온실가스 배출 시나리오라고 부르는데, IPCC 제 4차 평가보고서에서는 SRES (Special Report on Emission Scenarios) 시나리오가 사용되었다. 하지만 SRES 시나리오는 산출과정의 시간 지연과 자료의 노후화 및 해상도 문제로 인해 정확성과 다양성을 필요로 하는 새로운 시나리오의 필요성을 증대시켰다. 결국, IPCC 제 5차 평가보고서를 위한 새로운 온실가스 배출 시나리오인 RCP (Representative Concentration Pathways)가 제시되었다. SRES에서는 미래의 사회·경제 형태가 가장 먼저 결정되고 이에 따른 배출량 시나리오로 온실가스 농도가 정해진 반면, RCP에서는 복사강제력을 먼저 설정하여 최신 온실가스 농도 변화 경향을 반영할 수 있다. 따라서 각국에서는 새로운 RCP 시나리오를 따른 기후변화 전망 및 영향평가가 진행되고 있으며 우리나라도 예외는 아니다.

그러므로 본 연구에서는 우리나라 기후변화 연구에서 가장 많이 적용된 금강유역의 용담댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 RCP 시나리오 기반의 개선된 유량 전망을 실시하고 이를 과거 연구와 비교하여 SWAT 모형을 이용한 기후변화 유량 전망 결과가 어느 정도의 차이가 발생하며 이러한 차이의 발생 요인이 무엇인지 살펴보고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 RCP 시나리오

본 연구에서는 IPCC 5차 평가보고서에서 새롭게 도입한 온실가스 시나리오 RCP를 사용하였다. IPCC 제 4차 평가보고서에서 제시되었던 SRES 시나리오는 위의 “1. 서론”에서 설명한 것과 같이 미래의 사회·경제 형태가 가장 먼저 결정되고 이에 따른 배출량 시나리오로 온실가스 농도가 정해진 반면, RCP 시나리오에서는 복사강제력을 먼저 설정하여 최신 온실가스 농도 변화 경향을 반영할 수 있을 뿐 아니라 해상도 향상 및 토지이용변화에 따른 영향을 포함한 통합적 미래기후현상을 모의가 가능하다는 장점이 있다.

RCP는 하나의 대표적인 복사 강제력에 대해 사회-경제 시나리오는 여러 가지가 될 수 있다는 의미에서 ‘대표(Representative)’라는 표현을 사용한다. 또한 온실가스 배출 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 ‘경로

(Pathway)'라는 의미를 포함한다(National Institute of Meteorological Research; 2011). RCP 시나리오는 전 세계 온실가스 배출관련 모형(MESSAGE, AIM, GCAM, IMAGE)을 활용한 온실가스 배출량 산정을 기초로 온실가스, 에어로졸을 바탕으로 한 복사강제력 산출, 사회경제적 변화에 따른 토지이용변화 결과를 통합하여 최종적인 배출시나리오 4개(RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5)를 확정하였다. RCP 시나리오 숫자는 복사강제력, 즉 온실가스 등으로 에너지의 평형을 변화시키는 영향력의 정도를 의미하는 양으로서 단위는 W/m^{2}이다. 각 RCP별 특징은 다음과 같다.

- RCP2.6 : 인간활동에 의한 영향을 지구 스스로 회복 가능한 경우
- RCP4.5 : 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우
- RCP6.0 : 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우
- RCP8.5 : 현재 추세(저감없이)로 온실가스가 배출되는 경우

RCP 시나리오를 따른 한반도 기후변화 시나리오 산출과정은 크게 3가지로 구분된다. 먼저 새로운 온실가스 배출 시나리오인 RCP 시나리오에 기초해 전 지구 대기-해양 결합모형인 HadGEM2-AO (The fully-coupled atmosphere-ocean version of the Hadley Centre Global Environment Model, version 2)로 약 135 km 해상도의 전 지구 기후변화 시나리오를 산출한다. 그리고 전 지구 기후변화 시나리오 자료에 기초해 우리나라 지역에 대한 12.5 km 해상도의 지역기후모형인 HadGEM3-Ra를 이용해 한반도 지역기후변화 시나리오를 산출한다. 지역기후모형을 통해 생산된 한반도 기후변화 시나리오에서 각 격자점별로 계절 변동을 제거한 편차자료를 추출하여 PRIDE (PRISM based Downscaling Estimation Model)에 적용된 관측자료(2000~2010년)에서 얻은 기후 값에 지역기후모형의 편차를 더하면 모형 계통오차가 제거된 새로운 1 km 격자형 남한상세 기후변화 시나리오가 생산된다.

2.2 강우-유출모형

본 연구에서는 유량 전망을 위한 강우-유출모형으로 대상 유역의 기후변화 연구에서 가장 많이 사용되었기 때문에 결과의 비교분석이 용이한 준분포모형, SWAT (Soil and Water Assessment Tool)(Arnold et al., 1998)모형을 선정하였다.

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service)의 Jeff Arnold 등에 의해 개발된 유역모형으로서 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 장기 강우-유출모형이며, 수문 부모형, 토양유실 부모형, 영양물질 부모형, 하도추적 부모형으로 구성되어 있다. 유역은 지형특성을 반영하여 수 개의 소유역으로 구분되고 소유역 내 토지피복 및 토양, 지형경사에 따라 소유역 내 최소단위로 집중화된 수문반응단위(HRU, Hydrologic Response Unit)로 나뉘고 각 HRU에서 물수지식에 근거해 표면 유출량, 지하수로의 침투량, 증발산량을 산정한다. 입력 기상자료로는 최고 기온(℃), 최저 기온(℃), 평균풍속(m/s), 일사량(MJ/m^2), 상대습도, 강수량(mm)이 필요하다.

SWAT 모형에서 모의되는 수문순환은 Eq. (1)의 물수지 방정식에 기초한다.

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

여기에서 SW_t는 최종 토양수분량(mm), SW_0는 i 일 동안의 초기토양수분량(mm), t는 시간(days), R_{day}는 i 일 동안의 강수량(mm), Q_{surf}는 i 일 동안의 표면유출량(mm), E_a는 i 일 동안의 증발산량(mm), W_{seep}는 i 일 동안의 침루량(mm), Q_{gw}는 i 일 동안의 회귀수량(mm)을 나타낸다.

지표면 유출을 모의하기 위해 SCS 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법의 두 가지 방법을 사용한다. 또한 잠재증발산량 산정은 Penman Monteith 방법, Priestley Taylor 방법 및 Hargreaves 방법을 사용하고 있다.

2.3 k-fold cross validation

본 연구에서는 자료의 양이 충분하지 않을 때 통계적 신뢰도를 높이기 위해 사용되는 기법 중의 하나인 k-fold cross validation 방법을 사용하였다. 모형의 검·보정을 실시할 때 관측 유량의 자료가 충분히 제공되지 않는 경우에는 k-fold cross validation을 이용하여 짧은 기간의 자료에 대해 효율적으로 모형의 검·보정을 실시할 수 있다. 데이터를 k개의 집단으로 나누고 k-1개의 집합에 대해 보정을 하고 나머지 1개의 집합으로 검정을 실시한다. 모든 집단들이 검정자료로 정확히 한 번씩 사용될 때까지 k개의 집합들은 k-fold cross validation 프로세스 동안 k번 검·보정 과정을 반복하게 된다. 따라서 자료의 모든 기간에 대해서 검·보정을 실시하여 특정 기간의 특성만을 반영한 것이 아닌 가능한 다양한 자료의 특성을 반영할 수 있게 된다. 즉, 보정기간을 자료가 가능한 범위에서 최대한으로 늘릴 수 있게 된다.

3. 적용 및 결과

3.1 대상 유역 및 기상자료

본 연구의 대상유역은 금강 수계 상류에 위치하여 전주

권과 댐 하류에 용수를 공급하고 있는 용담댐 유역이다. 북위 35°35′~36°0′, 동경 127°20~127°45′의 범위에 위치하며, 무주군, 진안군, 장수군을 포함한 충청남도, 전라북도, 경상남도의 경계에 걸쳐있다. 유로연장은 62.58 km이고 유역면적은 930.43 km^2로 금강 유역면적의 약 9.5%를 차지하고 있으며 대부분이 산지와 농업지역으로 각각 70%, 21%를 차지하고 있다. 유역의 연평균 기온은 11.6℃이며, 연평균 강수량은 1362.3 mm이다. 용담댐 유역의 5개의 기상관측소(거창, 금산, 임실, 장수, 전주)의 강수량(mm), 기온(℃), 풍속(m/s), 상대습도 및 일사량(MJ/m^2) 자료를 1981~2013년까지 기간에 대해 기상청으로부터 제공받아 사용하였다. 또한 모형의 적용성 평가를 위해 국가수자원관리정보시스템(http://www.wamis.go.kr)에서 제공하고 있는 2001~2013년의 용담댐 지점의 유출량 자료를 검·보정에 사용하였다.

3.2 RCP 시나리오에 따른 기상 전망

본 연구에서는 RCP 온실가스 배출 시나리오 중 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 대해 12.5 km 해상도의 일별 자료를 사용하였다. 이 시나리오는 기후변화 예측모델인 Had GEM2-AO를 통해 전지구 135 km, 한반도 12.5 km로 높인 시나리오로서 기상청에서 제공하고 있다. MLIT (2013)에서는 기상청의 HadGEM3-Ra 자료를 편이보정하였으며 본 연구에서는 이 자료를 세종대학교에서 제공받아 사용하였다. 미래 기상시나리오는 과거기간에 대한 수문기상 자료와 동일하게 5개의 기상관측소(전주, 금산, 임실, 거창, 장수)의 강수량(mm), 기온(℃), 풍속(m/s), 상대습도 및 일사량(MJ/m^2) 자료를 2020~2099년까지 기간에 대해 사용하였다(Table 1). 미래 전망 결과 분석 및 비교를 위해 과거기간은 baseline (1982~2011년), 미래기간은 2040s (2020~2059년), 2080s (2060~2099년)으로 지정하여 수행하였다. 이는 본 연구의 SWAT모형의 모의능력 검증을 위해 선행 연구인 Park et al. (2014)의 분석기간을 참고하여 설정하였다.

그 결과, 온실가스 저감정책이 상당히 실현(RCP4.5)될 경우, 2080s에 용담댐 유역의 평균기온은 baseline (1982~2011년)에 비해 2.5℃ 상승할 것이고 강수량은 25.2% 증가할 것으로 전망하고 있다. 한편, 현재 추세로 저감 없이 온실가스를 배출(RCP8.5)한다면 2080s에 기온은 baseline에 비해 4.7℃ 증가하고, 강수량은 19.8% 증가할 것으로 전망되었다. 정리하면, RCP4.5 시나리오의 경우 RCP8.5 시나리오에 비해 강수량 증가가 더 컸으나 기온은 더 적게 증가할 것으로 나타났다. 따라서 RCP8.5 시나리오의 경우 RCP4.5 시나리오에 비해 기온상승으로 인해 잠재증발산량의 증가가 더 클 것으로 전망된다(Table 1).

3.3 SWAT 모형의 적용 및 결과

3.3.1 과거 연구와 비교를 통한 적용성 평가

본 연구에서는 용담댐 유역의 출구지점에서의 관측유출량 자료를 사용하여 모형으로부터의 결과가 관측 자료에 가능한 일치되도록 보정을 실시하였다. 이때 대상유역에 대한 과거 연구(Park et al., 2014)의 검·보정 기간 및 매개변수를 참고하여 본 연구에서는 검·보정을 실시하고 모의결과를 비교하였는데, 과거 연구와 검·보정 기간 및 기상관측소 지점, 보정된 매개변수 값을 동일하게 하여 대등한 모의능력을 보이면 본 연구의 SWAT 모형의 세팅 및 용담댐 유역에 대한 적용성을 확인할 수 있다.

모형의 보정은 용담댐의 5개년(2002~2006)간의 일별 댐 유입량 자료를 이용하여 시행착오법으로 실시하였으며

Table 1. Projection Result of RCP4.5 and 8.5 Scenarios in the 2040s and 2080s

Scenario		PCP	T_{mean}	T_{max}	T_{min}	RH	WS	PET
Baseline		1363.0	12.1	18.6	6.7	73.9	1.5	1106.0
RCP4.5	2040s	1515.4 (11.2%)	13.7 (1.6℃)	20.4 (1.8℃)	8.5 (1.8℃)	74.4 (0.7%)	1.5 (-)	1157.7 (4.7%)
	2080s	1706.5 (25.2%)	14.6 (2.5℃)	21.4 (2.8℃)	9.5 (2.8℃)	74.6 (0.9%)	1.5 (-)	1193.4 (7.9%)
RCP8.5	2040s	1515.6 (11.2%)	14.2 (2.1℃)	20.9 (2.3℃)	8.9 (2.2℃)	74.6 (0.9%)	1.5 (-)	1186.3 (7.3%)
	2080s	1633.2 (19.8%)	16.8 (4.7℃)	23.8 (5.2℃)	11.7 (5.0℃)	75.0 (1.5%)	1.4 (-1m/s)	1298.5 (17.4%)

PCP: Precipitation, T_{mean}: Mean Temperature, T_{max}: Maximum Temperature, T_{min}: Minimum Temperature, RH: Relative Humidity, WS: Wind Speed, PET: Potential evapotranspiration, ( ) represents changes relative to the historical statistics

모형의 검정은 보정된 매개변수를 적용하여 3개년(2007~2009)에 대하여 실시하여 Park et al. (2014)에서 사용한 검·보정 기간을 동일하게 하였다. 이때, 2001년은 초기 안정화 기간으로 지정하였다. 매개변수의 경우, Park et al. (2014)은 ALPHA_BF, GW_DELAY, CH_K2, SOL_K, ESCO, SOL_AWC를 사용하였으나 본 연구에서는 SWAT 모형의 version의 차이로 인해 6개의 매개변수 중 GW_DELAY와 SOL_K를 제외하고 보정을 실시하였다. 편의상 Park et al. (2014)과 동일한 검·보정 기간을 사용한 본 연구의 SWAT 모형 결과를 SW-P라고 하였다.

용담댐 지점의 모의된 유량과 관측유량을 비교한 결과는 Table 2와 같다. SW-P의 경우 보정기간의 R^2, *NSE*는 각각 0.63, 0.62, 검정기간의 R^2, *NSE*는 각각 0.69, 0.59로 분석되었다. 이는 과거 연구 Park et al. (2014) 보다 더 높은 모의 능력을 나타냄으로서 본 연구에 사용된 SWAT 모형의 기본적인 세팅은 용담댐 유역에 대해 유출을 모의하는데 적합하다고 할 수 있다. Fig. 1은 용담댐 유역 출구점의 검·보정 기간에 대해 유출량을 모의한 결과를 나타낸다.

3.3.2 k-fold cross validation을 통한 보정 기간의 연장

용담댐은 2001년에 건설되었으므로 2002년 이후부터의 관측유량을 검·보정에 사용할 수 있다. 본 연구에서 비교한 과거 연구인 Park et al. (2014)에서는 2002~2006년(5년)만을 보정기간으로 지정하였다. 하지만 Chiew et al. (2009)과 Vaze et al. (2010)은 기후변화 영향평가에서는 최소 20년 이상의 충분한 기간의 과거 자료를 이용하여 모형의 보정(calibration)을 실시하여 우기(wet period) 또는 건기(dry period)의 유출량을 모두 추정할 수 있도록 하여야 한다고 제시하였다. 즉, 보정에 사용되는 자료는 대상 유역의 다양한 현상을 대표할 수 있어야 하는데, SW-P와 같이 5년만을 보정기간으로 수행한 적용성 평가 결과는 타당성이 떨어지게 된다.

이를 보완하기 위해서 본 연구에서 k-fold cross validation 기법을 사용하였다. 이 기법을 이용한 검·보정은 Table 3과 같이 총 6개의 case의 기간으로 나누어 시행되었다. Park et al. (2014)과 SW-P를 비교해보면 보정기간이 5년

Table 2. Comparison Simulation Results between Park et al. (2014) and this Study (SW-P)

Study case	Static		Average during calibration	Average during validation
Park et al. (2014)	Runoff (mm/yr)	Observed	1,064.6	668.7
		Simulated	954.9	748.5
SW-P		Observed	1,069.7	646.4
		Simulated	1,010.6	818.4
Park et al. (2014)	Evaluation criteria	R^2	0.44	0.55
		NSE	0.38	0.52
SW-P		R^2	0.63	0.69
		NSE	0.62	0.59

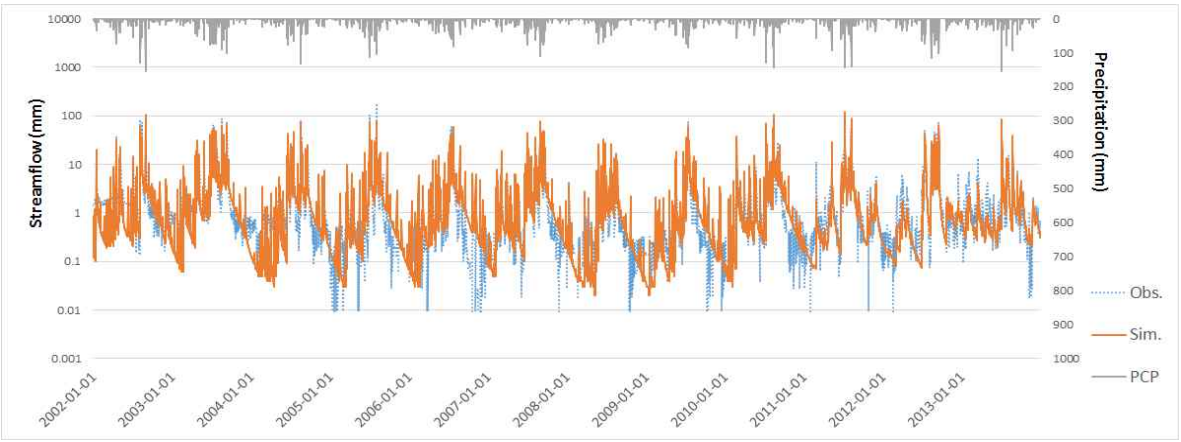

Fig. 1. Streamflow at the Outlet of Yongdam Dam Watershed During 2002~2013 (SW-P)

에서 10년으로 2배로 늘어났으며 자료의 전 기간에 대해 검·보정을 실시하였다는 점에서 신뢰성을 높였다고 할 수 있다. 이때 사용한 매개변수는 선행 연구들을 참고하여 민감한 매개변수 4개(ALPHA_BF, ESCO, SOL_AWC, CN2)를 선정하였으며 시행착오법으로 검·보정을 수행하였다. k-fold cross validation을 이용하여 보정기간을 늘려 보정을 실시한 모형은 편의상 SW-K라고 하였다.

보정과 검정을 통한 용담댐 지점의 모의된 유량을 관측유량과 비교한 결과 보정기간에는 NSE, R^2는 각각 0.62~0.65, 0.64~0.69로 나타났으며, 검정기간에는 NSE, R^2는 각각 0.48~0.70, 0.65~0.74로 분석되었다. 평균값의 경우 보정기간에는 NSE는 0.64, R^2는 0.67, 검정기간에는 NSE는 0.62, R^2는 0.68로 보정기간을 늘렸음에도 불구하고 SW-P의 모의능력보다 대부분 조금씩 향상된 결과(Table 3)를 보여주었다. 따라서 제한적인 기간의 자료를 효율적으로 이용한 SW-K가 더 적절히 유량을 모의할 수 있다고 판단할 수 있다. Fig. 2에 용담댐 유역 출구점의 검·보정 기간에 대해 SW-K로 유출량을 모의한 결과를 도시하였다.

3.4 SWAT 모형을 이용한 유량 전망

유량 전망에는 k-fold cross validation 기법을 사용하여 추정한 6개 case의 매개변수 값 중에 case 1의 값을 적용하였다(Table 3). 기후변화 연구에서는 가장 최근의 자료의 사용이 의미가 있는데, case1의 경우는 보정기간을 2004~2013년, 검정기간을 2002~2003년을 사용함으로써 다른 cases 보다 연속된 최근자료를 보정에 사용하였다. RCP4.5와 RCP8.5 시나리오 적용에 따른 용담댐 유역의 미래 유량을 분석하기 위해 과거기간은 baseline (1982~2011년), 미래기간은 2040s(2020~2059년), 2080s (2060~2099년)로 21세기를 2구간으로 나누었다.

3.4.1 연평균 유량 전망

용담댐 유역에 RCP4.5, 8.5 시나리오를 적용하여 미래 유량을 전망한 결과, 총유출량은 baseline 대비 2040s, 2080s 기간에 RCP8.5 시나리오에서는 17.7%, 26.1% 증가, RCP4.5 시나리오의 경우에는 21.9%, 44.6% 증가하는 것으로 나타났다(Table 4). RCP4.5 시나리오의 경우 총유량

Table 3. Calibration and Validation Results using k-fold Cross Validation (SW-K)

Case	Calibration Period	Validation Period	Calibration		Validation	
			NSE	R^2	*NSE*	R^2
1	2004~2013	2002~2003	0.63	0.67	0.64	0.65
2	2002~2003, 2006~2013	2004~2005	0.64	0.69	0.61	0.61
3	2002~2005, 2008~2013	2006~2007	0.64	0.66	0.64	0.68
4	2002~2007, 2010~2013	2008~2009	0.63	0.66	0.63	0.72
5	2002~2009, 2012~2013	2010~2011	0.62	0.64	0.70	0.74
6	2002~2011	2012~2013	0.65	0.67	0.48	0.70
Avg. (SW-K)	-	-	0.64	0.67	0.62	0.68
(SW-P)	-	-	0.62	0.63	0.59	0.69

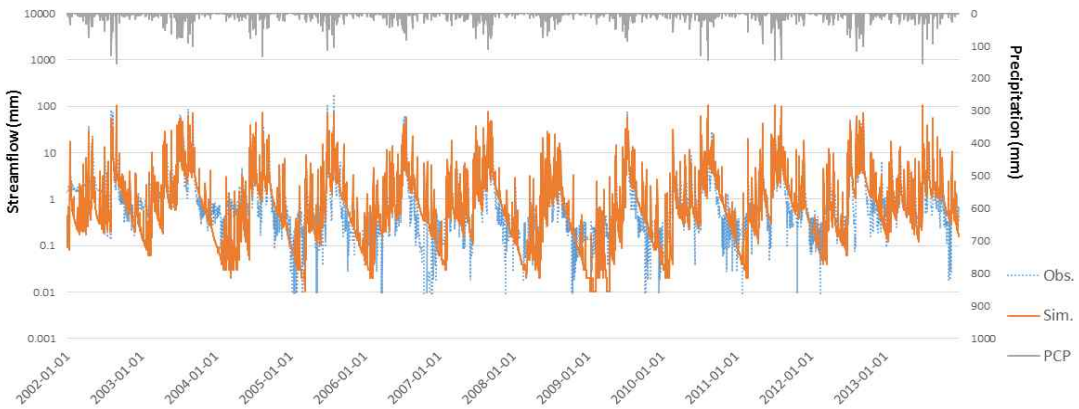

Fig. 2. Streamflow at the Outlet of Yongdam Dam Watershed During 2002~2013 (SW-K)

출 증가가 RCP8.5 시나리오의 경우보다 컸는데 이는 RCP8.5 시나리오를 적용할 때 강수량의 증가는 더 적게 일어나지만 기온의 상승이 더 커서(Table 1) 증발산이 더 활발히 일어나기 때문이라고 볼 수 있다. 이러한 양상은 먼 미래로 갈수록 심화된다.

3.4.2 물수지 분석

연평균 유량을 수문순환 요소들에 대해 물수지 분석을 실시하였다. Fig. 3과 같이 RCP4.5 시나리오의 경우 강수량을 100%로 했을 때 지표유출, 중간유출, 지하수유출, 그리고 총유출의 구성비율은 시간이 지날수록 증가하였다. 그 중, 지표유출이 가장 크게 증가하였다. 하지만 증발산량은 baseline 대비 증가했음에도 불구하고 강수량(100%)에 대한 수문순환에서 차지하는 비율은 시간이 지날수록 감소하였다(Fig. 3). 반면, RCP8.5 시나리오의 경우 Fig. 4와 같이 강수량을 100%로 했을 때 지표유출, 중간유출, 지하수유출, 그리고 총유출의 구성비율은 2040s까지는 증가하였으나 2080s에는 중간유출을 제외하고 지표유출, 지하수유출은 비율을 유지하거나 감소하였다. 증발산량의 경우도 2040s과 2080s에는 비슷한 구성비율을 유지하는 것으로 나타났다(Fig. 4). 따라서 전체적으로 유역 물수지의 변화는 있지만 구성비율의 변화는 크게 바뀌지 않을 것으로 전망되었다.

3.4.3 계절별 유량 전망

총유출량의 계절별 변화에 대해 분석한 결과 총유출량은 RCP4.5, 8.5 시나리오에서 2040s에는 가을을 제외하고 모두 증가하는 것으로 전망되었고 계절별로 과거 대비 유량의 증가량은 여름이 가장 컸으나 증가율은 겨울이 가장 컸다. 2080s에는 RCP4.5 시나리오의 경우 모든 계절에서 유출량이 증가하는 것으로 전망되었으며, 증가율의 순서는 겨울, 여름, 봄, 가을 순이었다. 반면 RCP8.5 시나리오의 경우에는 가을을 제외하고 전 계절에서 유량이 증가하는 것으로 전망되었으며, 증가율은 겨울, 봄, 여름 순이었다. 전반적으로 2040s보다 2080s에서 유량이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

3.5 과거 연구결과와의 차이에 대한 요인분석

과거 금강유역을 대상으로 유량을 전망한 연구결과들은 매우 상이한 결과를 보여주었다. 결과 차이의 요인에

Table 4. Annual Average Runoff Projected (SW-K)

Static	Baseline	RCP4.5		RCP8.5	
		2040s	2080s	2040s	2080s
Precipitation (mm)	1,363.0	1,515.4 (11.2%)	1,706.5 (25.2%)	1,515.6 (11.2%)	1,633.2 (19.8%)
Potential Evpotranspiration (mm)	1,106.0	1,157.7 (4.7%)	1,193.4 (7.9%)	1,186.3 (7.3%)	1,298.5 (17.4%)
Streamflow (mm)	634.2	772.9 (21.9%)	917.2 (44.6%)	746.7 (17.7%)	799.8 (26.1%)

( ) represents changes relative to the historical statistics

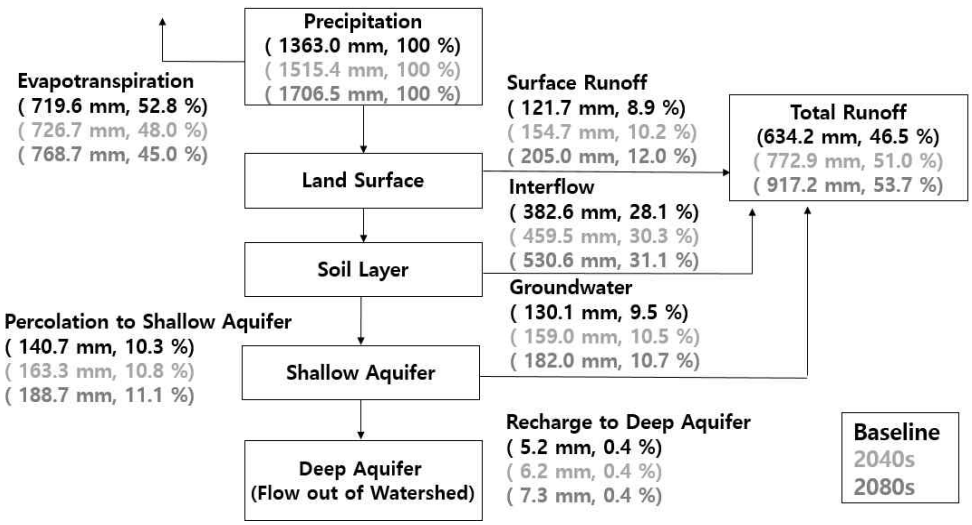

Fig. 3. Water Balance Analysis Based on RCP4.5 Scenario

는 사용된 자료의 차이는 물론 온실가스 배출시나리오, GCM, 상세화기법, 강우-유출모형의 차이로 인한 이유 등이 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 금강유역에서 가장 많이 사용된 SWAT 모형을 이용하여 유량을 전망한 연구들의 결과와 본 연구의 결과를 비교·분석함으로써 준분포모형인 SWAT 모형을 사용할 경우 결과에는 어떠한 요소로 인해 차이가 발생할 수 있는지, 그리고 결과는 어느 정도 차이가 발생하는지를 조사하였다.

비교·분석은 본 연구에서 산출한 결과(SW-P, SW-K)와 선행 연구 2편(Park et al. (2014), MLIT (2013))에 대해 세부적으로 총 3가지 사례로 실시하였다. 첫 번째 사례는 Park et al. (2014)과 SW-P를 비교한 것으로 이 두 결과는 검·보정 기간이 동일하다는 점에서 공통점이 있으나, 그 외 모형의 상세 세팅, 기후변화 시나리오 입력자료, 보정에 사용한 매개변수는 다르다. 두 번째 사례는 SW-P와 SW-K를 비교하는데, 이 두 결과는 모형 세팅, 기후변화 시나리오 입력 자료는 같지만 검·보정 기간과 보정에 사용한 매개변수가 다르다. 세 번째 사례는 SW-K와 MLIT (2013)의 결과를 비교·분석을 하는데, 이 두 연구는 검·보정 기간, 모형 세팅, 보정에 사용된 매개변수는 다르나, 기후변화시나리오는 동일한 입력 자료로 사용하였다. Table 5에 연구별 검·보정 기간을 정리하였다.

3.5.1 Park et al. (2014)과 SW-P의 비교

두 연구의 baseline에 대해 모의한 유량 값은 19.2% 정도의 차이를 보였다(Table 6). RCP4.5 시나리오를 적용하였을 때 두 연구 결과의 유량 값 차이는 2040s, 2080s에서는 10.5%, 0.1% 차이를 보였고 RCP8.5 시나리오를 적용하였을 때 두 연구 결과의 유량 값 차이는 2040s, 2080s에서는 28.6%, 22.0% 차이를 보였다. 이 비교 사례에서 결과의 차이 요인으로는 크게 3가지로 생각할 수 있다. 기상입력 자료인 기후변화시나리오 편이보정 방법에 대한 차이, 매개변수 값 차이, 정밀토양도, 토지이용도와 같은 지형자료 및 모형 기본 세팅의 차이가 있을 수 있다. 결과의 차이의 원인에 대해 자세히 살펴보았다.

(1) 기후변화시나리오 편이보정에 따른 차이

Park et al. (2014)과 SW-P는 RCP4.5와 RCP8.5 시나리오에 대해서 편이보정을 다른 방법으로 실시하여 기후변화 시나리오가 다르다. 강수량 변화에서 SW-P에서 사용한 RCP4.5, 8.5 시나리오에서는 2080s에 각각 25.2%, 19.8% 증가할 것으로 전망되었으나, Park et al. (2014)의 경우는 각각 13.6%, 22.5% 증가할 것으로 전망되었다.

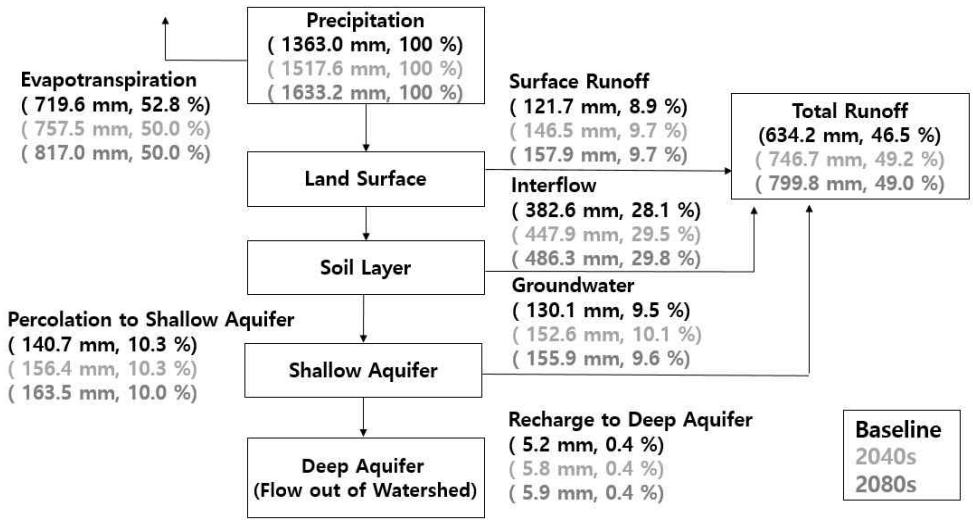

Fig. 4. Water Balance Analysis Based on RCP8.5 Scenario

Table 5. Calibration and Validation Period of Studies

Studies	Calibration	Validation
Park et al. (2014)	2002~2006 (5 years)	2007~2010 (4 years)
SW-P	2002~2006 (5 years)	2007~2010 (4 years)
SW-K	2004~2013 (10 years)	2002~2003 (2 years)
MLIT (2013)	2001~2002 (2 years)	2003~2005 (3 years)

SW-P의 경우에는 강수량이 RCP4.5 시나리오가 RCP8.5 시나리오 보다 더 많이 증가하였는데, Park et al. (2014)에서는 반대였다. 이를 보면 전혀 다른 양상의 기후변화 시나리오를 사용한 것과 다름이 없어 유량 전망 결과에서도 차이가 클 것으로 예상되었다.

(2) 매개변수의 차이

두 연구 결과는 보정에 사용한 매개변수가 다르다. SWAT 모형에서는 20개 이상의 매개변수가 존재하나 유량 모의에 민감한 매개변수는 일부이다. 따라서 시행착오법으로 매개변수 추정을 시행할 경우, 최적의 매개변수는 다양한 조합이 나올 수 있고 결과 또한 그만큼 상이하게 나올 가능성이 높다.

(3) 모형 세팅

SWAT 모형에서는 정밀토양도, 토지이용도에 대한 자료를 입력하여 유역을 구성하고 세부적으로 모형 세팅을 시행하여야 한다. 이에 따른 유출량 결과 차이가 발생할 수 있다.

3.5.2 SW-P와 SW-K 비교

Baseline (1982~2011년)에 대한 유량 값은 13.9% 정도의 차이를 보였다(Table 6). RCP4.5 시나리오를 적용하였을 때 두 모형에서 산출된 유량 값 차이는 2040s, 2080s에서는 11.2%, 10.4% 차이를 보였고 RCP8.5 시나리오를 적용하였을 때 유량 값 차이는 2040s, 2080s에서는 10.1%, 14.1% 차이를 보였다. 두 모형은 기본적으로 같은 모형의 세팅, 기후변화시나리오를 사용하였기 때문에 매개변수 값의 차이가 결과의 차이의 주요 원인이라고 볼 수 있다.

3.5.3 SW-K와 MLIT (2013) 비교

Baseline (1982~2011년)에 대한 두 모형의 유량 값은 53.2% 정도의 차이를 보였는데, 2040s, 2080s에서는 RCP4.5 시나리오를 적용하였을 때 유량 모의 값 차이는 41.5%, 38.4% 차이를 보였고 RCP8.5 시나리오를 적용하였을 때 유량 모의 값 차이는 46.4%, 48.9% 차이를 보였다(Table 6). 이러한 두 가지 모형으로부터 산출된 유량 모의 값의 차이의 원인에는 같은 기후변화 시나리오를 사용하였으나 모형의 기본적인 세팅 및 매개변수 검·보정에서의 차이점을 생각할 수 있다. 세 가지 사례 중 유량 값 결과에 대해 가장 큰 차이를 보인 사례로서 기후변화 시나리오로 인한 영향보다 SWAT 모형 내에서 민감한 매개변수를 선택하고 모형을 세팅하는 과정이 유량 값 모의에 더 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 하지만 과거기간 대비 미래 유량 값에 대한 변화율의 경우에 대해서는 다른 기후변화 시나리오를 사용한 첫 번째 사례보다 평균적으로 차이가 더 적은 것으로 나타났다(Table 6). 즉, 유량 값 전망에는 SWAT 모형 내에서 발생하는 세팅의 차이가 더 크게 영향을 미치나, 과거기간 대비 미래 유량 값의 변화율 전망에는 기후변화 시나리오의 차이가 모형 내에서 발생할 수 있는 차이보다 더 크게 영향을 미치는 것으로 추정된다.

3.5.4 종합

같은 유역을 대상으로, 같은 모형으로 유량을 전망하여도 결과가 매우 상이하게 나올 수 있다는 것을 확인할 수 있다. SWAT 모형의 경우 물리적 기반의 준분포모형으로 정밀토양도, 토지이용도 등의 지형자료 및 상대습도, 일사량, 평균풍속, 최고온도, 최저온도, 강수량 등 많은 기상자료를 필요로 한다. 따라서 미래 유량을 전망하는 경우 SWAT 모형은 이미 불확실성이 큰 기후변화 시나리오 자료를 많이 사용하게 되어 결과의 차이가 크게 발생할 수 있으며 기본 모형 세팅에서도 차이가 발생할 수 있다. 그리고 SWAT 모형에는 20 여개의 많은 매개변수가 존재하여 사용자마다 검·보정하는 과정에서 발생하는 차이에 의해 결과가 상이하게 나올 가능성 또한 매우 크다.

Table 6. Difference between Studies

RCP	Studies	Baseline	2040s		2080s	
		Runoff (%)	Runoff (%)	Rate of runoff change (%)	Runoff (%)	Rate of runoff change (%)
RCP4.5	SW-P and Park et al. (2014)	19.2	10.5	-8.9	-0.1	-22.8
	SW-P and SW-K	13.9	11.2	-3.0	10.4	-4.4
	SW-K and MLIT (2013)	53.2	41.5	-9.4	38.4	-13.9
RCP8.5	SW-P and Park et al. (2014)	19.2	28.6	9.0	22.0	3.0
	SW-P and SW-K	13.9	10.1	-4.0	14.1	0.1
	SW-K and MLIT (2013)	53.2	46.4	-5.2	48.9	-3.6

4. 결 론

용담댐 유역을 대상으로 물리적 기반의 준분포모형인 SWAT을 이용하여 새로운 온실가스 시나리오, RCP 기반의 유량 전망을 수행하였다. 비교 목적으로 선행연구와 같은 검·보정 기간을 사용하여 모형을 구축하여 유량을 전망함과 동시에, 신뢰성을 높이기 위하여 k-fold cross validation 기법을 이용하여 보정기간을 늘려 모형을 구축하여 유량을 전망하였다. 또한 본 연구의 결과와 선행 연구의 전망 결과를 비교·분석 해봄으로써 SWAT모형을 이용한 유량 전망 결과의 상이성의 정도와 그 요인에 대해 살펴보았다.

용담댐 유역에 대해 k-fold cross validation 기법을 이용하여 유량 전망을 실시한 결과, 총유출량은 baseline 대비 2040s, 2080s 기간에 RCP8.5 시나리오에서는 17.7%, 26.1% 증가, RCP4.5 시나리오의 경우에는 21.9%, 44.6% 증가하는 것으로 나타났다. RCP4.5 시나리오의 경우 총유출량 증가가 RCP8.5 시나리오의 경우보다 컸는데 이는 RCP8.5 시나리오를 적용할 경우 강수량의 증가는 더 적게 일어나지만 기온의 상승이 더 커서 증발산이 더 활발히 일어나기 때문이라고 볼 수 있다. 이러한 양상은 먼 미래로 갈수록 심화된다.

SWAT 모형을 이용하여 용담댐 유역의 유량을 전망한 결과 값은 연구 별로 그 결과 값이 매우 상이하였다. 유량 전망치의 경우, 최저 0.1%에서 최대 53.2% 유출량의 차이를 보였으며 baseline 대비 유량 변화율은 최저 0.1%에서 최대 22.8% 차이를 보였다. 특히 유량 전망치의 연구 결과별 차이는 SWAT 모형 구축과정이 크게 영향을 미치는 것으로 추정되었다. 반면, 과거기간 대비 미래 유량 값의 변화율에는 기후변화 시나리오의 차이가 모형 내에서 발생할 수 있는 차이보다 더 크게 영향을 미치는 것으로 추정되었다. SWAT 모형은 구축과정이 복잡하며 20여개의 많은 매개변수가 존재하여 사용자마다 모형을 구축하는 과정에서 차이가 많이 발생할 수 있다는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 RCP 기반의 기후변화 시나리오를 활용하여 유량 전망을 새롭게 생성하였다는데 의미가 있으며, 이를 과거 연구와 비교·분석함으로써 SWAT모형을 이용한 유량 전망 결과의 상이성의 요인에 대해 살펴봄으로써 향후 표준화된 유량 시나리오를 생성하기 위해 위한 기초자료로서 활용가치가 있을 것으로 사료된다. 또한 기후변화 시나리오에 대한 불확실성 평가에 비해 강우-유출모형으로 인한 불확실성 평가(Shin et al., 2013, 2015)는 상대적으로 연구가 미진하다. 기후변화 시나리오로 인한 불확실성이 유량 전망 결과에 지배적인 영향을 미치긴 하지만 모형 내에서 불확실성 또한 중요하다. 따라서 신뢰성 있는 유량 전망을 위해서 강우-유출모형에 대한 불확실성 평가와 이에 대한 요소를 분석하여 불확실성을 저감하려는 노력이 필요할 것이다.

감사의 글

이 논문은 한국환경정책평가연구원의 연구과제 “기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형 요소 기술 개발: 통합, 건강, 물관리 부문(과제번호 C314-00131-0407-0)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

Ahn, J.H., Yoo, C.S., and Yoon, Y.N. (2001). “An Analysis of Hydrologic Changes in Daechung Dam Basin Using GCM Simulation Results due to Global Warming.” *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 34, No. 4, pp. 335-345.

Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). “Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development1.” *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.

Chiew, F.H.S., Teng, J., Vaze, J., Post, D.A., Perraud, J.M., Kirono, D.G.C., and Viney, N.R. (2009). “Estimating Climate Change Impact on Runoff Across Southeast Australia: Method, Results, and Implications of the Modeling Method.” *Water Resources Research*, Vol. 45, No. 10.

Kang, D.H. (2007). *An Impact Assessment of Climate Change on Water Resources for the Geum River Basin*. M.S. dissertation, Seoul National University, Seoul, Korea.

Ministry of Science and Technology. (2004). *Sustainable Water Resources Research Program: Analysis and Modeling for Surface Water Hydrological Components: 21st Century Frontier R&D Program.*

Ministry of Science and Technology. (2007). *The 21st Century Frontier R&D Program: Sustainable Water Resources Research Program;Technology for Climate Change Impact Assessment on Water Resources.*

Ministry of Environment. (2006). *Settlement of Global and International Environmental Issue: Prediction and Impact Assessment of Water Cycle with Climate Change.*

Ministry of Education and Science Technology. (2010). *Development of Climate Change Impact Analysis and Evaluation System on Korean Water Resources.*

Minstry of Land, Infrastructure, and Transport. (2013). *Climate Change Assessment and Projection for Hydrology in Korea.*

No, S.-H., Jung, K.S., Park, J.H., and Ryoo, K.S. (2013). "Water Supply Change Outlook for Geum River Basin Considering RCP Climate Change Scenario." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 46, No. 5, pp. 505-517.

Park, J.H., Kwon, H.H., and No, S.-H. (2011). "Outlook of Discharge for Daecheong and Yongdam Dam Watershed Using A1B Climate Change Scenario Based RCM and SWAT Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 44, No. 12, pp. 929-940.

Park, J.-Y., Jung, H., Jang, C.-H., and Kim, S.J. (2014). "Assessing Climate Change Impact on Hydrological Components of Yongdam Dam Watershed Using RCP Emission Scenarios and SWAT Model." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 56, No. 3, pp. 19-29.

Shin, M.-J., Guillaume, J.H., Croke, B.F., and Jakeman, A.J. (2013). "Addressing Ten Questions about Conceptual Rainfall-runoff Models with Global Sensitivity Analyses in R." *Journal of Hydrology*, Vol. 503, pp. 135-152.

Shin, M.-J., Guillaume, J.H., Croke, B.F., and Jakeman, A.J. (2015). "A Review of Foundational Methods for Checking the Structural Identifiability of Models: Results for Rainfall-runoff." *Journal of Hydrology*, Vol. 520, pp. 1-16.

Vaze, J., Post, D.A., Chiew, F.H.S., Perraud, J.M., Viney, N.R., and Teng, J. (2010). "Climate Non-Stationarity-Validity of Calibrated Rainfall-Runoff Models for use in Climate Change Studies." *Journal of Hydrology,* Vol. 394, No. 3, pp. 447-457.

WAMIS. (http://www.wamis.go.kr)

paper number : 14-126
Received : 30 December 2014
Revised : 6 April 2015 / 12 April 2015
Accepted : 12 April 2015