

SWAT을 이용한 기후변화가 충주댐 및 조정지댐 저수량에 미치는 영향 평가

Assessment of Climate Change Impact on Storage Behavior of Chungju and the Regulation Dams Using SWAT Model

정 현 교* / 김 성 준** / 하 림***

Jeong, Hyeon Gyo / Kim, Seong-Joon / Ha, Rim

Abstract

This study is to evaluate the climate change impact on future storage behavior of Chungju dam ($2,750 \times 10^6 \text{ m}^3$) and the regulation dam ($30 \times 10^6 \text{ m}^3$) using SWAT (Soil Water Assessment Tool) model. Using 9 years data (2002~2010), the SWAT was calibrated and validated for streamflow at three locations with 0.73 average Nash-Sutcliffe model Efficiency (NSE) and for two reservoir water levels with 0.86 NSE respectively. For future evaluation, the HadCM3 of GCMs (General Circulation Models) data by scenarios of SRES (Special Report on Emission Scenarios) A2 and B1 of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) were adopted. The monthly temperature and precipitation data (2007~2099) were spatially corrected using 30 years (1977~2006, baseline period) of ground measured data through bias-correction, and temporally downscaled by Change Factor (CF) statistical method. For two periods; 2040s (2031~2050), 2080s (2071~2099), the future annual temperature were predicted to change $+0.9^\circ\text{C}$ in 2040s and $+4.0^\circ\text{C}$ in 2080s, and annual precipitation increased 9.6% in 2040s and 20.7% in 2080s respectively. The future watershed evapotranspiration increased up to 15.3% and the soil moisture decreased maximum 2.8% compared to baseline (2002~2010) condition. Under the future dam release condition of 9 years average (2002~2010) for each dam, the yearly dam inflow increased maximum 21.1% for most period except autumn. By the decrease of dam inflow in future autumn, the future dam storage could not recover to the full water level at the end of the year by the present dam release pattern. For the future flood and drought years, the temporal variation of dam storage became more unstable as it needs careful downward and upward management of dam storage respectively. Thus it is necessary to adjust the dam release pattern for climate change adaptation.

Keywords : dam operation, HadCM3 scenarios, SWAT, future dam inflow, dam storage

요 지

본 연구에서는 충주댐($2750 \times 10^6 \text{ m}^3$) 및 조정지댐($30 \times 10^6 \text{ m}^3$)을 포함한 유역을 대상으로 미래 기후변화가 댐 저수량에 미치는 영향을 분석하기 위해 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 활용하였다. 3지점의 9개년(2002~2010) 동안의 자료를 이용하여 검보정을 실시한 결과 유출량에 대해서는 Nash-Sutcliffe 모델 효율(NSE)이 0.73으로, 두 댐의

* 한강홍수통제소 하천정보센터 연구사 (e-mail: flood@korea.kr)
Researcher, River Information Center, Han River Flood Control Office

** 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr)
Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University

*** 교신저자, 건국대학교 사회환경시스템공학과, 박사과정 (e-mail: rim486@konkuk.ac.kr, Tel: 02-444-0186)

Corresponding Author, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, College of Life & Environmental Sciences, Konkuk Univ., 1 Hwayang-dong, Kwangjin-gu, Seoul 143-701, Korea

저수위에 대해서는 0.86으로 나타났다. 미래 기후변화 시나리오자료는 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 에서 제공하는 GCMs (General Circulation Models) 중 HadCM3 모델의 SRES (Special Report on Emission Scenarios)에 의한 B1과 A2 시나리오를 구축하였다. 미래 월별 기온과 강수량은 과거 30개년(1977~2006, baseline period) 자료는 편의보정(bias-correction) 기법을 이용하여 오차보정 후, Change Factor (CF) method를 이용하여 상세화 하였다. 미래 연평균 기온은 2040s (2031~2050)에 0.9℃, 2080s (2071~2099)에는 4.0℃까지 증가할 것으로 예측되었고, 연평균 강수량은 2040s에 9.6%, 2080s에 20.7% 증가하는 것으로 나타났다. 과거 대비 미래 증발산량은 15.3%까지 증가하고, 토양수분은 최대 2.8% 감소하였다. 과거 9개년 평균 댐 방류스케줄에 따른 미래 댐 연평균 유입량은 가을철을 제외한 대부분 기간에 최대 21.1%까지 증가하는 경향을 보였다. 미래 가을철 댐 유입의 감소로 인해 현재 방류 패턴으로는 연말까지 결국 저수량을 회복하지 못하는 것으로 나타났다. 미래 풍수년과 갈수년에는 댐 저수량의 시간적 변동이 더욱 불안정해지므로 각각 저수량의 상향 및 하향 조정에 주의를 기울여야 한다. 따라서 기후변화 적응을 위한 댐 방류 패턴 조절이 필요하다고 판단된다.

핵심용어 : 댐 운영, HadCM3 시나리오, SWAT, 미래 댐 유입량, 댐 저수량

1. 서 론

우리나라는 연중 강수량이 홍수기(6월말~9월초)에 집중되고, 지역적 편차가 심하여 안정적이고 효율적인 치수와 이수능은 더욱 강조되고 있다. 이러한 수자원의 시·공간적인 불균형을 보완해주기 위해 특히 댐을 이용하여 홍수기는 침투유량을 조절하고, 잉여수자원을 저류하여 갈수기의 용수부족을 보완하고 있다(Chung et al., 2010). 따라서 가용 수자원을 최대한 활용하여 충분한 용수분배를 하는 동시에, 홍수와 가뭄 등의 강도 및 발생빈도 증가로 이어지는 기후변화에 따른 대응방안 수립을 위해서도 다목적댐의 세밀한 운영은 매우 중요하다.

다양한 기후변화 관련 연구들 중에서도 홍수 및 가뭄 등 극한 상황에 대응하기 위해 댐 운영 및 관리방안을 제시한 연구는 꾸준히 이루어져 왔으나, 수시로 변하는 기후에 대해 정확한 예측을 하기란 쉽지 않다. 기존 기후변화 및 댐 모의 연구를 살펴보면, Park et al. (2007)은 SLURP 모형을 이용하여 저수지 모의 전과 후를 비교하는 연구를 수행한 바 있으며, 이어서 SWAT 모형을 이용하여 기후변화가 소양강댐 수자원에 미치는 영향을 평가하였다(Park et al., 2010). Park et al. (2009)은 SLURP 모형을 이용하여 CCCma CGCM2의 A2 및 B2 기후변화 시나리오에 따른 미래 농업용 저수지 거동을 예측하였다. Lee et al. (2008)은 농업용 저수지 운영을 고려하여 SWAT 모형을 활용한 연구를 발표하며 SWAT 모형에서의 저수지 모의 효과를 검증하였다. Lim et al. (2006)은 IPCC에서 제시하는 CCCma CGCM2의 모의 결과값과 미래 토지피복변화를 CA-Markov기법을 이용 SLURP 모형에 적용하여 소양강댐의 수문영향을 분석하였으며, Kwadijk and Rotmans (1995)는 GCM과

RHINFLOW를 연계하여 독일의 Rhine강 유역을 대상으로 기후변화에 따른 유출량을 평가한 바 있다. Park et al. (2009)은 충주댐 유역을 대상으로 SWAT 모형과 SRES A2, A1B, B1 기후변화 시나리오를 이용하여 댐 유역의 미래 수문 및 하천수질 변화를 전망하였고, Park et al. (2010)은 SLURP 모형 및 SRES A2, B2 시나리오를 활용하여 기후변화가 안성천유역 농업용 저수지 유입량 및 저수량에 미치는 기여도를 평가하는 등 기후변화에 따른 댐 또는 저수지 유역의 수문변동 및 저수량 변화 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 연구들에서 시도한 수문모형을 통한 댐 저수지 영향 평가 기법들은 실제 환경을 고려했다고 판단하기 어려운 간단한 입력자료를 활용하거나, 댐 모의 기능을 적극 활용했다고 보기에는 다소 부족하다고 판단되었다.

SWAT 모델 내의 댐(저수지) 모의 기능을 적극 활용하며, 기후변화 시나리오 영향 평가를 위해 본 연구에서는 충주댐을 포함한 충주조정지댐 상류유역(8245.6 km²)을

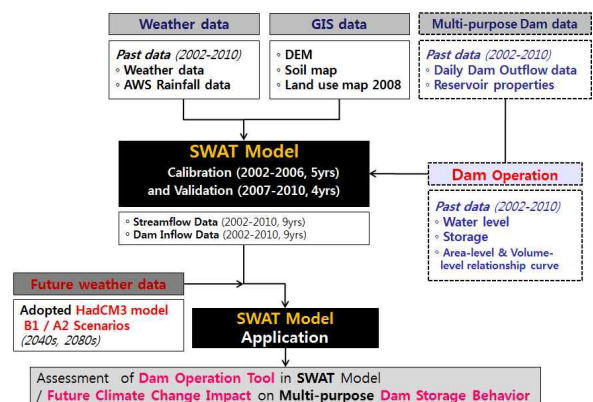


Fig. 1. The Flowchart of the Study Procedures

대상으로 HadCM3 SRES B1, A2 기후변화시나리오를 활용하였으며, 이에 따른 댐유역 수문변동이 댐 저수량에 미치는 영향을 평가하고자 하였다. 특히 댐 유입량, 저수량 방류량 자료를 이용한 모형의 검보정 후, SWAT모형에서의 저수지 물수지 모의기능의 활용성을 평가하고 미래 기후변화의 영향을 평가하는 기법을 제시하는데 목적이 있다.

2. SWAT 모형

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 물리적 기반의 준분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 수문부모형에서는 토양과 토지이용조건에 의해 결정되는 수문반응단위(Hydrologic Response Unit, HRU)로 SCS (Soil Conservation Service) 유출곡선법과 Green & Ampt 침투법을 이용하여 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 동역학적 저류모형(Kinematic Storage Model)을 이용한다. 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산한다. 잠재증발산량의 산정은 Hargreaves 방법, Priestley-Taylor 방법과 Penman-Monteith 방법을 이용하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritchie 방법을 이용한다.

SWAT 모형은 <http://www.brc.tamus.edu/swat/> 사이트에서 무료로 배포하고 있으며, 사용자의 편의를 위해 GUI (Graphic User Interface)를 제공하는 ArcView 기반의 AVSWAT (Ver. SWAT2000)과 ArcGIS 기반의 ArcSWAT (Ver. SWAT2009)을 제공하고 있다. 본 연구에서는 AVSWAT-X (Ver. 4.11) 버전을 이용하여 분석을 실시하였다.

SWAT 모형 내에서는 수문순환 예측을 위해 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표유출, 기저유출, 지하수 등에 대한 모의를 각 수문반응단위 별로 계산할 수 있다. SWAT 모형에서 사용하는 물수지 방정식은 Eq. (1)과 같다.

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

여기서, SW_t 는 최종의 토양수분량(mm), SW_0 은 i 일의 초기토양수분량(mm), t 는 시간(일), 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), Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량(mm) 이다.

SWAT에서는 저수지 모의를 위하여 아래와 같이 Emergency spillway 방류와 Principal spillway에서의 방류시 수위 및 수표면적을 바탕으로 저수량에 대한 수표 면

적을 다음과 같이 계산한다.

$$SA = \beta_{sa} \cdot V^{expsa} \quad (2)$$

$$expsa = \frac{\log_{10}(SA_{em}) - \log_{10}(SA_{pr})}{\log_{10}(V_{em}) - \log_{10}(V_{pr})} \quad (3)$$

$$\beta = \left(\frac{SA_{em}}{V_{em}}\right)^{expsa} \quad (4)$$

여기서, SA 는 수표면적(ha), V 는 저류된 물의 양(m^3), $expsa$ 는 멱지수이다. SWAT 모델에서는 주여수로와 비상여수로의 수표면적과 저수량의 알고 있는 기지점 두 개를 사용하여 수표면적과 저수량을 산정한다(Fig. 4). SA_{em} 은 비상여수로까지 채워졌을 때의 저수지 표면적, SA_{pr} 은 주여수로까지 채워졌을 때의 저수지 표면적, V_{em} 은 주여수로까지 채워졌을 때 저수지에 채워진 물의 양이다.

SWAT에서 저수량을 산정하는 물수지 방정식은 다음과 같다.

$$V = V_{stored} + V_{flowin} - V_{flowout} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (5)$$

여기서, V_{stored} 는 초기 저류량, V_{flowin} 은 하루 동안 유입량, $V_{flowout}$ 은 하루 동안 유출량이며, V_{pcp} , V_{evap} , V_{seep} 는 각각 하루 동안 강수량, 증발량, 침투로 손실된 물의 양이다. 또한 방류량 자료로는 일방류량, 월방류량, 평균 연방류율 또는 목표방류량을 입력 자료로 사용한다.

3. 자료 및 방법

3.1 대상 유역 개요

본 연구에서는 충주댐을 포함하는 충주조정지댐 상류 유역을 대상유역으로 선정하였다(Fig. 2). 행정구역상 강원도, 충청북도, 경상북도가 각각 69.9%, 28.4%, 1.7%를 차지하고 있는 충주댐 및 충주조정지댐 상류 유역은 지난 수십년 동안 벌채, 개간 등에 의한 산림의 변화, 도시개발, 단지 및 주거지 조성, 농경지정리, 밭 개간 등에 의한 토지이용의 변화, 논 내 비닐하우스 재배 등에 의한 물이용 형태의 변화 등 꾸준한 변화가 지속되어 왔다. 따라서 기후변화에 따른 수문순환체계의 변화는 충주댐 유역의 치수대책 및 하천정비계획에 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단된다. 충주댐 유역의 유역면적은 8245.6 km^2 이며, 유역평균표고는 542.8m (71.0~1537.0m), 유역평균경사는 36.9%로 국내 북동부 산악지역에 위치해있으며 산림면적은 5,573.1 km^2 로서 유역면적의 84.6%에 이른다. 상류의 평창강과 남한강이 합류하여 충주호로 흘러들며, 다목적댐인 충주댐

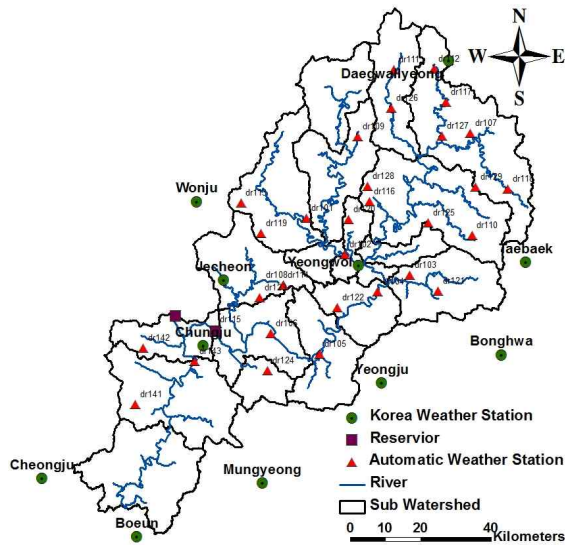


Fig. 2. The Study Watershed

은 생공용수, 관개용수, 하천유지용수를 위해 연간 3,380 백만톤의 용수를 공급하고 있다.

3.2 SWAT 모형 입력자료

3.2.1 기상 및 수문자료

SWAT 모형의 기상입력자료는 강우량, 온도, 풍속, 태양복사량 그리고 상대습도 자료를 이용하며 충주댐 유역의 관측소는 대관령, 원주, 영월, 충주, 청주, 태백, 제천, 보은, 봉화, 영주, 문경 총 11개의 기상관측소와 유역 내에 위치해있는 총 31개의 AWS (Automatic Weather System) 자료를 이용하였다. 본 연구에서 사용한 기상입력자료는 1999년부터 2010년까지의 총 12년간의 일자료이며 기상청으로부터 제공받았다.

기존의 수문모형을 활용한 유역 유출 모의연구는 주로 유역 최종 출구점에서의 실측 자료를 바탕으로 검보정을 수행하며, 유역 전체를 대표하여 매개변수를 선정한다. 그

러나 본 연구에 사용된 물리적 시반 분포형 모형 SWAT은 집중형 모형들과는 달리 각각의 소유역별, 반응단위 (HRU)별 매개변수의 정의 및 조정이 가능함에 따라 다지점(Multi-site) 검보정이 가능하다. 충주댐과 충주조정지댐 유역과 같이 대규모 유역의 경우, 다지점 검보정을 통해 모형 적용의 정확도를 더 높일 수 있다.

따라서 본 연구에서는 총 3개의 수문 관측 지점을 검보정 지점으로 선택 후, 총 19개의 소유역으로 구분하고 (Fig. 3(a)) 각각의 항목에 대한 모형의 보정 및 검증을 실시하였다. 실측자료는 충주댐(Chungju Dam, CJD)과 충주조정지댐(Chungju Regulation Dam, CJRD) 지점 및 남한강과 동강의 합류지점인 영월(Yeongwol, YW) 지점에 대하여 수자원공사에서 제공하는 댐 유입량 및 방류량 자료와 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)에서 제공하는 일별 유출량 자료를 사용하였다.

3.2.2 지형 및 공간자료

SWAT 모형에서 필요한 지형입력자료는 NGIS (National Geographic Information System)의 1:5,000 수치지도로부터 격자크기 100m로 제작한 DEM (Digital Elevation Model) (Fig. 3(b)), 토지이용도, 정밀토양도를 각각 100m 해상도로 제작하여 사용하였다. 토지이용도는 2008년 환경부에서 배포한 토지피복도를 이용하여 총 9개의 토지이용항목을 수역, 도심지, 나지, 초지, 논, 밭 그리고 활엽수림, 혼효림, 침엽수림으로 분류하였다(Fig. 3(c)). 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도(Fig. 3(d))를 이용하였으며, 토양층의 유효수분량, 포화수리진도도 등의 물리적 값들은 Saxton et al. (1986)의 결과를 토대로 SWAT에서 요구하는 형식의 토양 속성값(usersoil.dbf)을 부여하였다. 대상유역의 실측 자료 측정 지점과 하천 흐름을 고려한 소유역은 19개로 나누었으며, 최종 출구점 소유역 번호는 9번으로 충주조정지댐을 출구로 한다.

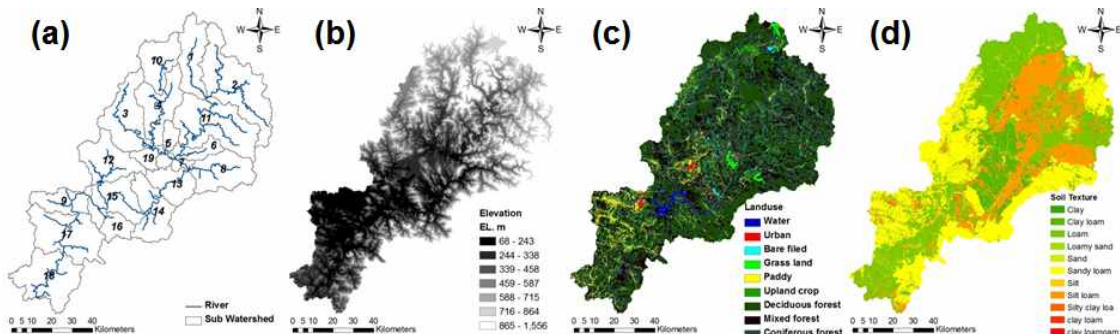


Fig. 3. The GIS Data of Watershed: (a) Subbasins, (b) Elevation, (c) Land Use in 2008, and (d) Soil Types

3.2.3 댐 수문자료

SWAT 모형에서의 방류량은 관측일유량, 관측월유량, 연 평균 방류율, 목표 방류량의 4가지 방법 중 하나를 이용하여 계산된다. 본 연구에서는 수자원공사 홈페이지에서 제공하는 물정보관 실시간 댐 수문자료를 이용하여 충주댐 및 충주조정지댐 일 방류량, 저수량 및 유입량 자료

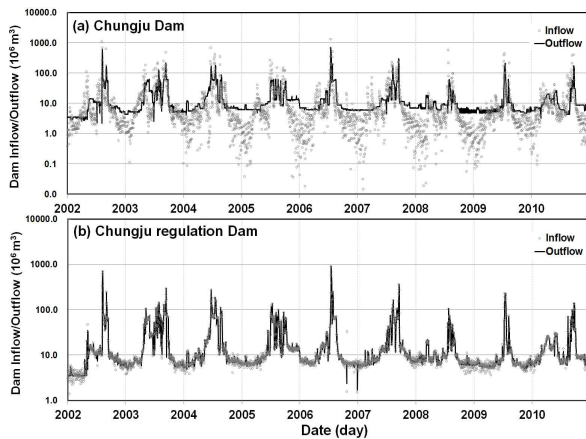


Fig. 4. Measured Dam Inflow/Outflow Data: (a) Chungju Dam and (b) Chungju Regulation Dam

Table 1. The GCM Data Adopted in This Study

Center /Model	Country	Publication	SRES Scenario	Number of Grid and Grid size	Data	
					Scale	Item
UKMO/ HadCM3	UK	AR4 (2007)	A2, B1	96(X)×73(Y) (3.7°×2.5°)	Monthly	1. Specific humidity (kg/kg) 2. Total precipitation (kg/m ² /s) 3. 2m surface air temperature (K) 4. Surface wind speed (m/s) 5. Shortwave radiation (W/m ²)

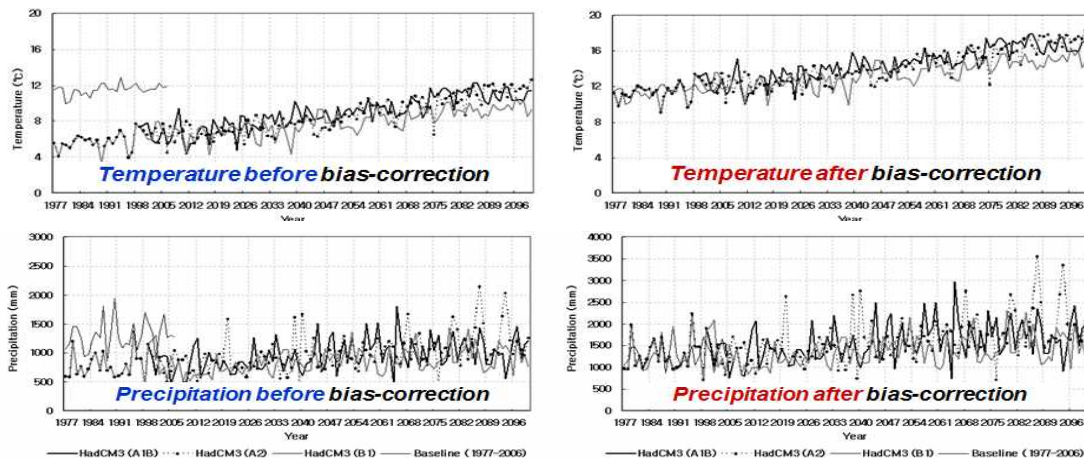


Fig. 5. Bias Corrected Annual Precipitation and Temperature of B1 and A2 Scenarios using the Output from HadCM3

를 구축하였다. 연구 기간인 2002~2010년 이외 SWAT 모형의 Warm-up 기간인 1999~2001년까지의 자료도 추가로 구축하였으며, SWAT 모형의 저수지 모의 및 보정에는 저수량 자료가 사용되었다.

3.3 기후변화시나리오

본 연구에서는 기후변화에 의한 영향 평가를 위해 2007년 IPCC SRES 4차보고서에서 제시한 GCMs 중 영국에서 개발된 UKMO (UK Met. Office) HadCM3 A2 및 B1 자료를 활용하였다(Table 1).

HadCM3는 월 자료로 제공되므로 Alcamo et al. (1997)이 제안한 편의보정(bias correction)결과, B1은 +5.70°C, A2는 +5.63°C로 온도보정 되었으며(Fig. 5), 강수량은 B1 1.62, A2 1.57 비율로 보정되었다. 공간 상세화과정으로 Change Factor (CF) Method (Diaz-nieto and Wilby (2005); Wilby and Harris (2006))를 적용하였다(Fig. 6). 본 연구에서는 충주댐 유역을 대상으로 지배관측소에 해당하는 총 11개의 관측소별로 강수량, 온도, 상대습도, 풍속의 6개 기상인자에 대하여 기준기간이 되는 과거 9년(2002~2010년) 동안의 월 평균값을 준비하고, 미래 기상자료로 B1과 A2

시나리오에 의한 2040s 및 2080s 각각의 월 평균값과의 차이를 Fig. 6에 나타내었다. 강수량은 특히 B1 시나리오에 의한 2080s에 20.7%로 크게 증가하며, 평균기온은 A2 시나리오에 따른 2080s에 최고 4.01°C 증가하는 것으로 예측되었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 댐운동을 고려한 SWAT 모형의 검·보정

본 연구에서는 모형의 보정을 위한 각 매개변수의 변화에 따른 모의치 반응을 알아보고자 각 최대값과 최소값은 중간값을 기준으로 ±값을 단계로 구분하여(개별 증

감) 유출량을 중심으로 모의하였으며, 그 결과 GWQMN과 GW_DELAY 변수가 가장 민감한 것으로 나타났다. 그 외 변수들은 default 값으로 분석하였다.

유출량에 대한 SWAT 모형의 보정과 검증은 공간적으로 최상류부터 순차적으로 실시하였다. 먼저, 충주댐 유역의 상류지점인 영월(YW) 지점에 대하여 먼저 보정한 후, 충주댐 유역(CJD) 유역 및 출구지점(CJRD)에 대하여 보정을 실시하였다. 모의기간은 모형의 Warm-up(1999~2001년)을 고려한 후 2002~2010년까지 9개년을 모의하였으며, 보정과 검증은 모의 기간에 맞춘 실측 일 유출량 자료를 이용하여 보정하였다. 보정방법은 민감도 분석을 통해 선택한 12개의 매개변수(Table 2)를 이용하여, 총 유

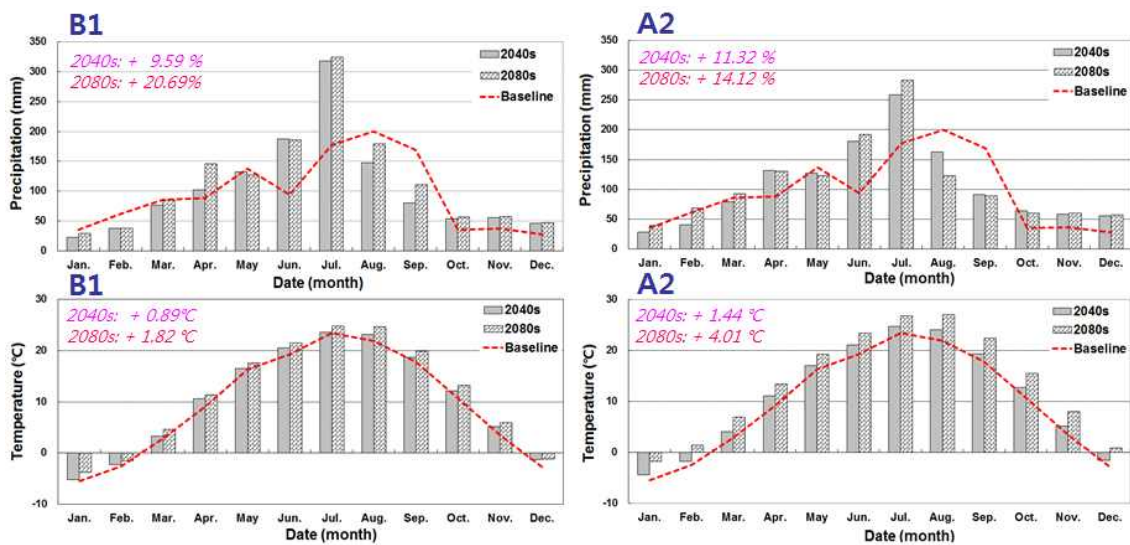


Fig. 6. Histogram of Degree Changes for Monthly Temperature and Percent Changes for Monthly Precipitation by CF Downsampling Method

Table 2. Calibrated Model Parameters at Three Subwatersheds

Parameters	Definition	Range	YW	CJD	CJRD
CN2	SCS runoff curve number	± 20%	-10 %	-5 %	-5 %
ALPHA_BF	Baseflow recession constant (days)	0-1	0.6	0.5	0.6
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm)	0-5000	250	250	250
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	0-500	40	50	100
GW_REVAP	Revap coefficient	0.02-0.2	0.02	0.02	0.2
REVAPMN	Threshold water level in shallow aquifer for revap (mm)	0-500	200	250	200
CH_N	Manning coefficient for channel	0.01-0.3	0.016	0.016	0.016
SFTMP	Snowfall temperature (°C)	0-5	5	5	5
SMTMP	Snowmelt base temperature (°C)	-25-25	0.5	0.5	0.5
SMFMX	Maximum melt rate for snow during the year (mm/°C-day)	0-10	1	1	1
SMFMN	Minimum melt rate for snow during the year (mm/°C-day)	0-10	4.5	4.5	4.5
TIMP	Snow pack temperature lag factor	0-1	1	1	1

출량을 기준으로 지표유출량과 침투 및 기저유출, 감수곡선 형태를 기준으로 보정을 실시하여 모형의 적용성을 평가하였다. 보정결과에 따른 모형의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적함수로는 결정계수(R^2)와 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 사용하였으며, 모형의 효율성 검증은 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율성계수(NSE)를 사용하였다.

Fig. 7은 보정 및 검증기간 동안의 각 지점별 실측치와 모의치의 수문곡선을 비교한 것으로, 상류의 영월(YW)지점의 유출량 모의결과 검증기간 동안의 RMSE는 3.3 mm/day, R^2 는 0.8, 그리고 NSE는 0.7로 분석되었으며, 가뭄년인 2008년에 유출 모의가 과대평가 된 것을 확인할 수 있었다. 충주댐의 경우 일별 댐 유입량 자료와 모의결과를 비교한 결과, 상류의 모형 오차가 다소 개선된 것으로 나타났다. 충주댐(CJD) 지점에 대해 보정 및 검증기간 동안의 NSE는 0.6으로 비교적 모의치가 실측치의 경향을

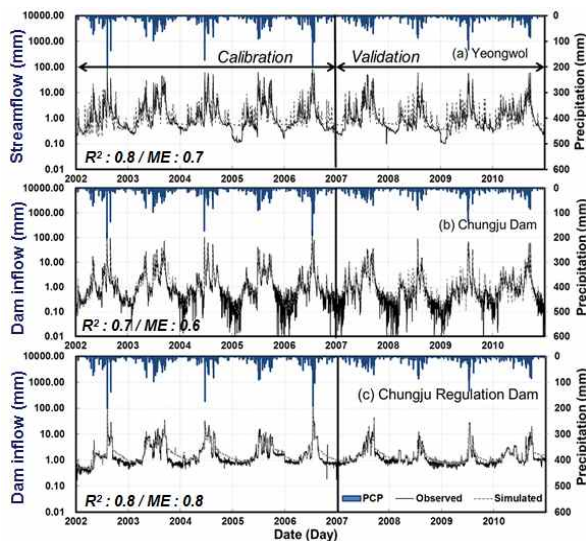


Fig. 7. The Observed Versus Simulated Streamflow Results of Model Calibration (2002–2006) and Validation (2007–2010)

잘 따르는 것으로 분석되었다. R^2 는 0.7의 높은 상관성을 보였으며, RMSE는 평균 4.9 mm/day로 나타났다. 충주조정지댐(CJRD)의 경우 RMSE는 1.8 mm/day, R^2 는 0.8, 그리고 NSE는 0.8로 상류에 비해 실측치 경향을 잘 반영하는 것으로 분석되었으나, 전체적으로 갈수기의 유출패턴을 제대로 표현하지 못하는 것으로 판단된다.

댐유역 유출 검토정에 이어 댐 저수위 자료를 이용한 검토정을 수행하였다. SWAT 모형에는 댐 관련 매개변수를 다음 Table 3과 같이 홍수위 만수위 저수표면적과 저수용량과 같은 자료를 한국수자원공사에서 제공받은 내용적 관계 곡선을 통해 입력 후, 보정을 완료하였다(Fig. 8). 그 결과, NSE는 충주댐은 0.8, 충주조정지댐은 0.7로, R^2 는 충주댐 0.9, 충주조정지댐은 0.8로 높은 상관성을 보이며 모의치가 실측치의 경향 잘 나타내었다. 따라서 SWAT 모델 내 저수지 모의 기능 활용도가 높을 것으로 판단된다.

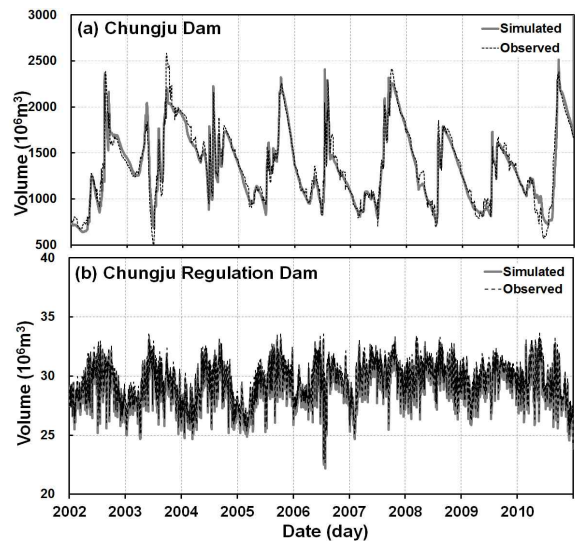


Fig. 8. The Observed Versus Simulated Dam Storage Results of Model Calibration (2002–2006) and Validation (2007–2010).

Table 3. Input Parameters for Reservoir Operation

Parameters	Definition	CJD	CJRD
IYRES	Year the reservoir became operational (year)	2002	2002
RES_ESA	Reservoir surface area when the reservoir is filled to the emergency spillway (ha)	9,634	1,194
RES_EVOL	Volume of water needed to fill the reservoir to the emergency spillway ($10^4 m^3$)	261,951	5,585
RES_PSA	Reservoir surface area when the reservoir is filled to the principal spillway(ha)	8,775	851
RES_PVOL	Volume of water needed to fill the reservoir to the principal spillway ($10^4 m^3$)	225,152	3,373
RES_VOL	Initial reservoir volume ($10^4 m^3$)	275,000	3,500
RES_K	Hydraulic conductivity of the reservoir bottom (mm/hr)	0.1	0.1

4.2 기후변화 시나리오에 따른 영향 평가

4.2.1 유역 수리수문 변화 분석

SWAT 모형의 검보정된 매개변수를 적용하여 기후변화에 따른 충주댐 유역의 수리수문 변동 양상을 분석하였다. B1과 A2 시나리오에 따른 강수와 온도의 증가는 충주댐 유역의 댐 유입량/유출량 및 저수량 등에 상당히 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 유역의 유출량에 대한 분석과 동시에 댐의 유입과 유출 및 저수량의 변화에 대해서도 각각 분석을 실시하였다. 유역의 총 유출은 유역 내 자연유출량과 방류량 등의 합으로 계산되어진다. 따라서 유역 총 유출, 증발산, 토양수분 변화 분석 후, 댐 유입량, 저수량 및 방류(유출)량을 추가 분석을 하였다.

Table 5에서 정리된 미래 유역 총 유출량은 과거에 비해 B1 시나리오에 의한 2040s에 871.97 mm에서 873.16 mm로 0.1% 증가할 것으로 나타났으며, 최고 A2 시나리오에 의한 2080s에 4.8%까지 증가할 것으로 예측되었다. 계절별로는 B1의 경우 2080s에는 봄과 여름에 감소하는 것으로 모의되었으나, 전체 유출은 과거에 비해 증가하는 것으로 나타났으며, A2의 경우 2040s에 봄, 가을, 겨울에 유출이 감소경향을 나타냈으나 여름 유출 증가율이 크게 나타나 총 유출은 약 1.8%정도 증가할 것으로 예측되었다.

유역의 유출과 함께 중요 분석 요소인 증발산량을 정리한 결과, 크게 눈에 띄는 결과는 A2에 의한 2080s 봄 증발산량이 다른 때에 비해 크게 증가하는 것을 확인할 수 있

다. 연 증발산 총량은 전체적으로 기준년도 369.19 mm에 비해 B1의 2040s에 374.82 mm로 1.5%, A2에 의한 2080s에는 425.67 mm까지 15.3%로 다소 크게 증가하였다. 계절별 증발산 비율은 전체적으로 봄과 여름에 14.07~45.20% 증가하나, 가을과 겨울에는 오히려 크게는 62.21%까지 감소하는 경향을 나타냈다. 겨울과 가을에 감소 경향에 비해 상대적으로 4~6월 증가량이 커서 총량은 증가할 것으로 예측되었다.

두 시나리오별 미래 유역 평균 토양수분 변화는 과거 14.3%에 비해 B1의 2040s에 11.4%로 2.85%감소할 것으로 나타났다. A2 시나리오에 2080s에는 12.21%로 2.06% 적은 량 감소 할 것으로 분석되었다. 계절별로는 전체적으로 봄과 겨울에 크게 감소하는 것으로 나타났으나, A2의 2040s와 B1의 2080s 가을에 다소 적은 증가율을 보였다.

4.2.2 댐 유입량 및 저수량 변화 분석

SWAT 모델에서는 방류패턴을 4가지(실측 일 방류량, 실측 월 방류량, 연평균방류비율, 계획방류량)로 구분하여 모의할 수 있다. 모형의 댐 검보정에는 2002년부터 2010년 기간 동안의 실측 일 방류량을 입력하여 댐 모의를 수행하였으나, 미래 댐 모의를 위해서는 과거 9개년 방류량의 평균값을 미래 계획방류량(Target release)으로 입력하여 조정되도록 하였다.

SWAT 모형 내의 방류 관련 매개변수 중 STARG에는 아래 Table 5에 제시한 바와 같이 계획 방류량(m³/s)을

Table 4. Summary of Future Predicted Seasonal Hydrologic Components Changes (in percentage) of the A2 and B1 Scenarios in the 2040s and 2080s.

Scenario	Outflow				Evapotranspiration				Soil moisture			
	2040s		2080s		2040s		2080s		2040s		2080s	
	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2
Spring (Mar-May)	-22.3	-33.5	+37.3	+40.0	+28.1	+45.2	+61.4	+43.7	-5.7	-5.5	-6.0	-3.0
Summer (Jun-Aug)	-5.2	+61.5	+41.7	+15.2	+29.9	+14.1	+11.4	+26.5	-1.0	-0.5	-1.2	-0.2
Autumn (Sep-Nov)	+2.3	-18.8	-53.7	-3.6	-31.6	-32.0	-27.1	-13.0	-0.6	0.6	1.0	-1.2
Winter (Dec-Feb)	+31.1	-40.5	+39.0	-33.8	-62.2	-17.6	-32.3	-6.8	-5.2	-4.2	-3.7	-3.3
Annual	+0.1	+1.8	+2.2	+4.8	+1.5	+4.4	+7.6	+15.3	-2.8	-2.1	-2.1	-1.8

Table 5. Monthly Target Release for Reservoir SWAT Model

Parameter	STARG (m ³ /s)											
Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CJD	88.5	78.7	97.6	135.6	217.8	403.4	1782.4	1549	1239.9	183.7	100.1	93.9
CJRD	97.3	101.9	123.3	196.8	230.7	632.4	1329.8	1416.5	1124.9	134.3	116.3	104.2

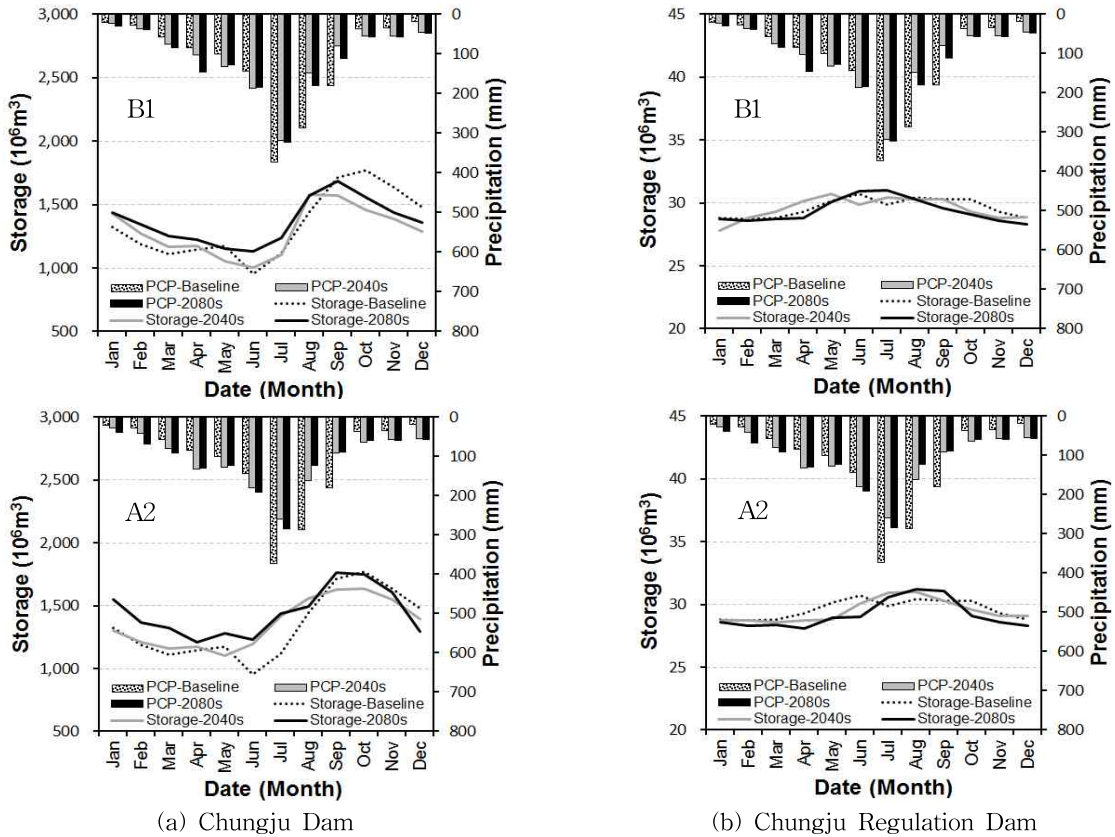


Fig. 9. The Future Predicted Dam Storage for 2040s and 2080s of B1 and A2 Scenarios

월별로 입력하도록 되어 있으며, 다음과 같은 값을 사용하였다.

SWAT 모델을 이용한 댐 모의 과거 방류 패턴과 미래 방류 패턴이 다르므로, 기후변화를 고려한 댐 모의 기준과 동일하기 위해 과거의 방류 패턴도 9개년 평균 계획방류량으로 입력 후 추가 모의하였다.

기후변화 시나리오 및 계획방류량에 따른 댐 모의 결과 미래 충주댐으로의 유입량은 B1 시나리오에 의한 2040s에 5.0% 증가 및 A2에 의한 2080s도 21.1%까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Table 6). 조정지댐의 경우 B1에 따른 2040s에 연평균 8.1% 증가를 보였으며, A2에 의한 2080s에 최고 20.0% 증가할 것으로 예측되었다. 이는 미래에 여름철 강수량이 최고 38.5%까지 증가하는 시나리오에 영향을 받은 것으로 판단된다.

충주댐 및 조정지댐의 월별 및 계절별 댐 저수량 변화를 분석한 결과, Table 6과 같이 대부분 증가경향을 보였으나, 충주댐의 경우 B1에 의한 2040s 저수량이 2.2%, 2080s에는 1.5% 감소하는 경향을 나타냈다. 미래에 충주댐유역 연평균 강수량이 B1에 의한 2040s에 9.6%, 2080s에는 20.7%까지 늘고, 연평균 유입량도 10.8%까지 늘었으나,

월별로 살펴보면 가을철 특히 감소하는 강수량과 유입량에 의해 줄어든 저수량이 결국 회복되지 못하고 총 저수량이 감소하는 결과를 보인 것으로 판단된다. 일별 극강우 빈도와 댐 방류량의 관계를 살펴보고자 과거 충주댐 유역의 2002~2010년 기간 동안 100 mm 이상 일강우량 빈도를 분석한 결과 7일 정도 관측되었으나, 미래에는 빈도가 2배 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 극한 기상조건에 의해 유입은 순간적으로 증가했으나, 감소시기에 줄어드는 등 월별 격차가 심해지는 미래에 지금처럼 저수량을 유지하기 위해서는 월별 적절한 방류조정이 필요할 것이다.

조정지댐의 경우 미래 댐 유입량 및 저수량이 전체적으로 증가하는 결과를 보였는데, B1에 의한 2040s 저수량이 0.2% 증가하였으며, A2에 의한 2080s에는 1.5%로 비교적 증가율이 더 높은 것으로 나타났다. 이 역시 유역에서의 미래 강수량의 증가 및 미래 방류량(유출량) 증가로 인한 조정지댐으로의 유입 증가가 저수량의 증가로 이어지며, 상류인 충주댐의 방류가 무효방류로 인해 과대방류 될 때 조정지댐의 유입 및 저수량도 함께 증가한 것으로 판단된다.

Table 6. The Future Possible Changes (in percentage) in Seasonal and Annual Dam Inflow and Storage for 2040s and 2080s of B1 and A2 Scenarios

Components	Dam Inflow				Dam Storage				
	Dam	CJD		CJRD		CJD		CJRD	
Scenario	B1	A2	B1	A2	B1	A2	B1	A2	
Spring									
2040s	+26.82	+46.53	+19.37	+38.92	+1.2	-0.3	-2.1	-2.4	
2080s	+35.26	+52.89	+22.9	+45.2	-5.6	-11.0	+0.7	+3.3	
Summer									
2040s	+3.42	+11.03	+4.96	+13.77	+4.7	+20.3	+0.4	-1.2	
2080s	+14.20	+17.54	+6.41	+17.47	+13.0	+20.4	-1.4	+0.1	
Autumn									
2040s	-4.24	-7.43	-7.10	-10.67	-13.8	-6.0	+1.6	+1.1	
2080s	-26.31	-12.56	-36.07	-17.95	-8.7	-0.1	+2.9	+1.2	
Winter									
2040s	+3.38	+5.01	+3.68	+6.30	-1.0	+1.6	+1.0	-0.2	
2080s	+5.24	+7.59	+7.50	+9.36	-4.5	-6.5	+0.9	+1.3	
Annual									
2040s	+5.0	+14.7	+8.1	+15.9	-2.2	+3.9	+0.2	+0.5	
2080s	+10.8	+21.1	+14.0	+20.0	-1.5	+0.7	+0.8	+1.5	

4.2.3 현재의 미래의 풍수년과 갈수년 댐 저수량 변화 분석

미래 2040s와 2080s 기간의 평균적인 특성을 자세히 살펴보고자 풍수기 및 갈수기로 예측되는 미래년도를 대상으로 현재의 갈수년과 풍수년과 비교분석하였다. 현재 및 미래 충주댐 및 조정지댐의 저수량 변동을 비교한 후, 갈수년은 풍수년 이후부터 다음 풍수년 이전까지이므로 갈수년에 대한 월별자료의 구축은 전 해 6월부터 12월까지와 다음 해 1월부터 5월까지로 정하였다.

과거 갈수년은 2008년에서 2009년 봄까지 이어지는 시기로, 극심한 가뭄 시기였다. 예측된 미래의 기상조건 및 수문 결과를 통하여 2040s 및 2080s 해당 기간 중에서의 갈수년을 선택하고 기준이 되는 과거 갈수년인 2008~2009년과의 저수량 변화를 비교 분석하였다. 충주댐의 경우 B1에 의한 2040s 갈수년에 해당하는 2031~2032년의 저수량은 과거에 비해 9.5% 감소하였으며 2080s 갈수기에 해당하는 2083~2084년은 18.6% 감소하는 것으로 나타났다. A2에 의한 2040s 갈수기에 해당하는 2037~2038년의 경우 17.5% 감소, 2080s 갈수기인 2088~2089년에는 20.4%로 크게 감소하는 것으로 분석되었다.

과거 풍수년은 2006년으로, 이 때 충주댐에서는 감당하기 어려운 홍수가 발생했었다. 따라서 2006년을 기준으로 한 B1에 따른 2080s 풍수년인 2044년의 경우에는 5.1%로 증가, 2080s의 2086년에는 과거 풍수년에 비해 저수량이 12.8% 증가할 것으로 예측되었다. A2에 의한 2080s 풍수년은 2046년으로, 저수량이 과거에 비해 11.5% 증가, 2080s 풍수년인 2086년에는 17.8% 증가할 것으로 나타났다.

조정지댐의 경우도 마찬가지로 과거 갈수년은 2008년에서 2009년 봄까지 이어지는 시기로, 극심한 가뭄 시기였다. B1에 의한 2040s 갈수년에 해당하는 2031~2032년의 경우 저수량은 과거에 비해 5.8% 감소하였으며, A2에 의한 2080s 갈수년에 해당하는 2037~2038년의 경우 9.5% 감소하는 것으로 분석되었다. 과거 풍수년 2006년을 기준으로 한 B1에 따른 2040s 풍수년인 2044년의 경우에는 3.1%로 증가 하는 것으로 나타났으며, A2에 의한 2080s 풍수년은 2046년으로, 저수량이 과거에 비해 5.7% 증가할 것으로 나타났다. 저수량의 변화는 충주댐에 비해 적은 양을 보였지만, 충주댐과는 월별로 다른 저수 특성을 가지므로 크게는 계절별로 미래 저수 및 방류량을 효과적으로 조절 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

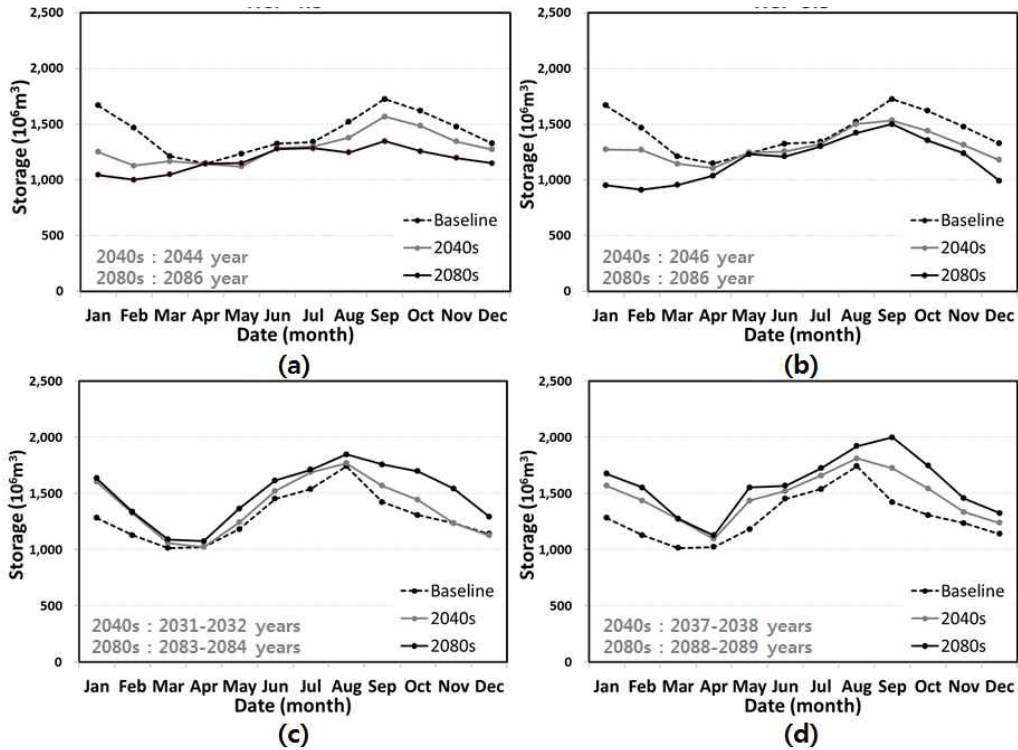


Fig. 10. The Future Predicted Chungju Dam Storage for 2040s Flood Year and 2080s Drought Year of B1 and A2 Scenarios: (a) Flood Year of B1, (b) Flood Year of A2, (c) Drought Year of B2, and (d) Drought Year of A2 Scenarios

5. 결 론

본 연구에서는 기후변화에 따른 미래 충주댐 및 조정지댐 유역(8245.6 km²)의 수문순환 변동 및 댐 저수량 거동 예측을 통해 댐 운영 방향성을 제시하고자 SWAT 모형 댐 모의 모듈을 활용하여 모형을 검보정(2002~2010년) 하였으며, HadCM3 모델의 B1과 A2 시나리오에 따른 미래 유출, 증발산, 토양수분 및 댐 유입량, 저수량 등에 대한 분석을 수행하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 연평균 온도는 기준년도인 2002~2010년에 비해 B1에 따른 2080s에 1.8℃, 크게는 A2의 2080s에 4.0℃까지 상승하는 것으로 나타났다. 연 평균 강수량은 20.7%까지 증가하며, 계절분석 결과 봄과 여름에 특히 증가추세를 보였다. 그러나 월별 편차가 심하여 B1과 A2에 의한 2040s의 8월에서 9월 강수량이 많게는 57.7% 감소하는 것으로 나타났다.
- 2) SWAT 모형을 활용하여 상류 1개 지점(YW)의 유출량과 유역 하류의 충주댐(CJD) 및 출구지점인 조정지댐(CJRD)의 저수량 자료를 통한 다지점 검보정 수행 결과, NSE는 0.61~0.82로 실측치 경향을 잘

반영하는 것으로 평가되었다. 또한 SWAT 댐 모의 매개변수(댐 제원, 홍수위/만수위 및 면적, 실측 방류량 등)를 이용하여 모형의 정확도를 높였다.

- 3) 미래 기후변화 시나리오 적용에 따른 수문모의 결과 유출량은 0.1~4.8% 증가하였으며, 증발산량은 1.5~15.3% 증가하였다. 토양수분은 반대로 1.8~2.8% 감소하는 것으로 나타났다. 댐 유입량은 충주댐 및 조정지댐 모두 5.0~21.1% 증가하였으나, 저수량은 충주댐에서 전체적으로 증가하는 경향을 보였으나, B1 시나리오에 의한 2040s, 2080s에는 반대로 2.2% 및 1.5% 감소하는 것으로 나타났다. 조정지댐은 전체적으로 0.2~1.5% 증가하는 경향을 보였다.
- 4) 현재와 미래의 갈수년과 풍수년에 대한 분석 결과 충주댐은 과거 갈수년에 비해 B1 및 A2 시나리오에 의한 저수량은 적게는 9.5%에서 20.4%까지 감소하는 것으로 나타났다. 미래 풍수년에는 갈수년과는 반대로 5.1%에서 17.8%까지 증가하는 것으로 분석되었다. 조정지댐의 경우도 마찬가지로 갈수년에는 5.8%에서 9.5%까지 충주댐보다는 적은 감소량을 보였고, 풍수년에는 3.1%에서 5.7%까지 증가하는 것으로 나타났다.

결과적으로 유역의 강수와 증발산량 등의 변화는 다목적댐의 유입량과 저수량에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 위에서 제시한 결과는 과거 9개년 평균 방류패턴을 미래에 적용했을 시 예측된 것이므로, 미래 각 년도별 패턴 및 유역 특성을 반영할 수 없으며, 충주댐 및 충주조성지댐만을 대표하여 분석하였으므로, 기타 다양한 유역 특성을 고려한 댐 유역의 미래 댐운영 기준을 제시하기에는 다소 무리가 있다. 그러나 평균 방류량 패턴이 동일하게 적용되었을 경우, 미래 기후변화에 따른 강수 변화 등으로 인해 나타난 결과를 통해 특히 가을과 겨울철 기상 및 수문 패턴에 따른 적절한 방류 조정이 필요할 수도 있을 것이다. 또한 과거에 비해 전반적으로 연 강수량 및 댐 유입량이 늘어날 것으로 예상되었음에도 불구하고 미래 8월부터 9월까지 크게 감소하는 강수량에 영향을 받아 저수량이 감소하는 결과를 초래할 수 있다. 이러한 예상 결과는 보다 정확한 예측을 위한 기초 연구로 의미가 있으며, 향후 다양한 기후변화 시나리오를 통해 더 많은 유역 특성을 고려한 다양한 댐유역의 월별, 계절별 및 특정 풍수기와 갈수기 저수량 변화 예측 및 극한상황 대비 기술 개발을 위한 자료로 충분히 활용 가능할 것이다. 이처럼 모델을 통한 미래 대응 예측 기술의 발전을 위해서는 실시간 정확도 높은 계측 및 부족, 과잉 저수량 확보 및 분배 관리가 충분히 이루어져야 하겠다.

감사의 글

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

References

- Alcamo, J., Döll, P., Kaspar, F., and Siebert, S. (1997). Global change and global scenarios of water use and availability: an application of WaterGAP 1.0. Report A9701, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, Germany.
- Chung, G.H., Ryu, G.H., and Kim, J.H. (2010). "Optimization of Multi-reservoir Operation considering Water Demand Uncertainty in the Han River Basin." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol. 10, No. 1, pp. 89-102.
- Diaz-nieto, J., and Wilby, R.L. (2005). "A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods impacts on low flows in the River Thames." *Climatic Change*, Vol. 69, pp. 245-268.
- Kwadijk, J., and Rotmans, J. (1995). "The impact of climate change on the discharge of the river. Rhine: a scenario study." *Climate Change*, Vol. 30, pp. 397-426.
- Lee, Y.J., Park, M.J., Park, K.W., and Kim, S.J. (2008). "Analysis of Hydrologic Behavior Including Agricultural Reservoir Operation using SWAT Model." *Journal of Korea Association of Geographic Information Studies*, KAGIS, Vol. 11, No. 1, pp. 20-30.
- Lim, H.J., Kwon, H.J., Bae, D.H., and Kim, S.J. (2006). "Analysis of Hydrological Impact using Climate Change Scenarios and the CA-Markov Technique on Soyonggang-dam watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 39, No. 5, pp. 453-466.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.E. (1970). "River flow forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Park, G.A., Ahn, S.R., Lee, Y.J., Shin, H.J., Park, M.J., and Kim, S.J. (2009). "Assessment Of Climate Change Impact On The Inflow And Outflow Of Two Agricultural Reservoirs In Korea." *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, ASABE, Vol. 52, No. 6, pp. 1869-1883.
- Park, G.A., Ahn, S.R., Park, M.J., and Kim, S.J. (2010). "Assessment of the Contribution of Weather, Vegetation and Land Use Change for Agricultural Reservoir and Stream Watershed using the SLURP model(II)-Calibration, Validation and Application of the Model-." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 30, No. 2B, pp. 121-135.
- Park, J.Y., Park, M.J., Ahn, S.R., and Kim, S.J. (2009). "Watershed Modeling for Assessing Climate Change Impact on Stream Water Quality of Chungju Dam Watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 42, No. 10, pp. 877-889.
- Park, M.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2007). "Analysis of Hydrologic Behavior of SLURP Model Including Agricultural Reservoir Operation." *Journal of the*

- Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 27, No. 5B, pp. 515-523.
- Park, M.J., Shin, H.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2010). "Assessment of future hydrological behavior of Soyanggang Dam watershed using SWAT." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 30, No. 4B, pp. 337-346.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., and Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 50, No. 4, pp. 1031-1036.
- Wilby, R.L., and Harris, I. (2006). "A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames." *Water Resources Research*, Vol. 42, pp. 1-10.

논문번호: 13-033	접수: 2013.03.08
수정일자: 2013.07.15/11.18	심사완료: 2013.11.18