



Water shortage assessment by applying future climate change for boryeong dam using SWAT

Kim, Won Jin^a · Jung, Chung Gil^{a*} · Kim, Jin Uk^a · Kim, Seong Joon^a

^aDepartment of Civil, Environmental and Plant Engineering, Konkuk University

Paper number: 18-063

Received: 4 August 2018; Revised: 4 October 2018 / 17 October 2018; Accepted: 17 October 2018

Abstract

In the study, the water shortage of Boryeong Dam watershed (163.6 km²) was evaluated under future climate change scenario. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used considering future dam release derived from multiple linear regression (MLR) analysis. The SWAT was calibrated and verified by using daily observed dam inflow and storage for 12 years (2005 to 2016) with average Nash-Sutcliffe efficiency of 0.59 and 0.91 respectively. The monthly dam release by 12 years MLR showed coefficient of determination (R²) of above 0.57. Among the 27 RCP 4.5 scenarios and 26 RCP 8.5 scenarios of GCM (General Circulation Model), the RCP 8.5 BCC-CSM1-1-M scenario was selected as future extreme drought scenario by analyzing SPI severity, duration, and the longest dry period. The scenario showed -23.6% change of yearly dam storage, and big changes of -34.0% and -24.1% for spring and winter dam storage during 2037~2047 period comparing with 2007~2016 period. Based on Runs theory of analyzing severity and magnitude, the future frequency of 5 to 10 years increased from 3 in 2007~2016 to 5 in 2037~2046 period. When considering the future shortened water shortage return period and the big decreases of winter and spring dam storage, a new dam operation rule from autumn is necessary for future possible water shortage condition.

Keywords: Boryeong dam, SWAT, Climate change, Water shortage, Dam release

SWAT을 이용한 기후변화에 따른 보령댐의 물부족 평가

김원진^a · 정충길^{a*} · 김진욱^a · 김성준^a

^a건국대학교 공과대학 사회환경플랜트공학과

요 지

본 연구에서는 보령댐 유역(163.6 km²)을 대상으로 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모델, GCM (General Circulation Model) 기후변화 시나리오와 다중회귀분석으로 산정한 미래 방류량을 활용하여 극한 기후변화 사상이 반영된 보령댐의 물부족을 평가하였다. 유역의 물수지 분석을 위해 보령댐 유역을 대상으로 기상자료, 보령댐 운영자료를 수집하였으며, SWAT 모형의 신뢰성 있는 유출량 보정을 위해 보령댐의 실제 방류량을 이용하여 댐 운영모의를 고려하였고 유입량 및 방류량 자료를 활용하여 모형의 보정(2007~2010)과 검증(2010~2016)을 실시하였다. 기후변화를 반영하기 위해 APCC의 26개 CMIP5 GCM 자료 중 RCP (Representative Concentration Pathway) 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 SPI와 극한 가뭄지수로 분석하여 RCP 8.5 BCC-CSM1-1-M을 극한 가뭄 시나리오로 선정하였다. 2005년부터 2016년까지의 일별 관측자료로 다중회귀분석하여 월별 방류량 추정식을 만들었고, 1월부터 12월까지 각 식들의 결정계수 R²는 0.57 이상으로 나타났다. 선정된 극한 가뭄 시나리오 기상자료를 방류량 추정식에 대입하여 미래기간 일별 방류량을 구축하였다. SWAT 수문평가 결과, S3 (2037~2046) 기간 봄철 저수량이 34.0% 감소하는 것으로 분석되었다. Runs 이론을 바탕으로 물부족의 심도를 구한 다음 재현기간에 따른 빈도해석을 하였다. 5~10년 빈도의 심도로 발생하는 물부족이 미래기간에 발생하는 빈도로 보령댐의 물부족을 평가하였다. 물부족 평가 결과, S3 (2037~2046) 기간에서 5~10년 빈도의 심도를 가지는 물부족이 기준기간(2007~2016) 보다 2회 더 발생하였으며 S3 (2037~2046)에 물부족 계획 수립이 필요하다고 판단하였다.

핵심용어: 보령댐 유역, SWAT, 기후변화, 물부족, 방류량

*Corresponding Author. Tel: +82-2-444-0186
E-mail: wjd0823@konkuk.ac.kr (C. G. Jung)

1. 서론

기후변화는 수문 순환 예측을 불확실하게 하며, 이수 및 치수를 기반으로 하는 수자원계획 수립에 어려움을 증가시킨다. 또한 지구온난화로 인한 기후변화로 한반도 및 전 세계적으로 집중호우, 돌발홍수, 극한가뭄 등 자연재해가 발생하여 피해가 증가하고, 대규모 인적피해와 경제적 손실을 가져오고, 그 규모와 피해액은 꾸준히 증가하는 추세이다(KMA, 2012).

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 제 5차 평가보고서(IPCC, 2014)는 현재와 같은 증가추세로 온실가스가 발생할 경우, 지구 평균 기온은 2100년 최대 4.8°C, 해수면은 90 cm 증가할 것이라고 전망하였으며, 우리나라는 RCP 8.5 시나리오 기준 2100년에는 평균 6°C, 강수량 20.4% 및 해수면 78 cm의 증가를 보여 평균 기온과 평균 강수량의 경우 전 지구 평균보다 크게 증가하는 것으로 전망하였다. 이러한 문제의 심각성을 인지하고 기후변화에 적응하기 위한 구조적/비구조적 방법을 마련해야 한다.

다목적댐 및 저수지의 용수공급능력을 분석한 연구는 많이 제시되어 왔다. Park *et al.* (1999)은 다목적댐의 유입량자료를 이용하여 용수공급능력을 평가하고자 Runs 이론에 따라 빈도개념의 가뭄심도를 추정하였고, Ahn *et al.* (2009)은 소규모 저수지의 저류량과 용수공급능력 결정을 위해 천이확률행렬법 및 모의발생방법, 선형계획법을 적용하여 각 방법에 따른 용수공급량을 비교·검토했고 그 결과 모의발생방법이 합리적인 것으로 제시하였으며, Cossins *et al.* (1977)은

Moran의 행렬확률이론을 확장하여 개별 저수지의 용수공급능력을 산정하고 이를 누계하여 시스템 전체의 용수공급능력을 산정하였다.

SWAT 모델을 사용하여 기후변화가 댐 유역의 수자원에 미치는 영향을 분석한 연구의 예로 Jeong *et al.* (2013)은 SWAT 모형을 이용하여 기후변화가 충주댐 유역의 저수량에 미치는 영향을 연구였고, 여름기간에는 유입량이 감소하고 계절변동성으로 전체적으로 연간 댐 유입량이 증가할 것으로 예상하였다. Park *et al.* (2014)은 RCP 기후변화 시나리오와 SWAT 모형을 이용하여 기후변화가 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향을 분석한 결과 강수량의 증가에 따라 하천유출량이 증가하여 물순환 건전성을 확보하고 물 부족의 해소가 있을 것으로 전망하였다.

기존 연구에서 시도한 수문모형을 활용한 댐 저수지 영향평가 기법들은 간단한 입력자료를 사용하여 실제 환경을 고려했다고 보기 힘들어 댐 모의 기능이 다소 부족하다고 판단하였다. 또한, 기후변화를 반영하는 기존 연구에서 저수량 검·보정 결과로 얻은 일별 방류량을 연속적으로 입력하여 사용하였으나, 이는 기상·수문 환경에 따라 변화하는 방류량을 예측하였다고 보기 힘들다. 본 연구에서는 위 제한점들을 보완하는 방법으로 관측자료를 바탕으로 검·보정을 실시한 SWAT 모델, 다중회귀분석으로 산정한 미래 방류량, 표준강수지수와 극한 가뭄지수를 이용하여 선정된 극한 가뭄시나리오를 기반으로 용수공급능력을 고려한 기후변화를 적용한 저수지의 물부족을 평가하였다(Fig. 1).

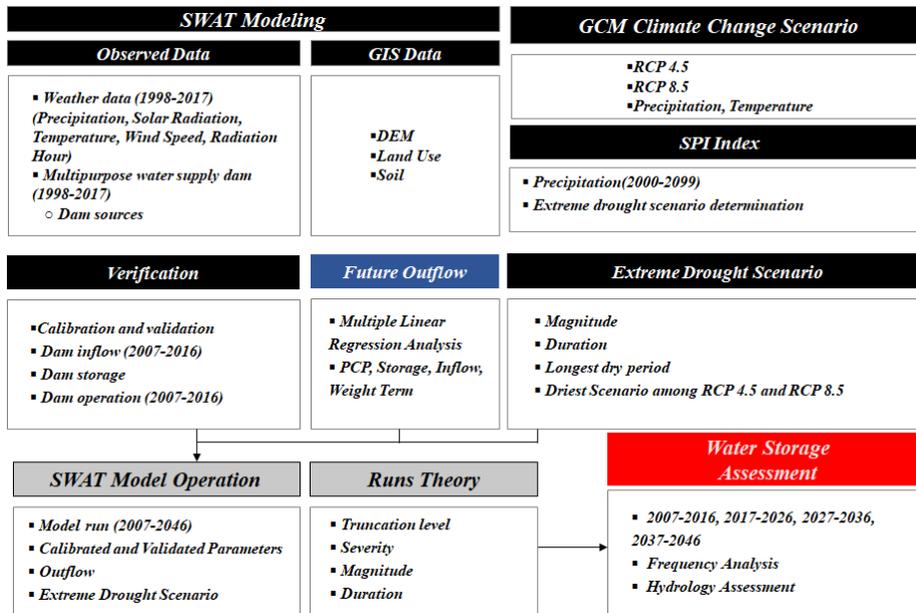


Fig. 1. Flow chart

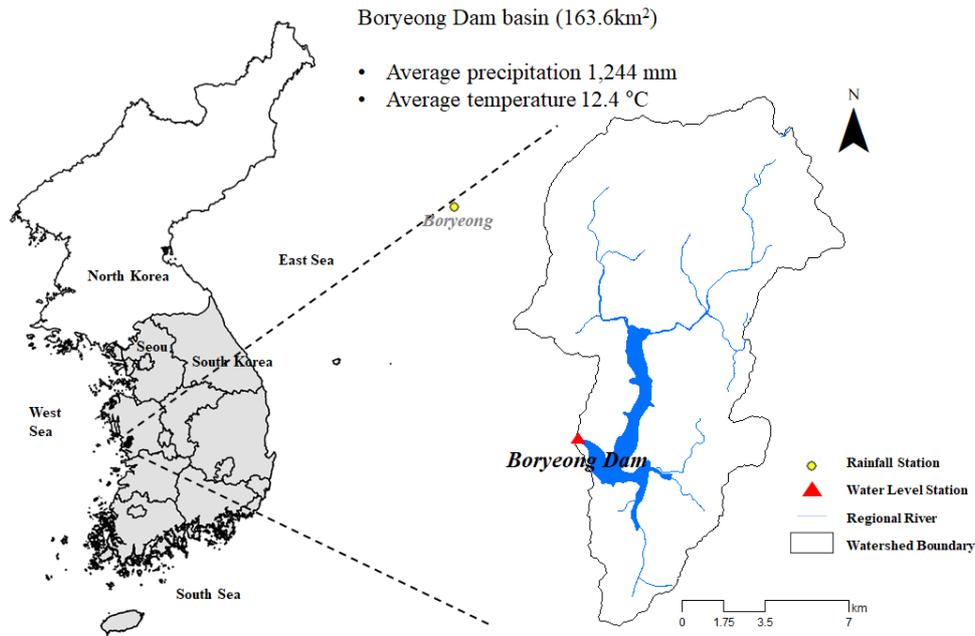


Fig. 2. Boryeong dam watershed information

2. 재료 및 방법

2.1 대상지역

본 연구의 대상지역은 충청남도 보령시 미산면에 위치한 보령지역으로 유역면적은 163.6 km²이다. 금강과는 별도의 하천인 웅천천이 흐르고 있으며 30년(1976-2005)간 유역의 연평균 강우량은 1,244 mm이고, 연평균 기온은 12.4°C이다. 인근에 보령, 부여, 군산 기상관측소가 위치하고 있으나, 부여와 군산은 상대적으로 거리가 있어 보령 기상관측소의 기상자료가 지배적으로 작용한다. 유역 내에는 다목적댐인 보령댐(BRD)이 운영되고 있다. Fig. 2는 보령댐 유역의 기상/수문 관측소 현황 및 SWAT 모형에 적용 가능하도록 분할한 소유역을 나타내었다. 2014-2015년 극심한 가뭄을 겪으며 충남 지역의 보령강우관측소의 경우 연강수량이 각각 1010 mm(예년대비 81.2%), 785 mm(예년대비 63.1%)까지 줄어들고 보령댐의 저수율이 20% 밑으로 떨어지면서 보령댐 하류 지역의 주민들은 용수공급 피해를 겪었다. 기후변화의 영향으로 이상기후가 지속적으로 발생하는 현 시점에서 이상기후에 취약함을 보이고 있는 보령댐은 물부족 평가가 필요하다.

2.2 SWAT 모형의 개요

SWAT (Soil and Water Assessment Tool)은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준 분포형 모

형이다. 이 모형은 물리적 기반의 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(HRUs, Hydrologic Response Units) 별로 계산할 수 있다(Arnold et al., 1996). SWAT 모형에서 일별 유출량은 SCS (Soil Conservation Service) CN (Curve Number) 방법을 통하여 산정하며, 측방유입량은 Kinematic Storage Model을 이용하고 침투는 10개 이하의 층으로 나누어 선형 저수량 추적기법을 이용하여 계산한다. 잠재증발산량의 산정에는 Penman-Monteith 방법을 이용하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritchie 방법을 이용한다. SWAT모형에서 사용되는 물수지 방정식은 Eq. (1)과 같다 (Neitsch et al., 2001).

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

여기서 SW_t 는 최종 토양수분량(mmH₂O), SW_0 는 i 일의 초기 토양수분량(mmH₂O), t 는 시간(일), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량(mm), W_{seep} 는 i 일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mmH₂O), E_a 는 i 일의 증발산량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량(mmH₂O)이다.

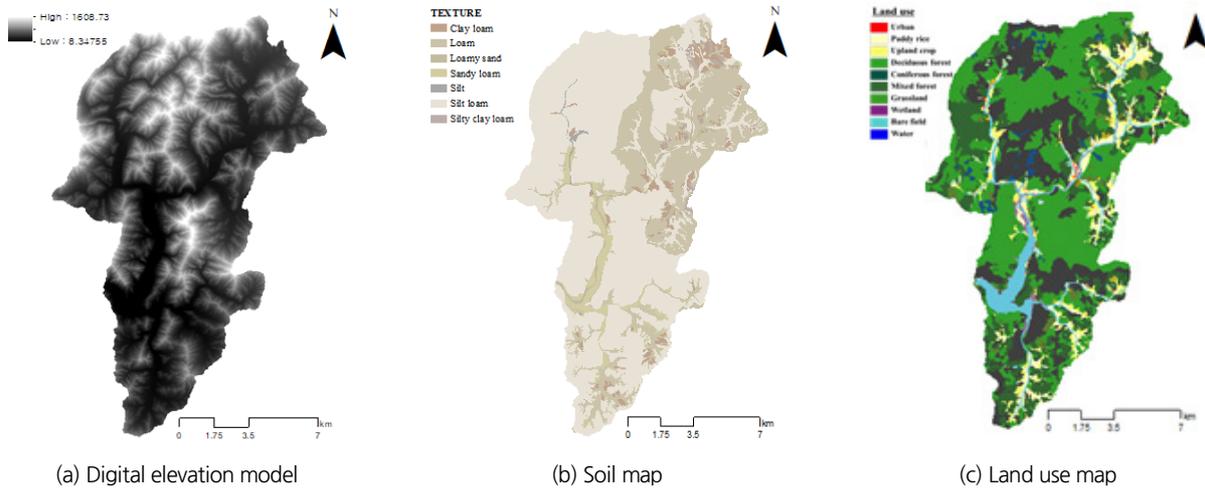


Fig. 3. GIS Data for SWAT model

2.3 SWAT 모형 입력자료

2.3.1 GIS자료 및 기상·수문자료

SWAT 모형의 GIS 공간자료로 DEM (Digital Elevation Model)과 토양도는 국가수자원관리종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)의 해상도 30 m × 30 m DEM (Fig. 3(a)), 1:25,000 정밀도토양도 (Fig. 3(b))를 사용하였다. 토지이용도는 환경부의 2008년 중분류 자료를 활용하여 나타내었다(Fig. 3(c)).

기상입력자료는 기상청(KMA)에서 제공하는 강우량(mm), 최고, 최저온도(℃), 풍속(m/sec), 태양복사량(MJ/m²), 상대 습도(%)자료를 이용하였으며 보령댐 유역의 보령, 군산, 부여 기상관측소의 12년(2005-2016)간의 일자료를 사용하였다. 같은 기간의 보령댐 일별 댐 유입량과 저수량 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 실시간 댐 수문자료를 이용하여 구축하였다.

2.3.2 미래 방류량

SWAT모형의 검·보정 과정에서 국가수자원관리종합정보시스템에서 제공하는 보령댐의 일별 방류량 관측자료를 사용하였다. 미래 기상 시나리오를 적용한 보령댐의 미래 물부족을 평가하는 본 연구에서 일별 방류량 자료가 존재하지 않는 미래 기간의 방류량을 예측하는 작업이 필요했다. 방류량에 영향을 미치는 요소들을 다중회귀분석(multiple regression analysis)하여 월별 방류량 추정식을 산정하였고, 식에 일별 기상·수문자료를 입력하여 일별 방류량을 계산하였다.

두 개 이상의 독립변수가 포함된 회귀모형을 다중회귀 모형이라 하며, 다중회귀 모형을 일반식으로 나타내면 Eq. (2)과 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n \tag{2}$$

Eq. (2)에서, β_i 는 x_i 를 제외한 나머지 변수가 종속변수에 미치는 효과를 제거한 후에 변수 x_i 의 증분에 따른 종속변수 y 의 순수한 증분을 나타낸다. n 개의 독립변수 $x_i(i = 1, 2, \dots, n)$ 에 대한 관측치를 종속변수 y 라 하며, x_n 은 독립변수를 나타낸다.

본 연구에서 종속변수 y 는 방류량, 독립변수 x_n 는 방류량에 영향을 주는 다섯 가지 항목, 일별 강우량, 월별 평균 저수량, 일별 유입량, 그리고 계절별로 편차가 큰 강우량과 유입량을 고려하여 일정 기준치를 초과할 경우 가중치를 주는 항이다.

2.4 기후변화 시나리오

미래 기후변화 전망자료를 제시하는 방법으로 APEC으로부터 제공받은 세계기후연구프로그램의 결합모델상호비교사업(CMIP5; Coupled Model Intercomparison Project) GCM (General Circulation Model)자료 중 RCP 4.5 시나리오 27개와 RCP 8.5 시나리오 26개를 활용하여 SPI (Standardized Precipitation Index)를 계산하였고, SPI로 표현할 수 있는 극한 가뭄 지수를 계산 및 비교하여 극한가뭄 시나리오를 선정하였다.

2.4.1 SPI

McKee *et al.* (1993)은 강수량이 감소하면 물수요와 비교하여 상대적인 물부족이 발생하며, 가뭄 발생의 발단이 됨을 바탕으로 SPI를 개발하였다. SPI는 특정한 시간에 대한 계산 시간단위를 1, 3, 6, 9, 12, 24개월로 설정하고, 시간단위 별 강수 부족량을 산정하여 개개의 용수공급원이 가뭄에 미치는 영향을 산정하는 방법으로, 사용자의 설정에 따라 다양한 시

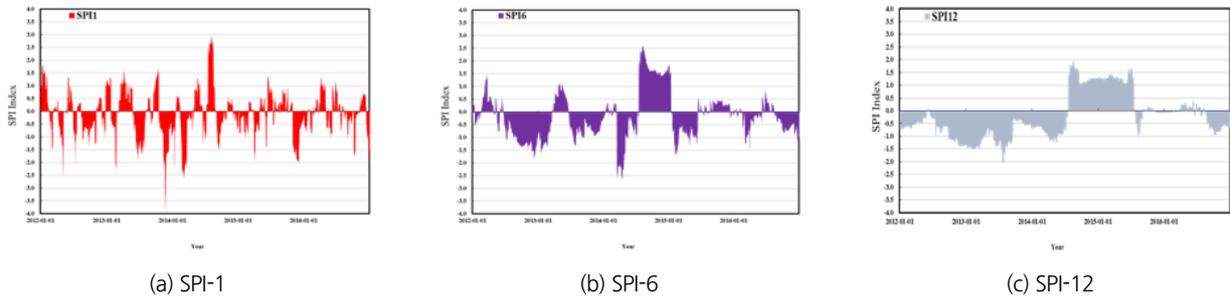


Fig. 4. Standardized precipitation Index for 1, 6, 12 months-duration

간척도에 대해 계산할 수 있어 다른 가뭄지수들보다 통계적으로 일관성이 있으면서 시기에 따라 장·단기적으로 가뭄의 영향을 표현할 수 있는 장점이 있다(Yoon *et al.*, 2016).

Fig. 4는 임의의 시나리오를 대상으로 1개월, 6개월, 9개월을 시간적으로 선택하여 계산한 SPI 자료이다. 1개월의 지속기간을 가지는 SPI-1의 경우 날카로운 형태를 보이며 단기적인 가뭄을 잘 표현하고, 12개월의 지속기간을 가지는 SPI-12의 경우 넓은 패턴을 보이며 장기적인 가뭄을 잘 표현하였다. 따라서 극한 가뭄 시나리오를 선정하는 기준으로 6개월의 지속기간을 가지며 단기적인 가뭄과 장기적인 가뭄을 동시에 구현할 수 있는 SPI-6이 가장 적합하다고 판단하였다.

McKee *et al.* (1993)은 SPI 결과로 얻는 가뭄강도를 정의하기 위하여 Table 1의 분류체계를 사용하였다. Table 1은 SPI의 값에 따라서 7가지 범위로 수분 상태를 구분한다. 그리고 그 중 SPI가 -1.5 이하로 내려가는 경우를 심한 가뭄(Severely Dry)으로 분류하였다. 이를 토대로 이번 연구에서 미래 기상 시나리오 가운데 극한 가뭄 시나리오를 선정하는 과정에서 가뭄이 시작된다고 판단하는 극한 가뭄지수의 기준을 -1.5로 설정하였다.

2.4.2 극한 가뭄 시나리오

본 연구에서 미래 기후변화를 반영하며 보수적인 결과를 얻는 방법으로 GCM 시나리오 중 가장 가뭄이 심하다고 판단

되는 극한 가뭄 시나리오를 선정하는 방법을 택하였다. 극한 가뭄 시나리오 선정에 사용된 가뭄지수는 Magnitude(강도), Duration(가뭄 일수), Longest Dry Period(최대 가뭄 지속일수), 3가지이다. Magnitude는 SPI-6이 기준 이하인 총 면적, 즉 심한 가뭄에 해당하는 SPI의 총 합으로 가뭄이 강한 정도를 표현한다. Duration은 SPI가 기준 이하로 내려가는 총 일수, Longest Dry Period는 기간 내 SPI가 기준 이하를 유지하는 최대 지속일수이다.

시나리오 별로 극한 가뭄 지수인 강도, 가뭄 일수, 최대 가뭄 지속일수의 평균과 편차가 상이하어 지수별 평균으로 각 시나리오마다 지수별 편차를 구하고 그 합이 클수록 가뭄 심도가 크다고 판단하여 가뭄심도의 순위를 정하는 방법을 사용하였다.

결과적으로, 27개의 RCP 4.5 시나리오와 26개의 RCP 8.5 시나리오 중 순위가 가장 높은 RCP 8.5 BCC-CSM1-1-M을 극한 가뭄 시나리오로 선정하였으며, 이 시나리오를 활용하여 물부족 평가를 실시하였다.

2.5 보령댐의 물부족 평가

보령댐의 물부족을 평가하는 방법으로 용수공급의 부족 상황을 세 가지의 지수로 나타내는 Runs 이론을 사용하였다. Runs 이론의 세 가지 지수는 심도(S; severity), 지속기간(D; duration), 규모(M; magnitude)로 심도는 기준수위에 대한 음의 부분의 총합을 나타내고, 지속기간은 저수량이 기준수위 아래로 내려가는 시점부터 다시 올라오는 시점까지의 총 일수이다. 그리고 규모는 심도를 지속기간으로 나눈 값이다. 기준수위(truncation level)는 기준기간의 일별 저수량 하위 10%로 표현하였는데, 이는 농업용 저수지 설계기준상 최소 이수안전도가 90%이기 때문이다(MAF, 2002). 물부족의 기준은 미래시기의 저수량이 기준수위 이하로 내려가는 시점부터 회복될 때로 정의하였다. Eqs. (3)~(5)는 심도, 지속기간, 규모를 표현한 식이며, SRS (Shortage of Reservoir Storage)는 기준수위에서 저수량을 뺀 값이다.

Table 1. Dry/Wet condition classification

SPI Range	Condition
2.00 or more	Extremely Wet
1.50 ~ 1.99	Very Wet
1.00 ~ 1.49	Moderately Wet
-0.99 ~ 0.99	Near Normal
-1.00 ~ -1.49	Moderately Dry
-1.50 ~ -1.99	Severely dry
-2.00 or less	Extremely Dry

$$S(10^6 m^3 \times day) = \sum_{i=start}^{end} SRS_i \quad (3)$$

$$D(day) = end\ day - start\ day$$

$$(storage < truncation \leq vel) \quad (4)$$

$$M = S/D \quad (5)$$

평가기간 동안 저수량이 기준수위 보다 작은 경우 물부족이 시작되었다고 판단하였다. 이와 같은 경우를 가뭄이라 정의하는 것은 옳지 않다고 판단하여 저수량이 기준수위보다 낮은 기간에 해당하는 10개의 초과치계열 자료를 이용하여 빈도 해석 하였다. 빈도해석은 모의된 기준기간(2007~2016) 강도를 재현기간에 따라 분류하여 해석하였으며, Gumbel 확률분포형을 사용하고, Anderson Darling, Kolmogorov-Smirnov (K-S) 검정 등을 통해 분포의 적합성을 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 댐 운영을 고려한 SWAT모형의 검·보정

Table 2는 검·보정이 끝난 모델의 매개변수 값을 나타낸 표이며, Tables 3 and 4는 모형의 보정 및 검증 결과 통계값을

연도별로 정리한 표로, 연도별 강수량, 유입량, 유입률, 저수량, 저수율, 결정계수 그리고 각 값의 검·보정 전체기간에 대한 평균값을 제시하였다. 댐 유입량과 저수량은 평균

Table 2. Adjusted value of model paramters

Parameters	Range	Adjusted value
Surface runoff		
CN2	35 to 98	+10
Evapotranspiration		
ESCO	0 to 1	0.4
CANMX	0 to 100	11
Lateral flow		
SLSOIL	0 to 150	0
LAT_TIME	0 to 180	7
Groundwater		
GW_DELAY	0 to 500	100
ALPHA_BF	0 to 1	0.6
Reservoir		
RES_ESA	-	690
RES_EVOL	-	11335.5
RES_PSA	-	672
RES_PVOL	-	10693.3
RES_VOL	-	8997.8
RES_K	0 to 1	0.7
EVRSV	0 to 1	0.7

Table 3. Results of SWAT model calibration and validation for dam inflow

Year	Precipitation (mm)	Dam Inflow (mm)		Dam Inflow rate (%)		R ²	RMSE (mm/day)	NSE
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.			
2005	1,628.3	1,096.2	983.1	67.3	60.4	0.83	2.04	0.62
2006	1,105	674.1	656.9	61.0	59.4	0.85	0.96	0.53
2007	1,510.7	907.8	1,006.3	60.1	66.6	0.73	1.93	0.53
2008	919.6	374.5	614.4	40.7	66.8	0.87	2.75	0.71
2009	1,233.4	575.9	791.4	46.7	64.2	0.75	2.64	0.55
2010	1,486.8	984.6	1,263.0	66.2	84.9	0.68	2.92	0.18
2011	1,971.6	1,517.7	1,535.8	77.0	77.9	0.87	0.98	0.73
2012	1,588.6	881.6	1,025.1	55.5	64.5	0.91	2.24	0.83
2013	1,338.6	663.2	1,128.2	49.5	84.3	0.84	3.59	0.68
2014	1,089.1	501.9	717.2	46.1	65.9	0.83	2.64	0.63
2015	1,022.8	400.3	526.0	39.1	51.4	0.81	2.12	0.59
2016	1,086.5	503.3	550.4	46.3	50.7	0.86	1.43	0.70
2017	989.4	534.3	557.2	54.0	56.3	0.79	1.07	0.42
AVG	1,262.07	700.28	784.47	53.75	61.25	0.82	2.10	0.59

R² : Coefficient of determination

NSE : Nash and Sutcliffe model efficiency

RMSE : Root Mean Square Error

Table 4. Results of SWAT model calibration and validation for dam storage

Year	Precipitation (mm)	Dam storage (10^6 m^3)		Dam storage rate (%)		R^2	RMSE ($10^6 \text{ m}^3/\text{day}$)	NSE
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.			
2005	1,628.3	65.4	63.3	4.0	3.9	0.85	0.41	0.98
2006	1,105	53.7	52.4	4.9	4.7	0.60	0.34	0.98
2007	1,510.7	51.0	50.9	3.4	3.4	0.99	0.09	0.99
2008	919.6	62.5	68.3	6.8	7.4	0.99	0.62	0.99
2009	1,233.4	42.7	56.0	3.5	4.5	0.94	0.86	0.89
2010	1,486.8	64.2	88.3	4.3	5.9	0.95	1.10	0.86
2011	1,971.6	69.9	74.2	3.5	3.8	0.81	0.55	0.90
2012	1,588.6	58.8	61.1	3.7	3.8	0.99	0.43	0.99
2013	1,338.6	76.6	74.7	5.7	5.6	0.89	0.40	1.00
2014	1,089.1	50.3	55.3	4.6	5.1	0.94	0.58	0.98
2015	1,022.8	37.7	42.1	3.7	4.1	0.88	0.56	0.97
2016	1,086.5	36.5	45.4	3.4	4.2	0.89	0.74	0.65
2017	989.4	25.6	34.8	2.6	3.5	0.99	0.75	0.68
AVG	1,262.07	50.54	54.05	4.04	4.36	0.90	0.57	0.91

R^2 : Coefficient of determination

NSE : Nash and Sutcliffe model efficiency

RMSE : Root Mean Square Error

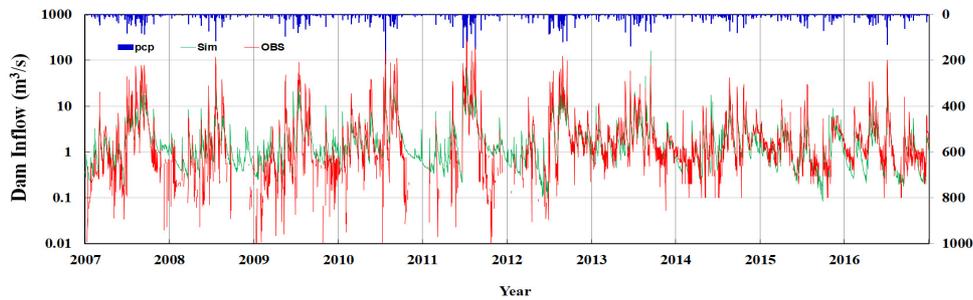


Fig. 5. Time series results of dam inflow

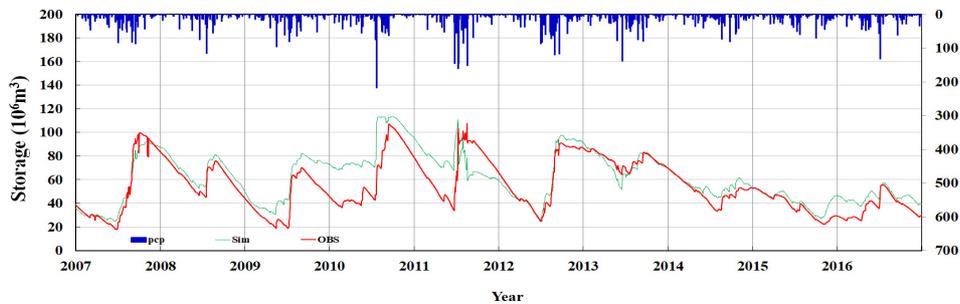


Fig. 6. Time series results of dam storage

Coefficient of determination (R^2)이 0.82, 0.90 평균 Nash and Sutcliffe model efficiency (NSE)가 0.59, 0.91, 그리고 평균 Root Mean Square Error (RMSE)가 2.10, 0.57로 분석되어

적용성이 높았다. Figs. 5 and 6은 보령댐 유입량, 저수량을 관측치와 검·보정을 끝낸 모의치를 비교하여 시계열로 나타낸 그림이다.

Table 5. Multiple linear regression analysis results

month		1	2	3	4	5	6
C*	pcp	8.67E-05 (0.994)	0.003786 (0.464)	0.006962 (0.149)	0.000882 (0.825)	0.000509 (0.955)	0.000229 (0.963)
	p_bin	0.143248 (0.026)	0.034508 (0.542)	-0.2027 (0.001)	0.041779 (0.477)	-0.18782 (0.355)	-0.22642 (0.081)
	storage	0.051108 (8.73E-267)	0.05687 (4.503E-248)	0.05793 (6.588E-226)	0.064774 (1.428E-188)	0.074406 (6.280E-68)	0.083391 (8.011E-123)
	inflow	0.071528 (0.082)	0.001969 (0.878)	0.011472 (0.452)	-0.01756 (0.045)	0.046154 (0.002)	0.004878 (0.572)
	i_bin	-0.41955 (7.715E-11)	-0.43429 (2.391E-18)	-0.28378 (1.072E-07)	-0.18422 (0.003)	0.166 (0.357)	0.039211 (0.738)
R ²		0.98	0.98	0.97	0.97	0.84	0.92
month		7	8	9	10	11	12
C*	pcp	0.024391 (0.574)	-0.16451 (0.0002)	0.072566 (0.008)	-0.03573 (0.030)	-0.00068 (0.847)	-0.00506 (0.350)
	p_bin	-3.36807 (0.040)	0.091712 (0.941)	0.668881 (0.381)	0.187445 (0.549)	0.007683 (0.841)	0.064485 (0.079)
	storage	0.080352 (0.132)	0.054399 (0.042)	0.03971 (4.162E-06)	0.038432 (1.3422E-43)	0.042312 (2.741E-281)	0.047005 (8.237E-293)
	inflow	0.506205 (4.041E-40)	0.616625 (7.643E-47)	0.208253 (7.624E-14)	0.466362 (2.698E-23)	-0.08956 (6.514E-10)	-0.06811 (3.135E-06)
	i_bin	-2.69637 (0.349)	-1.68663 (0.348)	0.156315 (0.827)	-0.64031 (0.005)	-0.00294 (0.940)	-0.18038 (1.611E-05)
R ²		0.57	0.57	0.54	0.70	0.98	0.98

C* : Coefficient
 pcp : Precipitation,
 p_bin : Precipitation weighting term
 i_bin : Inflow weighting term

3.2 다중회귀분석을 이용한 미래 댐방류량 결과

Table 5는 다중회귀분석의 결과인 각 항에 증분을 나타내는 계수(Coefficient), P-value와 결정계수를 정리한 표이다. 1월부터 12월까지의 월별 방류량 추정식의 결정계수 R² 값은 0.54-0.98로 만족스러운 결과를 보였다. P-value는 강수량과 강수량의 유무에 따른 가중치 항이 0.05보다 커서 유의하지 않으나 강우량의 발생으로 강수량의 편차가 발생하는 우기에 P-value값이 유의한 것을 알 수 있다. 이에 반해 평년 저수량의 경우, P-value 값이 상대적으로 0.05보다 매우 작아 가장 유의한 변수로 판단되었다. 다중회귀분석이 끝난 월별 방류량 추정식에 극한 가뭄 시나리오의 강우량, 검·보정이 끝난 SWAT 모델로 얻은 유입량, 월별 평균 저수량을 대입하여 미래기간의 월별 방류량을 산정하였다.

3.3 미래 기후변화에 따른 수문거동 변화 분석

총 평가기간인 40년(2007~2046년)을 10년 단위로 구분하

여 S0(2007~2016년), S1(2017~2026년), S2(2027~2036년), S3(2037~2046년)로 설정하였다. Fig. 7 and Table 6은 검·보정이 끝난 매개변수, 극한 가뭄시수로 산정한 극한 가뭄 시나리오 RCP 8.5 BCC-CSM1-1-M의 기상자료, 그리고 다중회귀분석으로 추정된 미래 방류량을 적용한 평가기간 동안의 보령댐의 저수량과 강수량의 거동을 10년 빈도로 나타낸 것이다.

전체적으로 강수량은 평가기간 동안 증감 추세를 보였으나, 저수량은 계속하여 감소하였는데, 강수량은 과거 강수량의 영향을 받아 현재나 미래의 강수량이 많아지거나 적어지지 않지만, 저수량의 경우 과거 저수량이 현재나 미래의 저수량에 큰 영향을 주므로 증감하는 강수량의 패턴과는 상이하게 지속적으로 감소하였다고 판단하였다. 강수량은 기준기간 S0와 비교하여 S3 봄철에 30.5% 감소하여 가장 크게 하락하였으며, 저수량은 미래기간이 진행되는 과정에서 지속적으로 감소하여 S3 기간에는 23.6% 까지 감소하였다. S3에서 봄철 저수량은 34.0%, 겨울철은 24.1% 감소하여 봄철과 겨울철

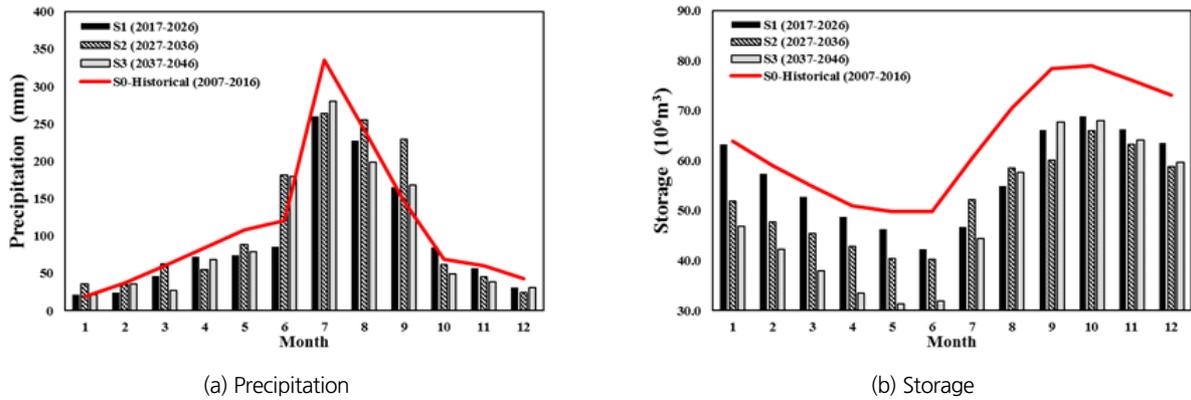


Fig. 7. Monthly data of precipitation and storage for future periods

Table 6. Storage and Precipitation data for standard period and future periods

Season	Precipitation (mm)				Storage (10 ⁶ m ³)			
	S0	S1	S2	S3	S0	S1	S2	S3
Total	1,324.8	1,149.7 (-13.2%)	1,338.7 (+1.0%)	1,176.7 (-11.2%)	63.9	56.4 (-11.6%)	52.3 (-18.1%)	48.8 (-23.6%)
Spring	251.9	192.8 (-23.5%)	205.7 (-18.3%)	175.1 (-30.5%)	51.9	49.3 (-5.0%)	42.9 (-17.3%)	34.2 (-34.0%)
Summer	697.6	573.7 (-17.8%)	700.6 (+0.4%)	658.6 (-5.6%)	60.3	48.0 (-20.4%)	50.3 (-16.5%)	44.7 (-25.9%)
Autumn	275.6	306.1 (+11.0%)	337.7 (+22.5%)	255.2 (-7.4%)	77.9	67.1 (-13.9%)	63.1 (-19.0%)	66.7 (-14.5%)
Winter	99.7	77.2 (-22.5%)	94.7 (-5.0%)	87.8 (-12.0%)	65.4	61.4 (-6.1%)	52.8 (-19.2%)	49.6 (-24.1%)

S0 : 2007~2016, S1 : 2017~2026, S2: 2027~2036, S3: 2037~2046

저수량을 관리하는 가을철 댐 운영 규제가 새로이 필요하다고 판단하였다. 또한, S3 봄철 강우량과 저수량이 대폭 하락하여 다른 기간, 계절보다 물부족 현상에 취약한 것을 알 수 있다.

3.4 미래 기후변화에 따른 물부족 평가

모의 저수량이 기준수위 이하일 경우를 물부족으로 정의하여 S0부터 S3까지 사상별로 기간(D), 규모(M), 심도(S)를 계산하였다. Table 7은 재현기간에 따른 심도를 나타낸 표이다. 기준기간 S0 (2007~2016)에서 년도별 심도를 측정하여 빈도 해석을 실시하였다. 그 결과, 2년 빈도의 경우 3721.4 (10⁶ m³ × day), 3년 빈도의 경우 4729.7 (10⁶ m³ × day), 5년 빈도의 경우 5852.6 (10⁶ m³ × day), 10년 빈도의 경우 7283.7 (10⁶ m³ × day),로 산정되었다. 물부족을 평가하는 기준으로 5~10년 빈도의 강도를 가지는 물부족 사상이 기간별로 발생하는 빈도와 기간별 물부족의 심도를 비교하였다. 물부족의 심도는 S0는 120.0702 (10⁶ m³), S1은 경우 129.5498 (10⁶ m³) S2는 147.4532 (10⁶ m³) S3는 134.1161 (10⁶ m³)로 기준기간과 비

교하여 모든 기간에서 증가하였고, S2에서 가장 크게 나타났다. 기간별 5~10년 빈도의 강도 물부족 발생 빈도는 S0에서 3번, S1과 S2에서 4번 그리고 S3에서 5번으로 나타나며, S3에서 기준기간의 두 배 가까이 발생하는 것을 확인하였고, 이는 S3 봄철 강우량의 감소가 원인이라 판단된다.

Table 7. Results of runs theory and frequency analysis

	2-year	3-year	5-year	10-year
Severity (10 ⁶ m ³ × day)	3,721.4	4,729.7	5,852.6	7,283.7
	S0	S1	S2	S3
Magnitude (10 ⁶ m ³)	120.0702	129.5498	147.4532	134.1161
5~10 year frequency drought				
Frequency	S0	S1	S2	S3
	3	4	4	5

S0 : 2007~2016, S1 : 2017~2026, S2: 2027~2036, S3: 2037~2046

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 보령댐의 미래 물부족 평가, 즉 기후변화를 고려한 보령댐의 용수공급 취약성을 연구 목적으로 삼고 보령댐 유역을 대상 지역으로 설정하여 SWAT 모델의 매개변수 검·보정을 진행하였다. 기후변화를 고려하기 위해 RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오를 SPI로 환산하고 극한 가뭄지수로 평가하여 극한 가뭄 시나리오를 선정하였으며, 다중회귀분석으로 미래 방류량을 산정하였다. 이후 대상 댐 유역의 미래기간 일별 저수량을 모의하였고, 모의된 결과를 바탕으로 보령댐의 수문 거동과 물부족 평가를 실시하였다. 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

RCP 4.5와 RCP 8.5 시나리오의 SPI-6로 표현한 극한 가뭄 지수는 Magnitude(강도), Duration(가뭄 일수), Longest Dry Period(최대 가뭄 지속일수), 시나리오마다 극한 가뭄 지수의 평균과 편차가 상이하어 지수별 편차를 구하고 그 합이 클수록 가뭄 심도가 크다고 판단하여 가뭄심도의 순위를 정하였다. 결과적으로, RCP 8.5 BCC-CSM1-1-M이 선정되었다.

다중회귀분석으로 월별 방류량 추정식을 도출하였고, 월별 결정계수 R^2 값들은 0.54 이상으로 만족스런 결과를 보였다. P-value의 경우, 강수량은 우기에 유의하였으며, 평년 저수량의 경우, 상대적으로 유의성이 가장 큰 항목으로 판단되었다. 월별 방류량 추정식에 극한 가뭄 시나리오의 강수량, 유입량, 월별 평균 저수량을 대입하여 미래기간의 일별 방류량을 산정하였다.

기후변화를 적용한 수문거동의 경우, 강수량은 평가기간 동안 증감 추세를 보였으며, 저수량은 지속적으로 감소하는 추세를 보였다. 강수량은 기준기간 S0 (2007~2016)와 비교하여 S3 (2037~2046) 봄철에 30.5% 감소하여 가장 크게 하락하였으며, 저수량은 미래기간이 진행되는 과정에서 지속적으로 감소하여 S3 (2037~2046)기간에는 23.6%까지 감소하였다. S3에서 봄철 저수량은 34.0%, 겨울철은 24.1% 감소하여 봄철과 겨울철 저수량을 관리하는 가을철 댐 운영 규제가 새로이 필요하다고 판단하였다. 또한, S3 (2037~2046) 봄철 강수량과 저수량이 대폭 하락하여 다른 기간, 계절보다 물부족에 취약한 것을 알 수 있다.

보령댐의 물부족 평가방법으로 Runs 이론을 사용하여 S0 (2007~2016)부터 S3 (2037~2046)까지 사상별로 기간(D), 크기(M), 강도(S)를 산정하였다. 재현기간에 따라 빈도해석하였고, 5~10년 빈도의 심도를 가지는 물부족 사상을 기준으로 미래기간을 평가한 결과 S3 (2037~2046) 기간에서 5~10년 빈도의 강도를 가지는 가뭄 사상이 기준기간보다 두 배 가까

이 발생하였고 더불어 S3 (2037~2046) 봄철 강수량과 저수량이 다른 기간, 계절보다 많이 감소한 점을 고려하면 S3 (2037~2046)에서의 물부족 평가가 향후 검토되어야 한다고 판단된다.

미래 기후변화로 인한 기온 상승, 강수량 증가, 방류량과 유입량 변화가 예상되며, 이러한 변화는 불규칙적이라 예측할 수 없어 댐 저수지의 안정적인 용수공급에 차질을 준다. 따라서 댐 저수지의 용수공급능력을 다양한 저수지 및 기후 시나리오 설정으로 분석하고 전망하여 미래에 보령댐이 효율적으로 용수를 공급하는 물부족 대응 방안 계획의 수립이 필요하며, 대책기구를 조직화하여 지속적이고 적극적인 대응활동을 가능하게 하고 피해규모를 저감시켜야 한다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 물관리연구사업에서 지원받았습니다 (18AWMP-B079625-05).

References

- Ahn, S. R., Park, G., Shin, Y. H., and Kim, S. J. (2009). "Assessment of the potential water supply rate of agricultural irrigation facilities using MODSIM-For Geum River basin." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 10, pp. 825-843.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development 1." *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Cossins, G., and Hegerty, K. L. (1977). "The application of transient analysis to future urban water supply dams." *Hydrology Symposium, The institution of Engineers*, Australia, Nat. Conf. Pub. No. 77/5, pp. 98-102.
- Intergovernmental Panel Climate Change (IPCC) (2014). The Fifth Assessment Report (AR5) of The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jeong, H. G., Kim, S. J., and Ha, R. (2013). "Assessment of Climate Change Impact on Storage Behavior of Chungju and Regulation Dams Using SWAT Model." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 12, pp. 1235-1247.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2012). The Korean peninsula climate change prospect report.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., and Kleist, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to time scales." *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, Vol. 17, No.

22, pp. 179-183.

- Ministry of Agriculture and Forestry (MAF) (2002). Design criteria of land and water development plan for agriculture (fill dam).
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2001). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2000*. TWRI Report TR-191, Texas Water Resources Institute, College Station, Texas.
- Park, M., Yoon, Y. N., and Lee, D. R. (1999). "An application of drought frequency formula for the determination of reservoir capacity and the evaluation of water supply capability." In *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, pp. 56-61.
- Park, N. Y., Choi, J. Y., Yoo, S. H., and Lee, S. H. (2013). "Assessment of Anti-Drought Capacity for Agricultural Reservoirs using RCP Scenarios." *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 55, No. 3, pp. 13-24.
- Yoon, S. H., and Won, M. S. (2016). "Correlation Analysis of Forest Fire Occurrences by Change of Standardized Precipitation Index." *The Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 19, No. 2, pp. 14-26.