

SWAT 모형을 이용한 대청댐 유역의 기후인자에 따른 유출 및 유사량 민감도 평가

예 령 · 정세웅[†] · 이흥수 · 윤성완 · 정희영

충북대학교 환경공학과

Sensitivity Analysis of Climate Factors on Runoff and Soil Losses in Daecheong Reservoir Watershed using SWAT

Lyeong Ye · Se-Woong Chung[†] · Heung-Soo Lee · Sung-Wan Yoon · Hee-Young Jeong

Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received 30 June 2008, Revised 8 September 2008, Accepted 14 October 2008)

Abstract

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was used to assess the impact of potential future climate change on the water cycle and soil loss of the Daecheong reservoir watershed. A sensitivity analysis using influence coefficient method was conducted for two selected hydrological input parameters and three selected sediment input parameters to identify the most to the least sensitive parameters. A further detailed sensitivity analysis was performed for the parameters: Manning coefficient for channel (Cn), evaporation (ESCO), and sediment concentration in lateral (LAT_SED), support practice factor (USLA_P). Calibration and verification of SWAT were performed on monthly basis for 1993~2006 and 1977~1991, respectively. The model efficiency index (EI) and coefficient of determination (R²) computed for the monthly comparisons of runoffs were 0.78 and 0.76 for the calibration period, and 0.58 and 0.65 for the verification period. The results showed that the hydrological cycle in the watershed is very sensitive to climate factors. A doubling of atmospheric CO₂ concentrations was predicted to result in an average annual flow increase of 27.9% and annual sediment yield increase of 23.3%. Essentially linear impacts were predicted between two precipitation change scenarios of -20, and 20%, which resulted in average annual flow and sediment yield changes at Okcheon of -53.8%, 63.0% and -55.3%, 65.8%, respectively. An average annual flow increase of 46.3% and annual sediment yield increase of 36.4% was estimated for a constant humidity increase 5%. An average annual flow decrease of 9.6% and annual sediment yield increase of 216.4% was estimated for a constant temperature increase 4°C.

keywords : Climate change, Runoff, Sensitivity, Soil loss, Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

1. 서론

지구 지표온도 기록을 보면 1998년과 2005년은 1850년 이래 가장 더운 해로 기록되어 있다(IPCC, 2007). 우리나라 역시 지난 35년 동안 2007년의 평균기온은 1998년에 이어 두 번째로 기온이 높았던 해로 기록되었으며, 2007년의 최고온도는 3위, 최저온도는 2위를 기록하였다. 또한 2008년 식목일의 기온은 식목일이 재정된 1940년에 비해 3.4°C, 평년기온에 비해 1.0°C 높아져 식목일을 앞당겨야 한다는 보고도 나오고 있다. 기후변화에 관한 정부간 패널인 IPCC (2001)는 1900년대 이후로 지난 1세기 동안에 약 0.6±0.2°C 상승했다고 밝혔으며, 관측을 이용한 분석에서도 이러한 온난화의 경향이 증가되는 것으로 보고하였다(IPCC, 2007). 또한 IPCC의 평가보고서에 의하면, 화석연료에 의존한 대량소비형의 사회가 계속된다면 금세기말(2090~2099년)의 지구 평균기온은 최대 6.4°C, 해수면은 59.0 cm 상승한다

고 전망하였고, A1B 시나리오의 경우 평균기온은 2.8°C, 해수면은 21.0~ 48.0 cm 상승할 것으로 예상하였다(IPCC, 2007). 이러한 기후변화의 영향은 수자원, 생태계 및 해양 등 변화가 다양하게 나타날 수 있다. 생태계의 영향으로는 평균기온이 1.5~2.5°C 증가하면 동식물의 20~30%가 멸종 위기에 처하며, 기온이 올라가고 강우의 패턴이 바뀌면 모기 등 질병 매개체의 분포가 변화하여 건강은 물론 생태계를 크게 변화시킬 수 있다. 또한 기후변화는 농업생산성에도 영향을 미칠 수 있다(IPCC, 1995). 중·고위도 지역은 기온이 상승하면 농업생산성은 증가하나, 저위도 지역은 생산량이 감소할 것이라는 전망이다(IPCC, 2001). 그러나 잦은 가뭄과 홍수로 인하여 농업생산성 감소로 인한 식량 위협은 증가된다. 기온이 상승하여 병해가 녹으면 해수면의 상승으로 인해 해안침식이 가속되고 작은 섬들은 사라지게 될 것이다.

수자원의 영향으로는 21세기 중반에 물 가용량(availability)은 습윤 열대·고위도지역은 10~40% 증가하고, 건조 저·중위도지역은 10~30% 감소하며, 대부분의 지역은 수자원이 부족할 것으로 전망하였다(IPCC, 2007). 우리나라의 경우

[†] To whom correspondence should be addressed. chung@chungbuk.ac.kr

최근 50년간의 강수일수는 감소한 반면 일강수량이 80 mm 이상인 호우일수의 발생빈도는 증가된다는 보고이다(Choi, 2002). 이것은 강우의 강도는 증가하고, 가뭄과 홍수와 같은 재해는 증가하는 것을 시사한다. 이러한 강우사상의 변화는 수자원의 변화뿐만 아니라 유역의 토양유실을 가중시키고, 따라서 중요한 상수원인 저수지의 비점오염부하와 탁수유입은 더욱 증가된다. 저수지 탁수의 장기화는 수자원의 이용, 저수지 수질관리 및 생태계에 부정적 영향을 미치는 것으로 지적되고 있다(정세웅 등, 2005). 또한 탁수는 인을 포함한 다양한 오염원을 저수지로 단시간에 다량 유입시켜 부영양화뿐만 아니라 빛 투과능저하 및 저수지퇴사를 일으켜 저수지 생태계에 악영향을 미칠 수 있다. 유입된 탁수는 수개월씩 댐 저수지내에 체류하면서 댐 하류로 장기간 방류됨에 따라 지역주민의 민원을 야기하고 있어 사회적으로도 큰 문제가 되고 있다(예 령 등, 2008).

이미 기후변화 연구에 있어 선진국인 미국, 영국, 일본에서는 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 평가하고, 수자원 설계 및 관리에 활용하기 위한 시도가 진행되고 있다. 선행 연구를 살펴보면 Fontaine 등(2001)은 SWAT 모델을 이용하여 Spring Creek 유역의 배중 이산화탄소, 기온 4°C, 강수 $\pm 10\%$ 변화에 따른 유역의 유출 및 증발산 변화를 분석하였으나 모의 기간이 9년으로 장기간의 영향을 분석하지 못한 한계가 있다. Stonefelt 등(2000) 또한 SWAT 모델을 이용하여 Wind 유역의 기후인자 민감도 분석과 GCM(General Circulation Model)을 이용하여 유역의 유출 변동 특성을 분석하였다. Jha 등(2006)은 Mississippi 상류 유역을 대상으로 하여 9개의 기후 민감도 시나리오와 6개의 GCM 시나리오를 이용하여 월별 유출 변동을 연구하였다. 국내에서도 여러 가지 GCM과 물수지 모형, PRMS, TANK, SLURP 등의 유출 모형을 이용한 연구들이 시도되고 있으나(김병식 등, 2004; 배덕효 등, 2007a, 2007b; 신사철, 2000; 안재현 등, 2001; 황준식 등, 2007), 각각의 기후인자에 대한 유출의 영

향 연구는 시도되지 않았으며, Nearing 등(2005)에 의하면 7개의 토양유실 모형을 이용하여 기후변화 인자들을 변화시켜 토양 유실량의 민감도를 분석하였다. 그 결과 모든 모델에서 강우량과 강우강도가 증가했을 때 토양유실량은 증가하였으며, 지피식물(ground cover)과 수관피복(canopy cover)이 증가했을 때는 감소하는 것으로 모의하였다.

이러한 인자들이 민감하게 변화하는 것으로 보아 기후변화는 토양유실에 있어서 큰 잠재원인이 된다고 하였다. 유출 뿐 아니라 기후에 따른 토양유실 정도도 함께 연구되어야 한다. 따라서 본 연구의 목적은 기후변화에 효과적으로 대비하기 위해 대청댐 유역을 대상으로 장기 물 순환 및 토양 유실량 예측 모델을 구축하고, 실측자료를 사용하여 모델을 검·보정한 후 임의의 기후인자의 변화에 따른 대상 유역의 유출 및 토양유실량 변화 민감도를 평가하는데 있다. 연구결과는 향후 국내에 적합한 기후변화 시나리오에 따른 대상 유역의 유출 및 유사량 변화를 평가하기 위하여 활용될 계획이다.

2. 연구방법

2.1. 대상유역

연구대상지역인 대청호는 금강 중상류에 건설된 다목적 인공호로서 전체 유역 중 용담호 유역을 제외한 자체 유역 면적은 3,204.0 km², 유로연장 190.0 km로서 형상계수가 약 2.97인 장방형의 형상을 가지고 있으며 소양호, 충주호에 이어 세 번째로 큰 저수용량(1,490만 톤)을 가지고 있다. 대청댐을 기준으로 대청호로 유입되는 주요 유입하천에는 봉황천, 무주남대천, 초강, 보청천, 소옥천으로 구성된다. 지난 30년간(1971~2000년)의 강우자료에 의하면 대청댐 유역의 경우 우리나라 연평균강우량(1,318.8 mm)과 비교하여 약 1,230.0 mm로 다소 적은 편이며 대청댐 유역의 연평균 유입량은 95.6 m³/sec로 알려져 있다. Fig. 1에 구축된 모형

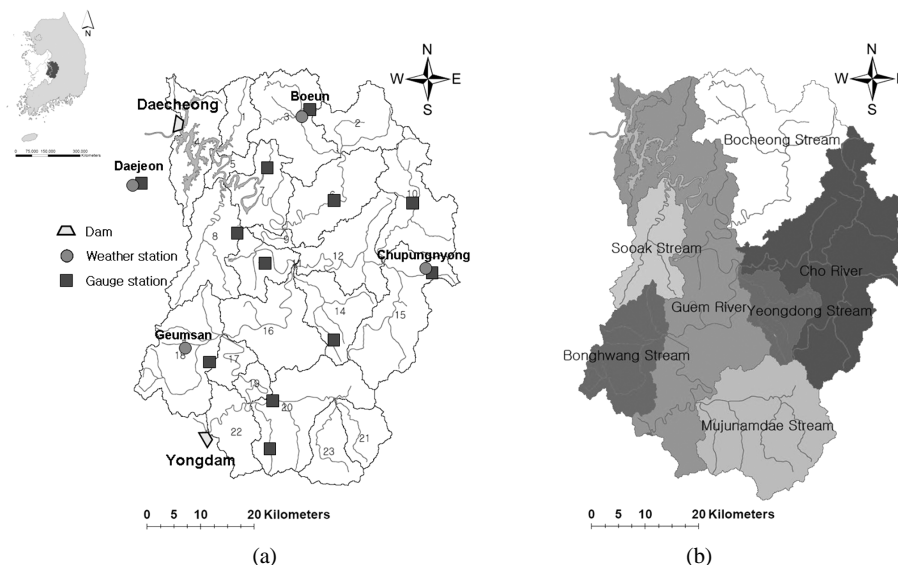


Fig. 1. River network (a), rainfall (squares) and weather stations (circle) located in the Daecheong Reservoir basin, and its delineation (b) of sub-basins.

의 소유역 구분, 주요수계, 기상관측소 및 강우관측소를 나타내었다.

2.2. SWAT 모형의 입력 자료

2.2.1. SWAT 모형의 GIS 입력자료

SWAT 모형을 적용하기 위해 필요한 입력자료는 기상자료와 지형자료로 구분할 수 있다. 먼저 지형자료를 살펴보면 수치표고모형(Digital elevation model, DEM) 자료는 환경부에서 제공하는 파일을 GIS 프로그램을 이용하여 모형 입력자료의 형태인 Grid 형태로 변환시켜 사용하였으며, Chaplot 등(2005)의 연구결과 토양유실 모의에는 20~90 m의 해상도가 적당함을 제시하여 본 연구에서는 30 m 해상도의 격자크기를 사용하였다. 토양도는 농업과학기술원에서 실시하고 있는 토양도 전산화 사업을 통해 구축된 1:25,000 정밀토양도를 사용하였다. Chaplot(2005)은 토양도의 축적에 따른 유출과 토양유실(sediment load)과 영양염류의 영향을 알아보았다. 그 결과 토양도의 축적은 1:25,000을 사용할 때 1:250,000과 1:500,000을 사용할 때보다 유출과 토양유실 및 부하량 모의에 더 적합하다고 제시하였다. 대청댐 상류 유역 내 토지이용현황은 환경부 산하의 환경지리정보서비스(<http://egis.me.go.kr/egis/>)에서 제공하는 2001년에 제작한 증분류 토지 이용도(1:25,000)를 사용하였다. 박종윤 등(2008)은 CA-Markov라는 수학 통계학적 기법을 이용하여 미래 토지이용변화를 예측하여 경안천 유역의 수문과 수질 영향을 알아보았다. 그 결과 미래로 갈수록 도시화에 따른 산림의 감소와 주거지 및 나지 등의 불투수층 증가로 2090년에 총 유출이 약 2.7% 증가하였으며, 유사량과 TN, TP는 각각 74.9%, 10.9%, 19.9% 증가하는 것으로 분석되었다. 그러나 Lenhart 등(2003)은 산림과 시가지를 0.5~20 ha까지 9가지 시나리오로 나누어 연구한 결과 토지이용도의 변화는 토양유실에 큰 영향을 미치지 않았지만, 영양염류의 유출은 약 2배 증가하였다. 위 연구결과와 같이 토지이용의 변화는 유역의 유출 및 오염물질의 거동에 영향을 미친다. 하지만 본 연구에서는 이러한 토지이용도의 변화를 고려하지 못한 한계가 있어 향후 미래 토지피복도 변화와 기후변화를 고려한 유역의 물순환에 대한 연구와 이 부분에 대한 SWAT 모형의 개선 역시 연구되어야 할 것이다.

2.2.2. SWAT 모형의 기후 입력자료

SWAT 모형에서는 일간 강우자료, 최고기온, 최저기온,

일사량, 평균 상대습도, 평균풍속을 직접 입력하거나 또는 모형에 탑재된 WXGEN 기상발생기 모형(Sharpley and Williams, 1990)을 이용하여 일 자료를 생성할 수 있다. Xiaojun 등(2007)은 중국에 위치한 Loesws Plateau 유역에 SWAT 모형의 기상발생기와 관측된 일 강우량의 T-tests와 F-tests를 실시하였으며, 그 결과 일 강우량이 통계적으로 잘 일치하는 것으로 보고한 바 있다. 기상발생기는 10년 이상의 통계화된 기상자료를 요구한다. 본 연구에서는 결측 자료의 생성과 미래 기후에 대한 기상자료 생성을 위해 기상청(www.kma.go.kr)이 제공하는 30년간 기후(1971~2000년)의 월별 평균값을 기상발생기 변수로 입력하였다.

SWAT 모형에는 CO₂농도와 강수, 기온, 복사량, 습도 조정과 같은 기상관련 매개변수와 CO₂HI, BIOEHI와 같은 식생과 관련된 기후변화 매개변수들을 입력할 수 있다 (Table 1). 이 중 강수, 기온, 복사량, 습도와 같은 매개변수는 월별 입력이 가능하여 계절적 변동을 고려할 수 있다.

강수, 기온, 복사량, 습도의 조정 값은 식 (1)~(6)과 같이 입력된다.

$$R_{day} = R_{day} \cdot \left(1 + \frac{adj_{pcp}}{100} \right) \tag{1}$$

$$T_{mx} = T_{mx} + adj_{tmp} \tag{2}$$

$$T_{mn} = T_{mn} + adj_{tmp} \tag{3}$$

$$\overline{T}_{av} = \overline{T}_{av} + adj_{tmp} \tag{4}$$

$$H_{day} = H_{day} + adj_{rad} \tag{5}$$

$$R_h = R_h + adj_{hmd} \tag{6}$$

R_{day} : the precipitation falling in the sub-basin on a given day (mm)

$T_{mx}, T_{mn}, \overline{T}_{av}$: the daily maximum, minimum, average temperature (°C)

H_{day} : the daily solar radiation reaching earth's surface for month (MJ/m²)

R_h : the relative humidity for the day expressed as a fraction

Table 1. SWAT input variables relevant to climate change

Variable	Definition	File
CO ₂	CO ₂ : Carbon dioxide level in sub-basin (ppmv)	.sub
RFINC (mon)	adj _{pcp} : % change in rainfall for month	.sub
TMPINC (mon)	adj _{tmp} : increase or decrease in temperature for month (°C)	.sub
RADINC (mon)	adj _{rad} : increase or decrease in solar radiation reaching earth's surface for month (MJ/m ²)	.sub
HUMINC (mon)	adj _{pcp} : increase or decrease in relative humidity for month	.sub
CO ₂ HI	Elevated CO ₂ atmospheric concentration (μL CO ₂ /L air)	crop.dat
BIOEHI	Biomass-energy ratio corresponding to the 2nd point on the radiation use efficiency curve.	crop.dat

2.2.3. SWAT 모형의 CO₂ 모의

이산화탄소의 농도가 증가할수록 기공전도도(leaf stomatal conductance)가 감소하는 것은 많은 연구를 통해 확인되었다(Field et al., 1995; Medlyn et al., 2001; Morison and Gifford, 1983; Wand et al., 1999). Wullschleger 등(2002)에 의하면 이산화탄소 증가에 따른 식물의 기공전도도 변화는 수목의 종류에 따라 다르다고 했으며, 그 범위는 25~40% 정도라고 하였다(Field et al., 1995; Morison, 1987). 또한 이산화탄소의 증가에 따라 엽면적(leaf area) 변화 역시 수목의 종류에 따라 다르다(Pritchard et al., 1999; Wand et al., 1999). Echhardt and Ulbrich(2003)은 이러한 한계를 파악하여 5가지의 수목종류에 따라 기공전도도와 엽면적지수(leaf area index, LAI)를 반영하여 모형을 수정하였다(Table 2). 이러한 문제점은 최근버전(ArcSWAT2005)까지도 개선되지 않았다.

Table 2. Assumed response in maximum stomatal conductance and leaf area index to a doubled atmospheric CO₂ concentration

Land cover	Stomatal conductance (%)	Leaf area index (%)
Deciduous forest	-24	+7
Coniferous forest	-8	+7
Pasture	-25	+20
Range land	-20	+15
Arable land	-40	+37

모형에서의 CO₂ 작용은 다음과 같다. Morison(1987)은 이산화탄소의 농도가 330 ppmv에서 660 ppmv로 증가하면 그 결과 기공전도도(leaf conductance)는 40% 감소하며, 이 범위 안에서 기공전도도는 선형 감소한다고 하였다. Easterling 등(1992)은 이산화탄소 농도가 증발산에 미치는 영향을 식 (7)과 같이 제안하였다.

$$g_{l,CO_2} = g_l \left[1.4 - 0.4 \left(\frac{CO_2}{330} \right) \right] \quad (7)$$

g_{l,CO_2} : leaf conductance modified to reflect CO₂ effects (m/s)

g_l : maximum effective leaf conductance (m/s)

CO₂ : concentration of CO₂ in the atmosphere (ppmv)

따라서 이산화탄소 농도의 증가는 기공전도도 감소를 초래하고, 따라서 식물 엽면적의 단위면적당 증산량은 감소하게 된다. 그러나 식물의 기공전도도는 수목의 종류에 따라 다르기 때문에(Table 2), 수목별 차이를 고려하지 않을 경우 기공전도도의 감소 영향이 크게 모의되어 증산량이 과소모의 될 우려가 있다(Echhardt and Ulbrich, 2003).

Penman-Monteith 공식의 식생피복 저항(r_c)은 이산화탄소의 농도에 의해 변하는데, 식생피복 저항(r_c) 항은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_c = r_1 \left[(0.5LAI) \left(1.4 - 0.4 \frac{CO_2}{330} \right) \right]^{-1} \quad (8)$$

LAI : Leaf area index

r_1 : the minimum effective stomatal resistance of a single leaf (m/s)

이산화탄소의 농도가 증가하면 식 (8)의 이산화탄소 감소 ($1.4 - 0.4 \frac{CO_2}{330}$) 항이 1까지 줄어들면서, r_c 는 증가한다. PET 함수의 다른 항목이 일정할 때, r_c 가 증가하면 PET는 감소한다.

또한 LAI는 식물높이(canopy height, h_c)의 함수인데, SWAT 모형은 대표식물인 alfalfa와 grass로 가정하여 계산한다. 식물의 높이가 3 cm 이상일 때는 식 (9)와 같이 계산되며, 높이가 40 cm 이상일 때는 LAI를 4.1로 계산한다(Allen et al., 1989).

$$LAI = 1.5 \ln(h_c) - 1.4 \quad (9)$$

식물높이(canopy height, h_c)와 관련된 식물생장을 모의하기 위해서 잠재 열단위(Potential heat unit, PHU)를 이용하고 있다. 예를 들어, 기준 온도 이상인 날에만 식물생장이 이루어지고, 식물생장에 기여하게 되는 기준 온도 이상의 온도를 열 단위(Heat unit, HU)라 정의하여, 날짜의 함수로서 이 누적치가 일정값에 도달하게 되면 식물의 생장이 완료되는 것으로 보는 것이다. 식물이 완전히 자라는데 필요한 총 열단위는 식 (10)과 같이 계산된다(Neitsch et al., 2005).

$$PHU = \sum_{d=1}^m HU \quad (10)$$

HU : the number of base zero heat units accumulated on day d where $d=1$ on the day of planting

m : the number of days required for a plants to reach maturity

SWAT 모형에서의 식물생장과과정에서 수목(trees), 다년생 식물(perennial), 1년생 한대성 식물(cool season annuals)에 대해 연중 최소 광주기(daylength)보다 작아질 때 성장하지 못하고 휴면기로 접어든다. 일장은 위도에 의해 계산되며, 휴면기동안 수목, 다년생 식물에 대해서 LAI는 최소값(0.75)을 갖도록 설정되어 있다. 그러나 이것은 Anderson 등(1976)이 언급한 바와 같이, 월동 중에 낙엽이 지는 활엽수림과 달리 연중 일정한 증산작용을 하는 침엽수림과 같은 식물군에서는 비현실적인 수치이다. 김철겸과 김남원(2004)은 이런 한계를 침엽수림의 경우 연중 일정한 LAI를 갖도록 수정하였다.

식물군락이 차단 혹은 흡수한 일사의 biomass로의 전환 효율을 광 이용효율(Radiation-use efficiency, RUE)이라고 하는데, 광합성 유효복사(photosynthetically active radiation, MJ/m²) 또는 일사의 군락에 의한 차단 또는 흡수량에 대한 탄소동화산물 양(Dry weight, g/m²)의 비율로 나타낸다

(Monteith, 1977). RUE는 대기중의 이산화탄소 농도에 민감하고, 이산화탄소 농도의 범위가 330~660 ppmv에 있을 때 RUE계산은 식 (11)과 같이 계산된다(Stockle et al., 1992). 이산화탄소의 농도의 증가는 식물생장(Plant growth)과 농업생산성(Biomass production) 및 증발산에 영향을 미친다(Arnold et al., 1998).

$$RUE = \frac{100 \cdot CO_2}{CO_2 + \exp(r_1 - r_2 \cdot CO_2)} \quad (11)$$

RUE : radiation-use efficiency of plant (10^{-1} g/MJ)
 CO_2 : concentration of carbon dioxide in the atmosphere (ppmv)
 r_1 : first shape coefficient, r_2 : second shape coefficient

2.2.4. 기후변화 시나리오

유역의 기후변화에 따른 민감도를 평가하기 위해서 Table 3과 같은 시나리오를 생성하였다. 총 5개의 시나리오로 구성하여, 1번 시나리오는 배중 이산화탄소(double CO₂: 현재의 이산화탄소 농도는 330 ppmv으로 가정)상태에 따른 기공전도도와 엽면적 지수에 의한 증발산의 변화와 이로 인한 유출 변화를 알 수 있다. 2~5번 시나리오는 강수를 -20~20% 증감 시켰을 때, 습도가 5% 증가하였을 때, 기온이 4°C 증가하였을 때의 변화를 알아보았다. 이중 기온 증가와 관련된 시나리오는 IPCC(2001) 발표한 GCM의 기온 4°C 증가 결과를 반영한 것이다. 본 연구는 향후 SRES (Special Report on Emission Scenario)를 이용하여 유역의 물순환 및 유사량 변화를 평가하기 위하여 기후인자들의 민감도를 알아보는데 목적이 있으며, 태풍과 같은 기후이벤트에 대해서는 고려하지 않았다. 그러나 Thomson 등(2003)은 SWAT 모형을 이용하여 세가지 El-Nino 상황에 의한 유출량 변동을 연구한 결과 기본 시나리오에서 -210%에서 70%까지 변동이 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델의 검·보정

강우-유출 모형(rainfall-runoff model)은 강우-유출이라는 자연현상을 단순한 형태로 개념화하여 표현하는데, 이러한 과정에서 많은 매개변수들이 필요하게 된다. 이러한 매개변수들은 모델의 불확실성을 증가시키는 결과를 초래하며, 정확하고 신뢰성 있는 모형의 매개변수 산정은 강우-유출모형을 이용한 유출분석에 있어 매우 중요한 과정이다(김태순 등, 2007; Van Der Perk, 1997).

검·보정할 매개변수 선정을 위하여 모델의 매뉴얼에 있는 유출 및 유사량 관련 매개변수를 한 번에 한 개의 독립변수를 바꾸면서 평가하는 방법인 영향계수법(influence coefficient method)을 사용하였으며, 이 방법은 지표유출과 지하수와 관련된 민감도 지수(sensitivity index)를 계산하는 보편적인 방법이다(Gu and Li, 2002; Helsel and Hirsh, 1992; 식 (12)). 민감도 분석을 통하여 Lenhart 등(2002)이 제시한 분류 중 유출은 중간(Medium)정도의 민감도를 갖는 Manning의 조도계수(Cn)와 토양증발보상계수(ESCO)를 보정하였다. 유사량 매개변수는 높은수준(High)의 민감도를 갖는 측방흐름과 관련된(LAT_SED) 매개변수와 침투유사량에서 높은수준(High)의 민감도를 갖는 토양보전인자(USLE_P)를 보정하였다(Table 4). 토양보전인자는 유역의 평균 경사 길이인 9.15 m를 고려하여 모델이 제시한 값인 0.9로 보정하였다(Neitsch et al., 2005).

$$s_i = \frac{P_m \Delta F}{F_m \Delta P} \quad (12)$$

유역의 검·보정은 유역의 중앙에 위치한 옥천 수위관측소에서 실시하였다. 미래 100년을 예측하기 위해서는 과거 30년 이상의 검·보정을 실시하여야 한다. 따라서 본 연구의 모의기간을 1973년부터 2006년까지 총 34년으로 설정하여 1973~1976년을 모델의 안정화 기간으로 하였으며 1977~1991년을 검증기간, 1993~2006년을 보정기간으로 하였다. 수위 결측 자료가 3개월 이상인 1992년은 제외하고 실시하였다. 유사량의 검·보정은 실측자료의 부족으로 2001~2004

Table 3. Assumed changes in relevant climate change parameters on a monthly basis for each of the six climate scenarios

Scenario	Climate parameter	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1	CO ₂ (ppm)	2×	2×	2×	2×	2×	2×	2×	2×	2×	2×	2×	2×
2	Precipitation (%)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
3	Precipitation (%)	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20	-20
4	Humidity (%)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	Temperature (°C)	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Table 4. Model parameters used for annual runoff and soil losses

Contents	Variable name	Input file	Default value	Adjusted value (Sub-basin)
Runoff	ESCO	.hru	0.95	1 (all)
		.bsn	0.00	1 (all)
	Cn	.sub	0.014	0.05 (10), 0.15 (11~23)
Soil loss	LAT_SED	.hru	0	100 (10~23)
	USLE_P	.mgt	1	0.9 (all)

년 4년 동안 실시하였으며, 대청댐 일원 수문기초 조사보고서 자료(한국수자원공사, 2001~2004)를 사용하였다.

검·보정 기간 동안 대청댐 상류 옥천 수위관측소의 유출량을 월별 관측값과 모의값을 선형회귀분석한 결과는 Fig. 2에 나타내었으며, Fig. 3은 보정 및 검증기간의 옥천 수위관측소의 월간 유출량 관측값과 모의값을 비교한 것이다. 모델의 검증기간(1977~1991년)보다 보정기간(1993~2006년)이 유출을 더 잘 모의하였다. 이것은 월간 유출량 검·보정에 사용된 수위-유량 곡선식은 홍수나 하천개발, 수리구조물 등의 축조 등으로 인해 하천 형상이 변화하므로 수위-유량 곡선 관계식은 매년 유량측정 성과로 갱신되어야 한다. 그러나 보정기간 이전의 곡선식은 5년 이상의 데이터를 하나의 곡선식으로 계산되어 있어 과거 수위-유량 곡선식을 산정함에 있어 해당년도의 특성을 반영하지 못하였기 때문으로 생각된다. 수위-유량 곡선식 계산에 있어 갈수기와 홍수기의 유량 계산식이 다른데, 검증기간의 곡선식은 하나로 되어있었다. 따라서 홍수기의 유량산정이 적절하지 못한 것으로 보인다. 또한 유역의 산재해 있는 농업용 보

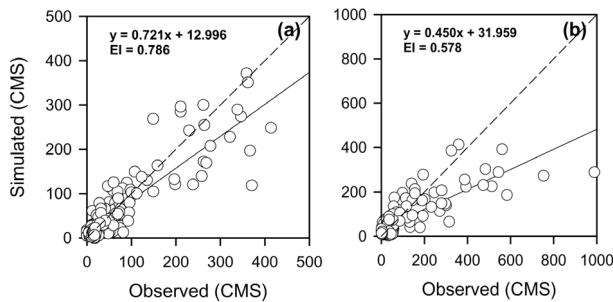


Fig. 2. Linear relationships between observed and simulated monthly runoff flow at Okcheon in Daecheong Reservoir basin: (a) Calibration(n=180) and (b) Validation (n=168).

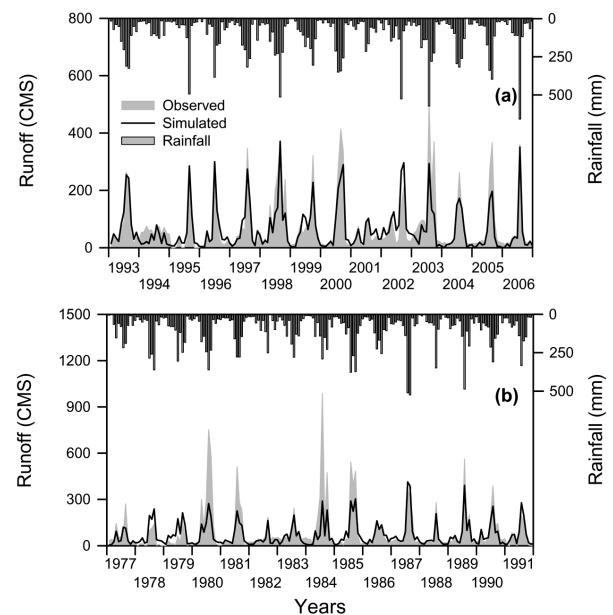


Fig. 3. Comparisons of observed and simulated monthly runoffs at Okcheon. (a) Calibration, (b) Validation.

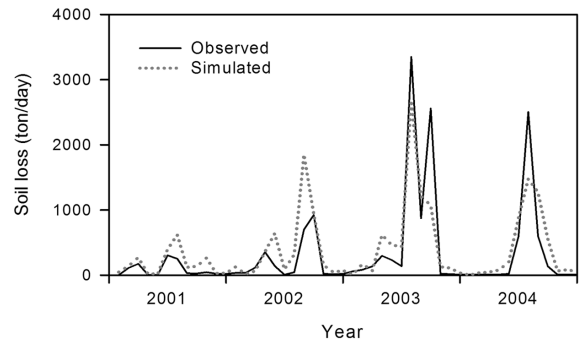


Fig. 4. Observed and Simulated monthly soil losses at Okcheon.

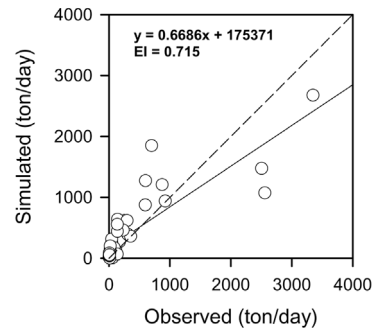


Fig. 5. Linear relationships between observed and simulated monthly soil losses at Okcheon (n=48).

나 논과 같은 저류시설의 효과가 유역의 수문응답단위의 구성과정에서 제대로 반영되지 못했기 때문일 것으로 추정된다(예 령 등, 2008).

Fig. 4는 옥천 지점의 월간 유사값과 실측값을 비교한 결과를 나타낸 것이고, Fig. 5는 이들 값들의 선형회귀분석 결과를 보여주고 있다. 모의결과 2001~2004년의 옥천지점의 월별 유사량 모의값은 관측값의 변동성향을 잘 반영하는 것으로 나타났다.

모의결과와의 적합성을 평가하기 위해 모형효율성 지수(Efficient Index, EI), 결정계수(Coefficient of Determination, R^2)를 사용하였다(Table 5). EI는 Nash and Sutcliffe(1970)에 의해 제안되었으며, Servat and Dezetter(1991)은 연구를 통해 수문모델의 효율성 산정 지표로서 Nash의 목적함수가 가장 적합한 것을 밝힌 바 있다.

Green 등(2006)은 R^2 가 0.5 이상이고 EI가 0.4 이상, Chung 등(1999)은 R^2 가 0.5 이상, Ramanarayanan 등(1997)과 Santhi 등(2001a, 2001b)은 R^2 가 0.6 이상이고 EI가 0.5 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의한다고 제안한 바 있다. Wu 등(2006)은 RE값이 10% 이내이면 모델의 결과 값을 만족한다고 고려하였으며, 5% 이하이면 우수(excellent)하다고 평가하였다. 따라서 본 연구에서는 EI가 0.5 이상, R^2 가 0.6 이상이면 만족한다고 하였다. Table 6은 유출량에 대한 모델 효율계수를 나타내었다. 보정기간과 검증기간의 EI는 각각 0.786과 0.578이었으며, R^2 는 각각 0.756과 0.578으로 나타났다. 유사량에 대한 모델 효율계수는 2001~2004년 EI와 R^2 는 각각 0.701과 0.715로 나타났다. 본 연구에서 모델의 평가 기준으로 가정한 모형효율성 지수(EI)가 0.5 이상, 결정계수(R^2)가

Table 5. The hydrological evaluation indices

Definition	Reference	Comments
$EI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	Nash and Sutcliffe (1970)	The optimal statistical value occurs when the value does reach 1.
$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	Legates and McCabe (1999)	The optimal statistical value occurs when the value does reach 1.
$RE(\%) = \left \frac{(O_i - P_i)}{O_i} \right \times 100$	Wu et al. (2006)	Satisfactory when RE was below 10% and Excellent when RE was less than 5%.

Q_i : observed value, P_i : simulated value, \bar{O} : mean observed value, N : number of the data.

Table 6. Statistical results for simulation period

Contents	Period	EI	R ²	RE
Surface runoff	Calibration	0.786	0.756	9.7
	Validation	0.578	0.654	18.1
Soil loss	2001~2004	0.701	0.715	-22.7

0.6 이상으로 나타나 SWAT 모델은 대청댐 유역의 월별 유출량 변동 특성을 잘 반영하는 것으로 평가되었다.

3.2. 기후변화 민감도 결과

Fig. 6은 기후변화 시나리오별 유출, 용설, 증발산, 지하

Table 7. Predicted relative changes in (a) water yield (b) sediment yield (c) PET (d) surface runoff for the Deacheong Reservoir watershed for the five climate change scenarios

(a)	Baseline	Scenario (percent change)				
		1	2	3	4	5
Month						
Jan	5.6	35	46	-46	79	48
Feb	13.4	23	47	-44	47	-28
Mar	13.6	15	44	-39	67	4
Apr	37.3	11	36	-32	34	2
May	40.6	12	37	-32	35	2
Jun	85.0	10	34	-31	25	-4
Jul	196.3	8	31	-30	17	-5
Aug	193.6	8	29	-29	17	-5
Sep	65.6	16	33	-33	36	-0
Oct	24.7	24	35	-35	61	3
Nov	19.7	19	36	-34	61	4
Dec	8.9	41	56	-49	95	9
average	58.7	18.5	38.7	-36.2	47.8	2.5

(b)	Baseline	Scenario (percent change)				
		1	2	3	4	5
Month						
Jan	0.3	2	39	-37	2	20
Feb	0.1	10	75	-71	17	66
Mar	0.0	35	82	-59	68	68
Apr	0.0	30	70	-63	40	40
May	0.0	35	104	-57	56	56
Jun	0.1	13	50	-51	25	48
Jul	0.3	18	49	-44	17	-11
Aug	0.3	12	40	-38	13	-10
Sep	0.0	19	54	-54	26	94
Oct	0.0	29	84	-65	55	553
Nov	0.0	46	88	-73	67	1324
Dec	0.0	30	55	-51	51	349
average	0.1	23.3	65.8	-55.3	36.4	216.4

(c)	Baseline	Scenario (percent change)				
		1	2	3	4	5
Month						
Jan	33.8	-15	-1	1	-55	39
Feb	45.0	-15	-1	1	-50	29
Mar	79.0	-14	0	0	-45	18
Apr	112.1	-13	0	0	-42	14
May	130.6	-10	0	0	-34	11
Jun	123.2	-8	0	0	-28	9
Jul	112.2	-6	0	0	-24	7
Aug	115.0	-6	0	0	-23	7
Sep	94.5	-7	0	0	-23	9
Oct	80.8	-8	0	0	-28	12
Nov	52.5	-12	0	0	-42	16
Dec	36.9	-13	0	0	-49	27
average	84.6	-10.6	-0.2	0.2	-36.9	16.5

(d)	Baseline	Scenario (percent change)				
		1	2	3	4	5
Month						
Jan	5.2	26	42	-44	50	18
Feb	13.0	22	47	-44	43	-64
Mar	5.1	33	73	-59	64	-66
Apr	9.1	30	74	-63	47	14
May	9.5	36	87	-60	59	14
Jun	32.5	23	61	-54	35	-7
Jul	95.1	15	48	-47	20	-12
Aug	101.9	9	41	-41	14	-9
Sep	17.2	18	57	-53	32	2
Oct	1.9	41	83	-62	72	24
Nov	1.6	49	86	-68	73	47
Dec	6.7	33	57	-51	53	-78
average	24.9	27.9	63.0	-53.8	46.3	-9.8

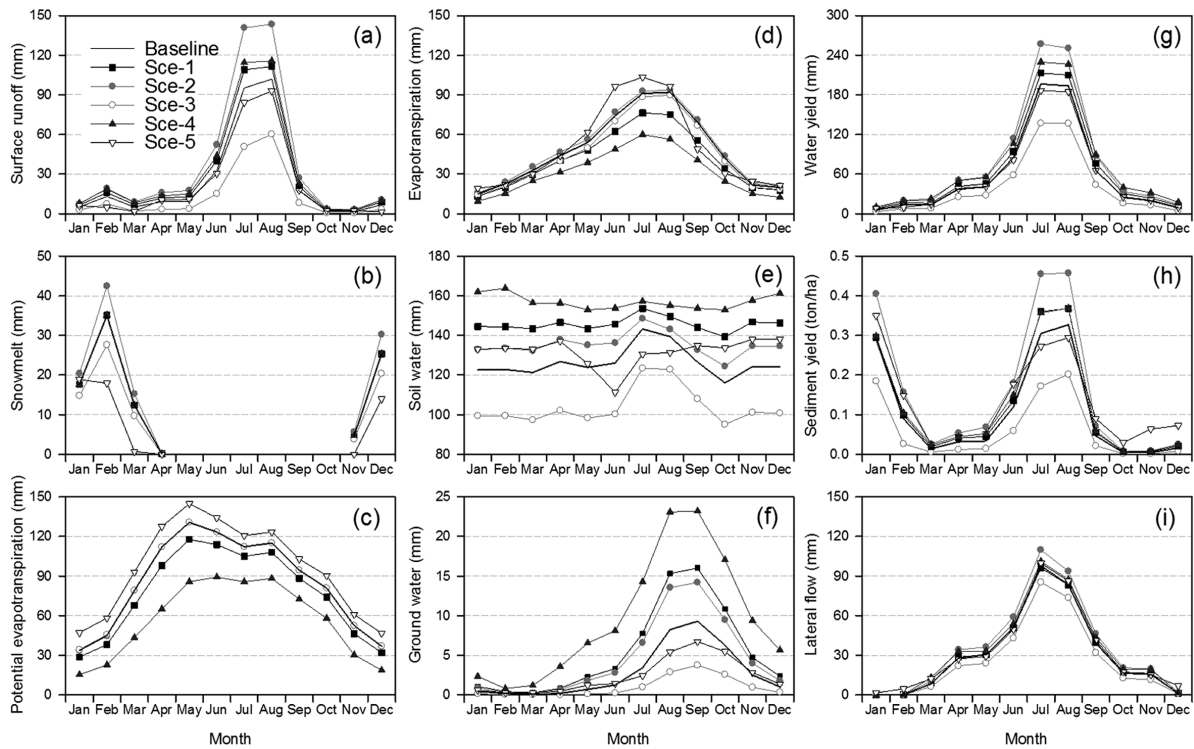


Fig. 6. Impact of climate change on averaged monthly (a) surface runoff (b) snow melt (c) potential evapotranspiration (d) evapotranspiration (e) soil water (f) ground water (g) water yield (h) sediment yield (i) lateral flow predicted for different scenarios (Sce-1~Sce-5) relative to the baseline over the 100-year simulation period.

수등 유역의 물 순환과 유사량 모의결과를 나타낸 것이다.

배중 이산화탄소상태(Sce-1)에서의 경우 유출, 토양함수량, 지하수 함수량, 토양침식량은 증가하였으며, 잠재증발산은 감소하였고, 용설, 측방류흐름에는 영향이 적었다. 배중 이산화탄소 상태가 되면 기공전도도가 감소하고, 이로 인해 식물의 증산량이 감소하여 유출량과 토양함수량은 증가하는 것으로 해석된다(Schulze, 2000). 이러한 결과는 Echhardt and Ulbrich(2003)과 Morison(1987)의 선행연구 결과와 잘 일치하고 있다.

강수량이 20% 증가하는 시나리오(Sce-2)에서는 유출, 용설, 토양함수량, 지하수 함수량, 토양침식량 및 측방류 흐름은 증가하였으나, 잠재증발산에 미치는 영향은 적었다. 강수량 20% 감소 시나리오(Sce-3)의 경우 유출, 용설, 토양함수량, 지하수 함수량, 토양침식량 및 측방류 흐름은 감소하였으나, 잠재증발산에 미치는 영향은 적었다. 습도 5% 증가 시나리오(Sce-4)의 경우 유출, 토양함수량, 지하수 함수량은 증가하였으며, 증발산은 크게 감소하였으며, 용설에 미치는 영향은 적었다. 온도 4°C 증가 시나리오(Sce-5)에서는 유출, 토양함수량, 지하수 함수량은 증가하였으며, 증발산은 크게 감소하였으며, 용설에 미치는 영향은 적었다.

Table 7은 기후인자의 변화에 따른 계절별 변화를 분석하기 위하여 기본결과 값에 시나리오별 변화량을 나타내었다. 항목별로 살펴보면 유출은 강수량이 20% 증가 및 감소하였을 때 각각 변화율이 평균 63.0%, -53.8%로 가장 컸으며, 봄·겨울보다 여름의 유출변화량이 크게 증가하였다. PET는 증발산에 대한 최대 가능 증발산량이기 때문에 강

수량의 변화에는 영향을 받지 않았다. 그러나 습도가 5% 증가하였을 때(Sce-4)는 PET가 감소하였으며, 기온이 증가한 경우(Sce-5)는 PET가 증가하였다. 이것은 Penman-Monteith 방법에서 대기의 증기압 부족량(vapor pressure deficit)이 작아져 PET 역시 감소한 것으로 해석된다. 토양유실량의 경우는 강수의 변화(Sce-2,3)에 따라 20%, -20%에서 각각 65.8%, -55.3%로 변하여 가장 큰 영향을 받았다. 배중 이산화탄소(Sce-1)의 경우 역시 유출이 늘어나 유사량은 평균 23.3% 증가하였으며, 여름철 유출 변화량은 더 컸다. 하천의 측방류 흐름은 온도에 가장 민감하게 반응하여 247.6% 증가하였고 강수의 증감에 따라서는 평균 ±18%로 변화하였으며, 이것을 제외하고는 변화가 크지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 대청댐 유역을 대상으로 SWAT 모델을 구축하고, 유역의 물 순환과 토양유실에 미치는 매개변수에 대한 민감도 분석과 검·보정을 실시하였다. 검증된 모델을 기후변화 영향 인자가 대상유역의 유출량과 토양 유실량에 미치는 영향을 평가하는데 적용하였다. 본 연구를 통해 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 대청호 유역에서 유출량과 침투유출율에 대한 SWAT 모델 매개변수의 민감도 지수는 각각 0.0~0.1, 0.0으로 나타났으며, 유사량과 침투유출율에 대한 민감도 지수는 각각 -0.5~0.7, -0.3~0.5로 나타나 유출량보다는 유사량에 대하여 더 민감하게 반응하였다.

- 2) 유출량은 조도계수(Cn)와 토양증발(ESCO)과 관련된 매개변수에 대하여 민감하였으며, 유사량은 측방흐름 침식(LAT_SED)과 토양보전인자(USLE_P)에 대한 매개변수가 매우 민감하였다.
- 3) 보정기간과 검증기간의 EI는 각각 0.786과 0.578이었으며, R²은 각각 0.756과 0.654로 나타나 SWAT 모형은 대청댐 유역의 장기간 강우-유출 모의해석에 적합한 것으로 판단된다. 그러나 과거 수위-유량 곡선식을 산정함에 있어 해당년도의 특성을 반영하지 못하거나 유역에 산재해 있는 농업용 보나 논과 같은 저류시설의 효과가 유역의 수문응답단위의 구성과정에서 제대로 반영되지 못해 첨두유량에 대하여 과소평가하는 경향을 보였다. 2001~2004년 유사량 모의결과, 모델의 EI와 R²은 각각 0.716과 0.775로 높게 나타났지만, 2001년과 2002년은 과대평가하는 경향을 보였으며, 2004년에는 과소평가하는 경향을 보여 향후 매개변수에 대한 지속적인 보정이 이루어져야 할 것이다.
- 4) 5개의 기후변화 인자에 대하여 민감도 분석을 실시한 결과, 유출량은 강우 20% 증가, 습도 20% 증가, 배중 이산화탄소, 온도 4°C 증가, 강우 20% 감소 시나리오 순으로 민감하게 반응하였다. 유사량은 강우 20% 증가와 강우 20% 감소 시나리오에 의한 영향이 가장 컸으며, 배중 이산화탄소, 습도 5% 증가, 온도 4°C 증가 시나리오의 경우 모두 기본 유사량에 비하여 비슷한 증가 추세를 보였다.
- 5) 연구결과를 종합해 볼 때, 대청호 유역은 미래 이탄화탄소의 농도가 증가할 경우, 유출량은 늘어나며 이로 인하여 토양유실 역시 증가할 것으로 예상된다.
- 6) 기후변화에 대한 유출 및 유사의 민감도 분석 뿐 아니라 모의기간의 검·보정을 바탕으로 신뢰성 있는 기후변화 시나리오를 통하여 유역의 유출 및 토양유실에 대한 연구가 이루어져야 한다.

참고문헌

김병식, 김형수, 서병하, 김남원(2004). 기후변화가 용담댐 유역의 유출에 미치는 영향. *한국수자원학회논문집*, **37**(2), pp. 185-193.

김철결, 김남원(2004). 산림식생에 따른 유역 물수지 평가. *한국수자원학회논문집*, **37**(9), pp. 737-744.

김태순, 정일원, 구보영, 배덕효(2007). 다목적 유전자알고리즘을 이용한 Tank 모형 매개변수 최적화(I): 방법론과 모형구축. *한국수자원학회논문집*, **40**(9), pp. 677-685.

박종윤, 이미선, 이용준, 김성준(2008). SWAT 모형을 이용한 미래 토지이용변화가 수문-수질에 미치는 영향 분석. *대한토목공학회논문집*, **28**(2B), pp. 187-197.

배덕효, 정일원, 권원태(2007a). 수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(I). *한국수자원학회논문집*, **40**(3), pp. 191-204.

배덕효, 정일원, 권원태(2007b). 수자원에 대한 기후변화 영향평가를 위한 고해상도 시나리오 생산(II). *한국수자원학회논문집*, **40**(3), pp. 205-214.

신사철(2000). 기후변화 시나리오에 의한 하천 유황의 해석.

한국수자원학회논문집, **33**(5), pp. 623-634.

안재현, 유철상, 윤용남(2001). GCM 결과를 이용한 지구온난화에 따른 대청댐 유역의 수문환경 변화 분석. *한국수자원학회논문집*, **34**(4), pp. 335-345.

예령, 윤성완, 정세웅(2008). 대청댐 유역 토양 침식량 산정을 위한 SWAT 모델의 적용. *한국수자원학회논문집*, **41**(2), pp. 149-162.

정세웅, 박재호, 윤성완, 배정옥(2005). 대청호 유입 탁수의 수리 및 수질특성. *공동춘계학술발표회 논문집, 한국물환경학회 · 대한상하수도학회*, pp. 375-378.

한국수자원공사(2001~2004). *대청댐 일원 수문기초조사 보고서*.

황준식, 정대일, 이재경, 김영오(2007). 기후변화 영향평가를 위한 월 물수지모형의 적용성 검토. *한국수자원학회논문집*, **40**(2), pp. 147-158.

Allen, R. G., Jensen, M. E., Wright, J. L., and Burman, R. D. (1989). Operational estimates of evapotranspiration. *Agronomy Journal*, **81**, pp. 650-662.

Anderson, E. A. (1976). A point energy and mass balance model of snow cover. NOAA technical Report NWS 19, U.S. Dept. of Commerce, National Weather service.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Mutiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment Part 1: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, **34**(1), pp. 73-89.

Chaplot, V. (2005). Impact of DEM mesh and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions. *Journal of Hydrology*, **312**, pp. 207-222.

Chaplot, V., Saleh, A., and Jaynes, D. B. (2005). Effect of the accuracy of spatial rainfall information on the modeling of water, sediment, and NO₃-N loads at the watershed level. *Journal of Hydrology*, **312**, pp. 223-234.

Choi, Y. (2002). Trends in daily precipitation events and their extremes in the southern region of Korea. *Journal of Environmental Impact Assessment*, **11**, pp. 189-203.

Chung, S. W., Gassman, P. W., Kramer, L. A., Williams, J. R., and Gu, R. (1999). Validation of EPIC for two watersheds in southwest Iowa. *Journal of Environmental Quality*, **28**(3), pp. 971-979.

Easterling, W. E., Rosenburg, N. J., McKenney, M. S., Jones, C. A., Dyke, P. T., and Williams, J. R. (1992). Preparing the Erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effect of CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology*, **59**, pp. 17-34.

Echhardt, K. and Ulbrich, U. (2003). Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology*, **284**, pp. 244-252.

Field, C. B., Jackson, R. B., and Mooney, H. A. (1995). Stomatal responses to increased CO₂: Implications from the plant to the global scale. *Plant Cell Environment*, **18**(10), pp. 1214-1225.

Fontaine, T. A., Klassen, J. F., Cruickshank, T. S., and Hotchkiss, R. H. (2001). Hydrological response to climate change in the Black Hills of South Dakota, USA. *Hydrologiques*, **46**(1), pp. 27-40.

Green, C. H., Tomer, M. D., Di Luzio, M., and Arnold, J. G.

- (2006). Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. *Transactions of the ASAE*, **49**(2), pp. 413-422.
- Gu, R. and Li, Y. (2002). River temperature sensitivity to hydraulic and meteorological parameters. *Journal of Environmental Management*, **66**(1), pp. 43-56.
- Helsel, D. R. and Hirsch, R. M. (1992). *Statistical Methods in Water Resource*, Elsevier, New York.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (1995). In: J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (eds.), *The Science of Climate Change*, 1996. Cambridge University Press, Cambridge, p. 572.
- IPCC (2001). *Climate change 2001 : The Scientific Basis*, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2007). *Climate change 2007 : The Scientific Basis*, IPCC Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- Jha, M., Arnold, J. G., Gassman, P. W., Giorgi, F., and Gu, R. (2006). Climate change sensitivity of water yield in the Upper Mississippi River Basin. *Journal of the American Water Resources Association*, **44**(4), pp. 997-1015.
- Legates, D. R. and McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness of fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resource Research*, **35**(1), pp. 233-241.
- Lenhart, T., Eckhardt, K., Fogrer, N., and Frede, H. G. (2002). Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, **27**(9), pp. 645-654.
- Lenhart, T., Fohrer, N., and Frede, H. G. (2003). Effects of land use changes on the nutrient balance in mesoscale catchments. *Physics and Chemistry of the Earth*, **28**, pp. 1301-1309.
- Medlyn, B. E., Barton, C. V. M., Broadmeadow, M. S. J., Ceulemans, R., De Angelis, P., Foresreuter, M., Freeman, M., Jackson, S. B., Kellomaki, S., Laitat, E., Rey, A., Roberntz, P., Sigurdsson, B. D., Strassemeier, J., Wang, K., Curtis, P. S., and Jarvis, P. G. (2001). Stomatal conductance of forest species after long-term exposure to elevated CO₂ concentrations. *New Phytologist*, **149**(2), pp. 247-264.
- Monteith, J. L. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, **281**(980), pp. 277-294.
- Morison, J. I. L. (1987). Intercellular CO₂ concentration and stomatal response to CO₂. In E. Zeiger, G. D. Farquhar, and I. R. Cowan (eds.), *Stomatal function*. Stanford University Press, Palo Alto, Ca. pp. 229-251.
- Morison, J. I. L. and Gifford, R. M. (1983). Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity. *Plant Physiology*, **71**(4), pp. 789-796.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual model; Part1 - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**(3), pp. 398-409.
- Nearing, M. A., Jetten, V., Baffaut, C., Cerdan, O., Couturier, A., Hernandez, M., Le Bissonnais, Y., Nichols, M. H., Nunes, J. P., Renschler, C. S., Souchere, V., and van Oost, K. (2005). Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, **61**, pp. 131-154.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, Texas.
- Pritchard, S. G., Roger, S. A., Prior, S. A., and Peterson, C. M. (1999). Elevated CO₂ and plant structure: A review. *Global Change Biology*, **5**(7), pp. 807-837.
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Heuck, L. M., and McFarland, A. M. S. (1997). Using APEC to identify alternative practiced for animal waste management, Minnea-polis, MN. ASAE Paper No. 97-2209.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., and Hauck, L. (2001a). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, **37**(5), pp. 1169-1188.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Hauck, L., and Dugas, W. A. (2001b). Application of a watershed model to evaluate management effects on point and nonpoint source pollution. *Transactions of the ASAE*, **44**(6), pp. 1559-1570.
- Schulze, R. (2000). Transcending scales of space and time in impact studies of climate and climate change on agrohydrological responses. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **82**, pp. 185-212.
- Servat, E. and Dezetter, A. (1991). Selection of calibration objective functions in the context of rainfall runoff modeling in a Sudanese savannah area. *Hydrological Sciences Journal*, **36**(4), pp. 307-330.
- Sharpley, A. N. and Williams, J. R. (eds.) (1990). *EPIC-Erosion productivity impact calculator, 1. model documentation*. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.
- Stockle, C. O., Williams, J. R., Rosenburg, N. J., and Jones, C. A. (1992). A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part1-Modification of the EPIC model for climate change analysis. *Agricultural Systems*, **38**(3), pp. 225-238.
- Stonefelt, M. D., Fontaine, T. A., and Hotchkiss, R. A. (2000). Impacts of climate change on water yield in the upper Wind river basin. *Journal of the American Water Resources Association*, **36**(2), pp. 321-336.
- Thomson, A. M., Brown, R. A., Rosenberg, N. J., Izaurrealde, R. C., Legler, D. M., and Srinivasan, R. (2003). Simulated impacts of El Nino/southern oscillation on United States water resource. *Journal of the American Water Resources Association*, **39**(1), pp. 137-148.
- Van Der Perk (1997). Effect of Model Structure on the Accuracy and Uncertainty of Results from Water Quality Models. *Hydrological Processes*, **11**(3), pp. 227-239.
- Wand, S. J. E., Midgley, G. F., Jones, M. H., and Curtis, P. S. (1999). Responses of wild C4 and C3 grass(Poaceae)

- species to elevated atmospheric CO₂ concentrations: A meta-analytic test of current theories and perceptions. *Global change biology*, **5**(6), pp. 723-741.
- Wu, K., Johnston, C. A., Cherrier, C., Bridgham, S., and Shmagin, B. (2006). Hydrologic calibration of the SWAT model in a Great lakes coastal watershed. model validation. American Institute of Hydrologic Annual Meeting & International Conference, Baton Rouge, LA, pp. 15-28.
- Wullschleger, S. D., Tschaplinski, T. J., and Norby, R. J. (2002). Plant water relations at elevated CO₂ - implications for water-limited environments. *Plant, Cell and Environment*, **25**, pp. 319-331.
- Xiaojun, K., Jianping, G., Yi, W., and Cunjie, Z. (2007). Validation of the weather generator CLIGEN with daily precipitation data from the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, **347**, pp. 347-357.