

SWAT 모형을 이용한 미래 기후변화가 설마천 혼효림 유역의 증발산과 토양수분에 미치는 영향 평가

Assessment of Climate Change Impact on Evapotranspiration and Soil Moisture in a Mixed Forest Catchment Using Spatially Calibrated SWAT Model

안 소 라* / 박 근 애** / 장 철 희*** / 김 성 준****

Ahn, So Ra / Park, Geun Ae / Jang, Cheol Hee / Kim, Seong Joon

Abstract

This study is to evaluate the future climate change impact on hydrological components in the Seolmacheon (8.54 km²) mixed forest catchment located in the northwest of South Korea using SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model. To reduce the uncertainty, the model was spatially calibrated (2007~2008) and validated (2009~2010) using daily observed streamflow, evapotranspiration, and soil moisture data. Hydrological predicted values matched well with the observed values by showing coefficient of determination (R²) from 0.74 to 0.91 for streamflow, from 0.56 to 0.71 for evapotranspiration, and from 0.45 to 0.71 for soil moisture. The HadGEM3-RA future weather data of Representative Concentration pathway (RCP) 4.5 and 8.5 scenarios of the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) AR5 (Assessment Report 5) were adopted for future assessment after bias correction of ground measured data. The future changes in annual temperature and precipitation showed an upward tendency from 0.9°C to 4.2°C and from 7.9% to 20.4% respectively. The future streamflow showed an increase from 0.6% to 15.7%, but runoff ratio showed a decrease from 3.8% to 5.4%. The future predicted evapotranspiration about precipitation increased from 4.1% to 6.8%, and the future soil moisture decreased from 4.3% to 5.5%.

Keywords : soil moisture, evapotranspiration, mixed forest, SWAT, RCP climate change scenarios

요 지

본 연구는 SWAT 모형을 이용하여 설마천 혼효림 유역(8.54 km²)을 대상으로 RCP (AR5) 기후변화 시나리오에 따른 수문순환 영향을 평가하였다. 모형의 불확실성을 효과적으로 줄이기 위해 설마천 유역의 2007년부터 실측된 유량, 증발산량 및 토양수분을 이용하여 모형의 보정(2007~2008) 및 검증(2009~2010)을 수행하였다. 모형의 보정 및 검증 결과 유출량의 R²가 0.74~0.91로 분석되었고, 증발산량은 0.56~0.71, 토양수분은 0.45~0.71로 분석되어 토양수분으로부터 증발산이 발생하고 이로 인해 유출까지 영향을 미치는 물수지 현상을 잘 재현하고 있음을 알 수 있었다. 미래 기후자료로 AR5 RCP 4.5, 8.5 시나리오에 대한 모의결과 값을 이용하였고, 사용된 모델은 한반도 전망자료를 지역기후모델을 이용하여 역학적 상세화하여 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 모형이며 오차 보정하여 사용하였다. 기후변화 시나리오 분석 결과 두

* 건국대학교 사회환경시스템공학과 박사과정 (e-mail: ahnsora@konkuk.ac.kr)

Doctoral Student, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

** 워싱턴대학교 사회환경시스템공학과 박사후연구원 (e-mail: parkga@uw.edu)

Post-doctoral researcher, Dept. of Civil Environmental Engineering, University of Washington, Seattle, WA 98195, USA

*** 한국건설기술연구원 수자원연구실 수석연구원 (e-mail: chjang@kict.re.kr)

Senior Researcher, Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang, Gyeonggi-do 411-712, Korea

**** 교신저자, 건국대학교 사회환경시스템공학과 교수 (e-mail: kimsj@konkuk.ac.kr, Tel: 02-450-3749)

Corresponding Author, Professor, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea

가지 시나리오 모두 미래 기온은 0.9~4.2°C 상승하고, 강수량은 7.9~20.4% 증가하였다. 또한 미래 유출량은 0.6~15.7% 증가한 반면에 유출률은 3.8~5.4% 감소하였고, 증발산비는 4.1~6.8% 증가, 토양수분은 4.3~5.5% 감소하였다.

핵심용어 : 토양수분, 증발산, 혼효림, SWAT, RCP 기후변화 시나리오

1. 서 론

IPCC 4차 보고서(IPCC, 2007)에 따르면, 지구온난화로 인하여 지난 100년(1906~2005) 동안 전 세계 평균기온은 약 0.74°C 상승하였으며, 이러한 추세는 1990년 이후 더욱 급격해져 지금도 진행 중인 것으로 보고되고 있으며, 향후에도 지속적으로 진행되고 가속화 될 것으로 판단된다. 지구온난화에 의한 기온상승, 강수일수의 감소와 강수량의 규모 및 패턴의 변화는 유출량의 변화와 증발산량 증가의 원인이 되며 토양수분의 변화가 예상되어 궁극적으로는 수문순환의 변화에 많은 영향을 미치게 된다. 이처럼 가속화 되고 있는 기후변화와 더불어 나타나게 될 수문 순환의 변화는 우선적으로 해결되어야 하는 중요한 문제이며, 효과적인 수자원의 활용을 위해서는 기후변화에 의한 수문순환의 변화에 대한 정확한 파악이 필수적이다(Ahn et al., 2009).

이러한 기후변화에 의한 미래 수문순환의 변화를 예측하고 기후변화에 적응하기 위해서는 우선적으로 수문모형의 정확한 보정을 통해 현재상태의 수문성분의 물리적인 움직임을 재현하는 것이 매우 중요하며, 이후 기후변화 시나리오 및 전지구모형(GCMs, General Circulation Models)을 연계하는 과정을 거치게 된다. 하지만 이러한 과정을 거치면서 불확실성은 점점 커지고 있다. 실측자료의 오차 및 수문모형 자체의 왜곡 등으로 인해 불확실성은 필연적으로 발생하게 되고, 이렇게 발생한 불확실성은 미래 기후변화에 따른 적응전략에 영향을 줄 수밖에 없다. 현재상태의 수문순환을 정확하게 재현하기는 어렵지만, 최대한 불확실성을 줄여나가는 연구가 필요하다. 수문 모형을 이용한 선행연구에서는 실측된 유출량만을 이용하여 매개변수를 조정하여 불확실성 및 오차를 다루어 왔지만, 불확실성의 무수하고 복잡한 원인을 고려해 본다면 이러한 유출량만을 이용한 보정은 한계가 있을 것이며, 모형의 불확실성을 효과적으로 줄이기 위해서는 추가적인 실측자료와의 비교를 통한 보정과정도 필요하다(Refsgaard and Storm, 1996; Kuczera and Mroczkowski, 1998; Bastidas et al., 2003; Seibert and McDonnell, 2003). 이러한 이유로 근래에 와서는, 유출량만을 이용한 보정과 함께 다른

추가 자료를 이용한 보정에 대한 연구가 이루어 졌는데, Hong et al. (2009)은 충주댐유역을 대상으로 하여 NDVI와 토양수분의 상관성분석을 통하여 SWAT 모형의 모의 시 빈약한 토양수분의 실측자료를 보완하고자 하였고, Shin et al. (2012)은 설마천 유역을 대상으로 RHESYS 모형에 이용하여 실측된 유출량, 증발산량, 토양수분량과 MODIS에서 얻어진 총일차생산량과 순광합성량을 모형의 검보정에 이용하였고, Joh et al. (2009)은 설마천 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 유출량만을 보정했을 경우와 유출량, 증발산량, 토양수분량을 동시에 보정했을 경우에 대하여 비교분석을 수행한 바 있다.

최근 수문모형과 기후변화 시나리오를 연계하여 기후변화에 의한 수문순환 영향평가에 관한 많은 연구가 활발히 진행 중이다. 국내에서는 수문모형과 GCM(General Circulation Model)을 연계하여 기후변화에 적용한 연구로 Ahn et al. (2008)은 SLURP 모형과 SRES A2, B2 기후변화 시나리오 및 토지이용, 식생변화를 고려하여 하천 유출에 미치는 영향을 분석하였고, Lee et al. (2008)은 안성천 유역을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 SRES A2, B2 기후변화 시나리오 및 토지이용 시나리오를 적용하여 유역의 수문 및 수질 영향평가를 수행하였다. Park et al. (2009)은 충주댐 유역을 대상으로 SWAT 모형과 SRES A2, A1B, B1 기후변화 시나리오를 이용하여 미래 수문학적 거동 및 하천수질 변화를 전망하였고, Ahn et al. (2009)은 경안천 유역을 대상으로 SLURP 모형과 SRES A2, A1B, B1 기후변화 시나리오를 이용하여 유역의 유출, 증발산, 토양수분, 지하수 충전량의 수문순환변동을 분석하였다. Park et al. (2010)은 안성천 유역을 대상으로 SLURP 모형과 SRES A2, B2 기후변화 시나리오를 이용하여 기후변화가 유역의 수문순환 변동뿐 아니라 농업용 저수지의 유입량 및 저수량에 미치는 기여도를 평가하였다. 국외에서도 다양한 수문모형과 GCM을 연계하여 기후변화에 의한 유출의 영향평가에 관한 연구(Jha et al. 2006; Andersson et al. 2006; Merritt et al. 2006; Zhang et al. 2007;)가 진행 중이며, 최근에는 유출과 수질에 미치는 영향평가에 관한 연구(Bouraoui et al. 2002; Varanou et al. (2002); Bouraoui et al. 2004; Marshall and

Randhir 2008; Park et al. 2011)가 활발히 진행되고 있다.

본 연구의 목적은 수문모델링을 통해 다양한 수문변수의 실측자료를 이용하여 현재상태의 수문순환을 재현하는 과정에서 불확실성을 줄이고, 신 기후변화 시나리오에 의한 유역의 수문순환 영향을 평가하는데 있다. 설마천 시험유역의 실측자료(유출량, 증발산, 토양수분)를 이용하여 SWAT 모형의 보정 및 검증을 실시하고, RCP (AR5) HadGEM3-RA 모형 4.5, 8.5 시나리오에 대한 모의결과 값을 SWAT 모형에 적용하여 기후변화에 따른 수문순환을 분석하였다. Fig. 1은 본 연구의 흐름도이다.

2. 재료 및 방법

2.1 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 모형이다. 이 모형은 물리적 기반의 준분포형 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관

리 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 and Allen, 1996).

SWAT 모형에서 일별 유출량은 SCS 방법을 통하여 산정하며, 측방 유입량은 Kinematic Storage Model을 이용하고 침투는 10개 이하의 층으로 나누어 선형저수량 추적기법을 이용하여 계산한다. 잠재증발산량의 산정에는 Hargreaves 방법, Priestly-Taylor 방법, Penman-Monteith 방법을 이용하며, 작물과 토양의 증발산을 분리하여 모의하기 위해 Ritchie 방법을 이용한다. SWAT 모형에서 사용되는 물수지 방정식은 다음과 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($mm H_2O$), SW_0 는 i 일의 초기 토양수분량($mm H_2O$), 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 토양 면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량($mm H_2O$), Q_{gw} 는 i 일의 회귀수

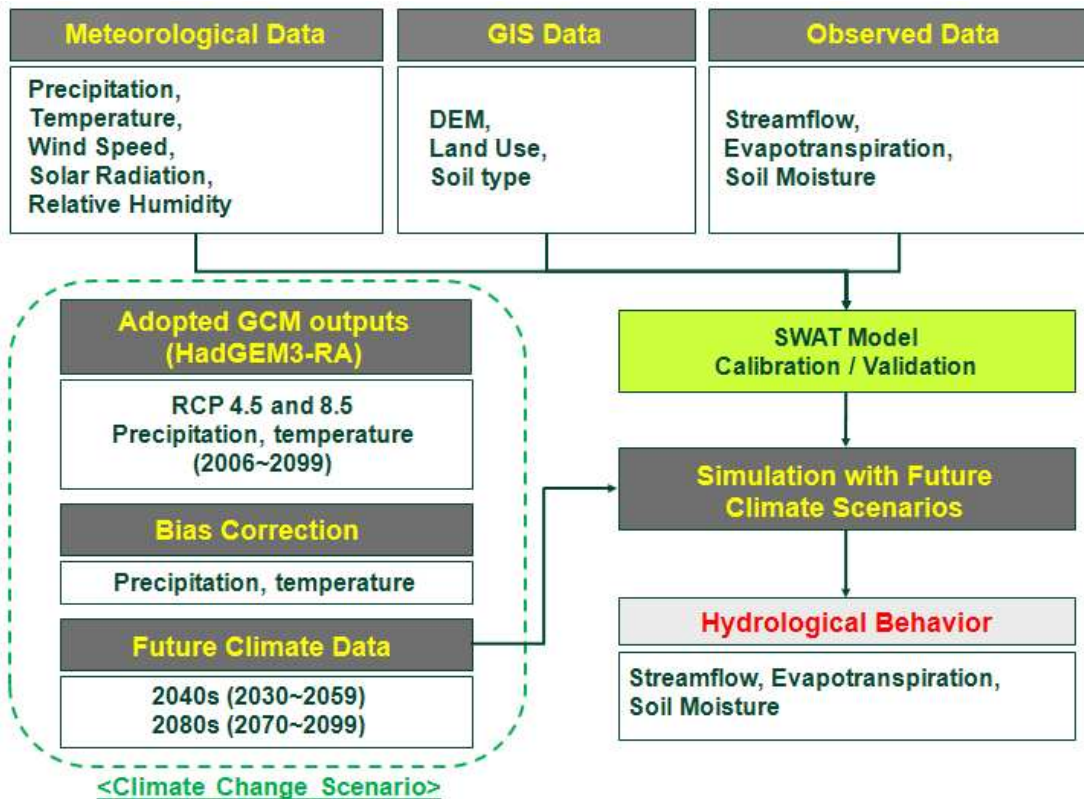


Fig. 1. Flowchart of Study Procedure

량($mm H_2O$)이다.

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. SWAT2005)을 제공하고 있다. 본 연구에서는 ArcSWAT2005 버전을 이용하여 분석을 실시하였다.

2.2 대상유역

본 연구의 대상 유역인 설마천 유역(Fig. 2)은 경기도 파주시 적성면에 위치하고 있으며, 면적은 대략 8.54km², 유로연장은 5.8km, 유로경사가 2%인 전형적인 급경사 산지 유역이다. 유역의 연평균 강수량은 1,210mm이며, 연평균 기온은 11.5°C이다. 유역의 87% 이상은 산림으로 주로 20~30년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되어 있고, 표토는 얇은 편으로 함양능력이 대단히 낮으며, 산지 사면에 산재한 다량의 돌과 자갈은 집중호우 시 토석류를 유발한다. 설마천 시험유역은 2007년부터 한국건설기술연구원 유량조사사업단에 의해 유역의 증발산 및 토양수분의 측정이 동시에 이루어지고 있는 유역으로 축적된 실측자료를 연구에 이용하였다.

2.3 GIS/RS 자료 및 수문기상자료

SWAT 모형 구동을 위한 공간자료로 1:5,000 NGIS (National Geographic Information System) 수치지도를 사용하여 해상도 30×30m의 DEM (Digital Elevation

Model)을 구축하였다(Fig. 3(a)). 토지이용도는 Landsat TM 위성영상을 이용하여 2004년 토지이용도를 구축하였으며 주거지, 교통지, 밭, 활엽수림, 침엽수림, 혼효림, 나지 및 기타초지의 8개 항목으로 분류하였다(Fig. 3(b)). 토양 특성 입력을 위해 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 정밀토양도를 이용하였고 유역 내에는 총 7가지 토양통에 대한 3가지 토양종류(sandy loam, silt loam, loam)로 이루어져 있다(Fig. 3(c)). 설마천의 토지이용은 산림이 87.1%로 가장 많고 밭 4.6%, 초지 3.8% 순이며, 토양종류는 sandy loam이 83.1%, loam이 14.7%를 차지한다.

기상자료는 강수량(mm), 최저, 최고온도(°C), 풍속(m/sec), 상대습도(%), 일사량(MJ/m²)이 필요하며, 1995년부터 현재까지 한국건설기술연구원의 시험 유역으로 운영되고 있는 설마천 유역에는 우량관측소, 수위관측소 및 기상 관측소가 설치되어(Fig. 2) 양질의 수문자료를 얻고 있다. 이 중 모형의 신뢰성을 높이기 위하여 최근 자료인 2007년부터 2010년까지의 기상자료를 이용하여 입력 자료를 구축하였으며, 대상유역에서 측정되지 않는 기상자료는 인접한 동두천기상대의 자료를 이용하였다. Table 1에는 SWAT 모형 구동을 위한 공간자료 및 기상자료와 모형 검보정을 위한 실측 유출, 증발산 및 토양수분자료를 정리하였다.

2.4 실측 증발산 및 토양수분자료

본 연구에서는 실측 증발산 및 토양수분자료를 모형의 검보정을 위하여 활용하였다. 물 순환 연구 및 물수지 평

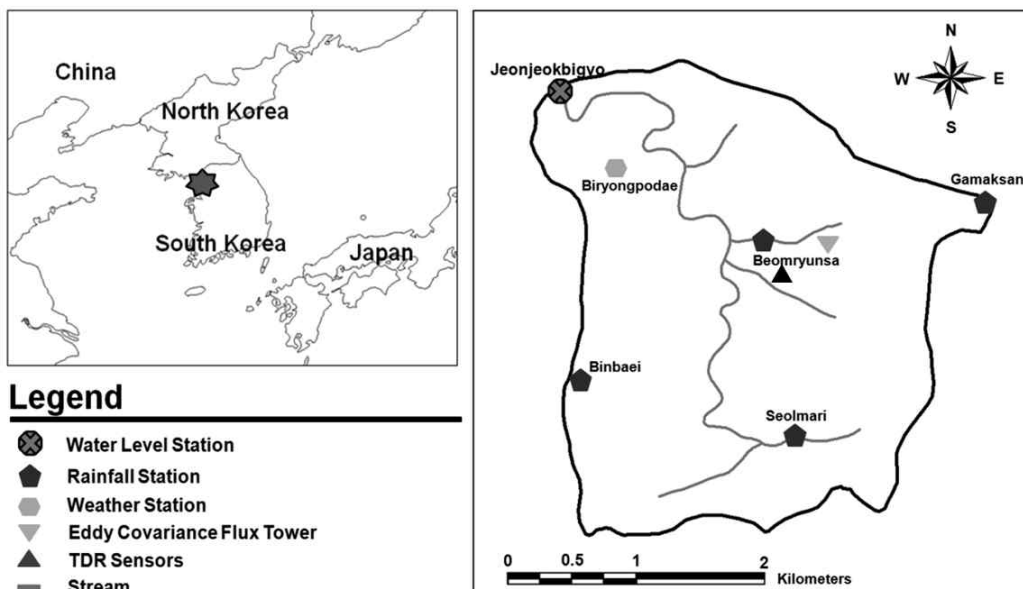


Fig. 2. The Study Watershed

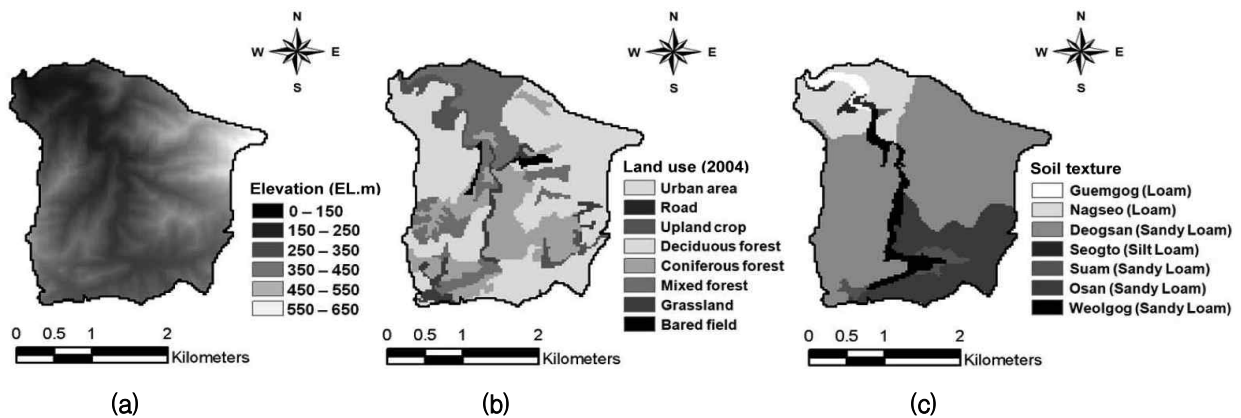


Fig. 3. GIS and RS Data; (a) DEM, (b) Land Use, and (c) Soil Properties

Table 1. Data Sets for SWAT Model Parameterization

Data Type	Source	Scale / Period	Data Description / Properties
Topography	Korea National Geography Institute	30 m	Digital Elevation Model (DEM)
Soil	Korea Rural Development Administration	1: 25,000	Soil classifications and physical properties viz. texture, porosity, field capacity, wilting point, saturated conductivity, and soil depth
Land use	2004 Landsat TM satellite Image	1: 25,000	Landsat land use classification (8 classes)
Weather	Korea Institute of Construction Technology / Water Management Information System	2007~2010	Daily precipitation, minimum and maximum temperature, mean wind speed and relative humidity data
Streamflow	Korea Institute of Construction Technology	2007~2010	Daily streamflow data at watershed outlet
Evapotranspiration	Korea Institute of Construction Technology / Yonsei Univ.	2007~2010	Daily evapotranspiration data at mixed forest area
Soil moisture	Korea Institute of Construction Technology	2007~2010	Bihourly soil moisture data at mixed forest and sandy loam area

가에 있어 증발산 및 토양수분 함량은 수문학적으로 중요한 부분을 차지하지만 관측 값 보다는 단순한 가정이나 경험식에 의한 추정 값들을 사용하고 있어 자료의 신뢰성에 문제가 있을 수 있다. 이러한 문제점에 대한 정량적 규명을 위해 한국건설기술연구원 유량조사 사업단에서는 기초수문자료 구축사업의 일환으로 2007년 6월부터 지속적으로 설마천 유역에 대하여 우량, 수위, 유량, 증발산 및 토양수분을 동시에 측정하고 있다.

증발산은 에디 공분산 방법(Eddy-Covariance Flux System)을 사용하여 한반도의 대표적 식생 기능형태의 하나인 혼효림에서 관측되었다. 설마천 에디 공분산 타워

는 경기도 파주시 적성면의 마지리와 설마리에 20m 높이의 위치에 설치되었으며, 설마천 유역에서 중류부에 위치한다(Kwon et al., 2009). 이 방법은 균질하고 편평한 지역에서 난류 플럭스 항만을 측정하여 증발량을 추정하는 미기상학적 방법이다. 이러한 방법으로 측정된 증발산량은 연세대학교 대기과학과에서 후처리 및 보정 과정을 거쳤으며, 그 자료를 제공받아 이용하였다. 토양수분은 장기간 토양수분의 확보에 신뢰성을 인정받은 TDR (Time Domain Reflectometry)을 이용하여 측정되었다. 장비는 토양이 건조하면 전자기 파동이나 신호가 느리게 전달되고 수분이 충분하면 그 신호가 빠르게 전달되는 유전 성질을 이

용한 것으로 탐침을 땅속에 설치하여 신호를 보내고 신호가 탐침 끝에서 본체로 돌아오는 시간을 토양수분함량과 관계 지어 규명하는 방법이다. TDR 탐침은 사양토(sandy loam) 덕산 토양통 지점의 토양층 10 cm, 30 cm, 60 cm의 다양한 깊이에 매설되어 2시간 간격으로 토양수분을 관측하였다.

증발산 및 토양수분 관측지점 및 관측방법은 Fig. 4에 나타내었으며, 2007년 6월부터 관측된 관계로 2008년부터 2010년까지의 연간 강수량, 토양수분 관측 자료를 살펴보면, 관측된 총 강수량에 대한 증발산량의 비는 2008년, 2009년, 2010년이 각각 32%, 30%, 25%로 평균 29%를 차지하는 것으로 분석되었다(Fig. 5). 이는 광릉 산림유역의 활엽수림의 강수대비 증발산(약 25%)에 가깝다(Kwon et al., 2009). Fig. 6은 3개년(2008~2010) 동안 비교적 강수량이 많은 시기인 4월부터 10월까지의 관측된 강수, 증발산, 토양수분의 변동을 연도 별로 비교한 그림이다. 전체적으로 증발산량은 크기 및 감소패턴이 모든 해에서 비슷하게 나타났고, 설마천 혼효림의 성장기(7~9월) 일평균 증발산량은 2.6mm로 분석되었다. 토양수분은 평균적으로 14% 수준을 유지하면서 강수량에 의존하는 패턴을 보였으며, 특히 연 강수량이 비교적 적었던 2009년과 2008년에 비해 2010년이 훨씬 높은 값을 나타내었다.

2.5 AR5 RCP 기후변화 시나리오 및 오차보정

IPCC 5차 평가보고서(AR5)의 결과인 RCP (Represent-

tative Concentration Pathway) 시나리오는 AR4에서 사용된 이산화탄소 농도에 따른 시나리오인 SRES A2, A1B, B1 등에 대응하는 새로운 시나리오이다. RCP 시나리오는 최근의 온실가스 농도변화 경향을 반영하였으며, 해상도 등을 업그레이드하였다. RCP 시나리오는 대표 온실가스 농도를 이용하여 2.6, 4.5, 6.0, 8.5의 4개 시나리오를 제시하고 있으며, 이중 RCP 4.5 (CO₂ 540 ppm), RCP 8.5 (CO₂ 940 ppm) 시나리오를 이용하였다. RCP 4.5는 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우이며, RCP 8.5는 현재 추세(저감 없이)로 온실가스가 배출되는 시나리오이다. 사용된 모델은 HadGEM3-RA 모형이며 기상청에서 제공하는 지역기후모델을 이용하여 역학적 상세화된 한반도 전망자료를 사용하였다.

기후모델이 현재 기후를 잘 모사(Simulation)할 수 없다면 미래 기후를 전망한 것에 대해 확인할 수 없기 때문에(Viner and Mayer, 1994) 기후모델의 결과물을 연구에 사용할 때에는 신뢰성을 높이기 위하여 기후모델 결과를 현재 관측된 자료와 비교하여 확인하는 과정이 필요하다(Carter et al., 1999). 기상청에서 제공하는 한반도 전망자료인 HadGEM3-RA 모형 4.5, 8.5 시나리오 자료(2006~2009년)와 설마천 유역의 온도 및 강수량자료(2002~2010년)를 비교해본 결과 2006~2010년 중복되는 기간에 대하여 최고온도는 현재보다 낮게 추정되었고, 최저온도는 다소 높게 추정되었으며, 강수량의 경우 일률적으로 낮게 추정된 것을 확인할 수 있었다. 따라서 가장 중요한 상태

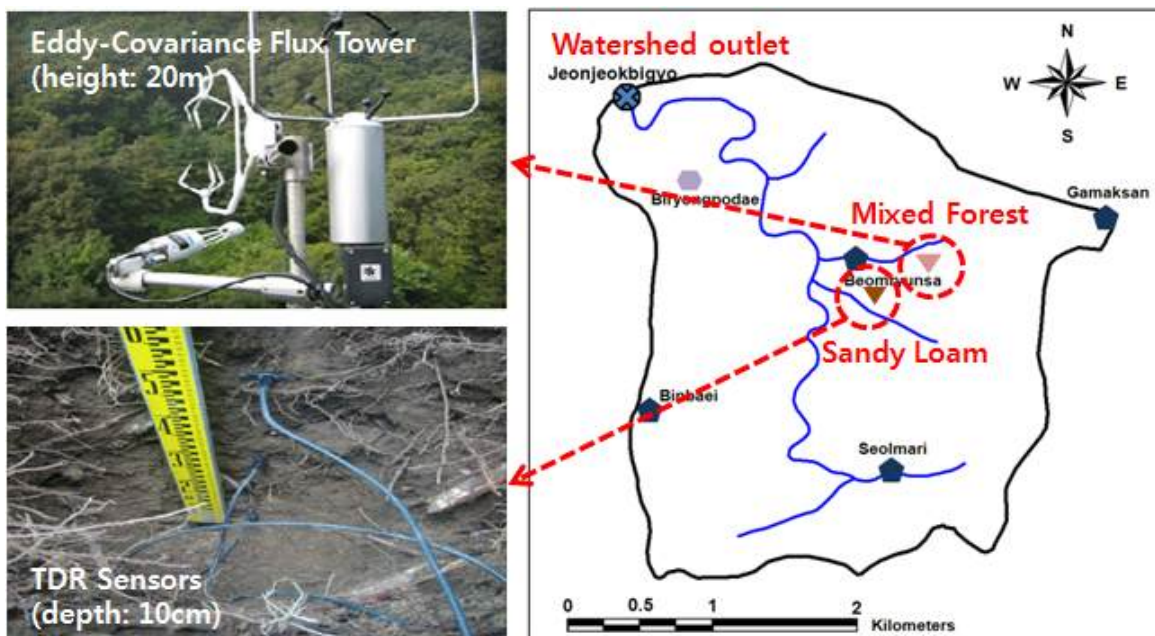


Fig. 4. Eddy-Covariance Flux Tower and TDR Sensors

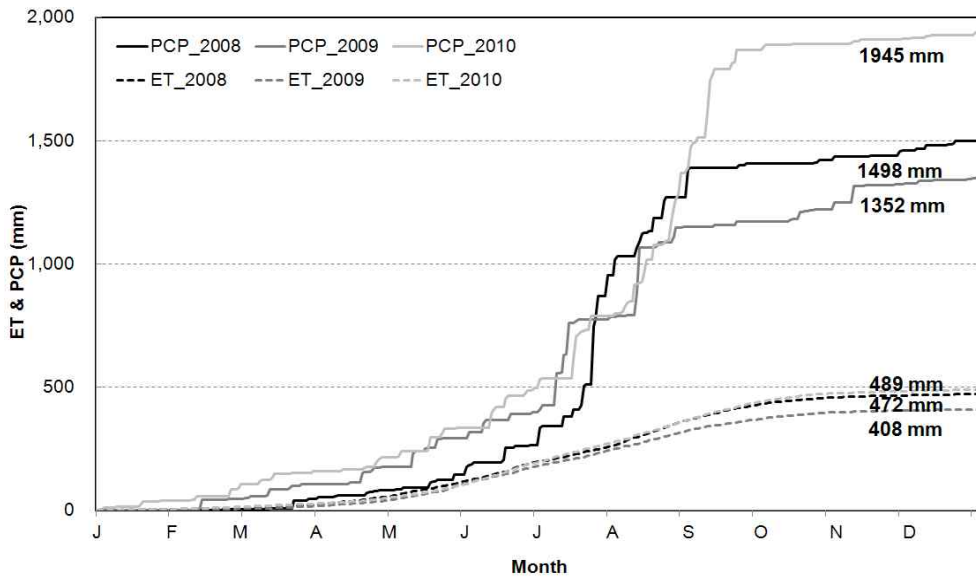


Fig. 5. Cumulative Evapotranspiration (ET) and Precipitation (PCP) from 2008 to 2010

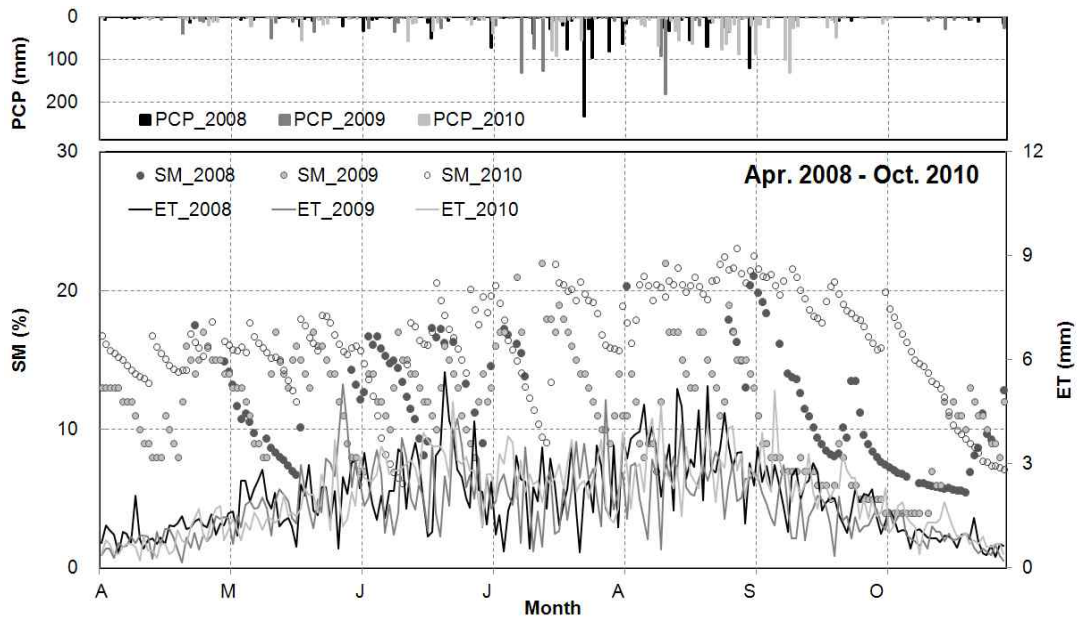


Fig. 6. Comparison of Daily Evapotranspiration (ET), Precipitation (PCP) and Soil Moisture (SM) from April 2008 to October 2010

변수인 온도, 강수 자료를 이용하여 다음의 방법으로 통계적인 유사성을 가지도록 보정하였다(Droogers and Aerts, 2005). 온도의 경우,

$$T'_{GCMfut} = T_{meas} + (\overline{T_{GCMfut}} - \overline{T_{GCMhis}}) \quad (2)$$

여기서, T'_{GCMfut} 는 보정된 미래의 온도, T_{meas} 는 과거 30년 기준기간 동안 관측된 온도, $\overline{T_{GCMfut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 온도의 평균, $\overline{T_{GCMhis}}$ 는 과거 기준기간 동안의

GCM에서 모의된 온도의 평균을 말한다. 강수량의 경우,

$$P'_{GCMfut} = P_{meas} \times (\overline{P_{GCMfut}} / \overline{P_{GCMhis}}) \quad (3)$$

여기서, P'_{GCMfut} 는 보정된 미래의 강수량, P_{meas} 는 과거 30년 기준기간 동안 관측된 강수량, $\overline{P_{GCMfut}}$ 는 GCM에서 모의된 미래 강수량의 평균, $\overline{P_{GCMhis}}$ 는 과거 기준기간 동안의 GCM에서 모의된 강수량의 평균을 말한다. 이 기법에 의해 각 시나리오별로 추출된 보정계수는 Table 2와

같다. 온도보정 결과 최고온도는 관측 자료에 비해 낮게 추정되어 4.5, 8.5 시나리오에 대하여 각각 0.98°C, 0.98°C 만큼 더해주고, 최저온도의 경우에는 관측 자료에 비해 일률적으로 높게 추정되어 4.5, 8.5 시나리오에 대하여 각각 -2.13°C, -1.88°C 만큼 더해주어 보정하였다. 강수보정 결과 4.5, 8.5 시나리오 모두 과소 추정되어 각각 1.28, 1.39 만큼 곱해 주어 보정하였다. Fig. 7에는 보정된 4.5, 8.5 시나리오의 최고온도, 최저온도 및 강수량을 보정 전과 비교하여 나타내었다. 그 결과 다소 높게 또는 낮게 모의되었던 온도는 관측 값과 유사하게 보정되었고 강수량 역시 관측 강수의 패턴을 잘 반영하도록 보정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SWAT 모형의 보정 및 검증

본 연구에서는 SWAT 모형의 보정 및 검증을 위해 설마천 유역의 각 수문성분(유출, 증발산, 토양수분)의 실측 자료를 이용하였다. 증발산량 및 토양수분은 신뢰할 만한 실측자료가 각각 2007년 9월 및 2007년 6월부터 2008년 12월까지 수집되었으므로 그 기간 동안의 실측값과 모의 값을 비교 및 분석하였다. 2004~2005년을 초기구동기간(warm-up period)으로 설정하였으며, 유출, 증발산 및 토양수분이 동시에 측정된 2007~2008년을 보정하였고, 2009~2010년을 검증하였다. 모형의 적용성 평가를 위하여 유

Table 2. Calculated Bias Correction Factor by GCM Data

Scenarios		Maximum temperature	Minimum temperature	Precipitation
HadGEM3-RA	4.5	0.98	-2.13	1.28
	8.5	0.98	-1.88	1.39

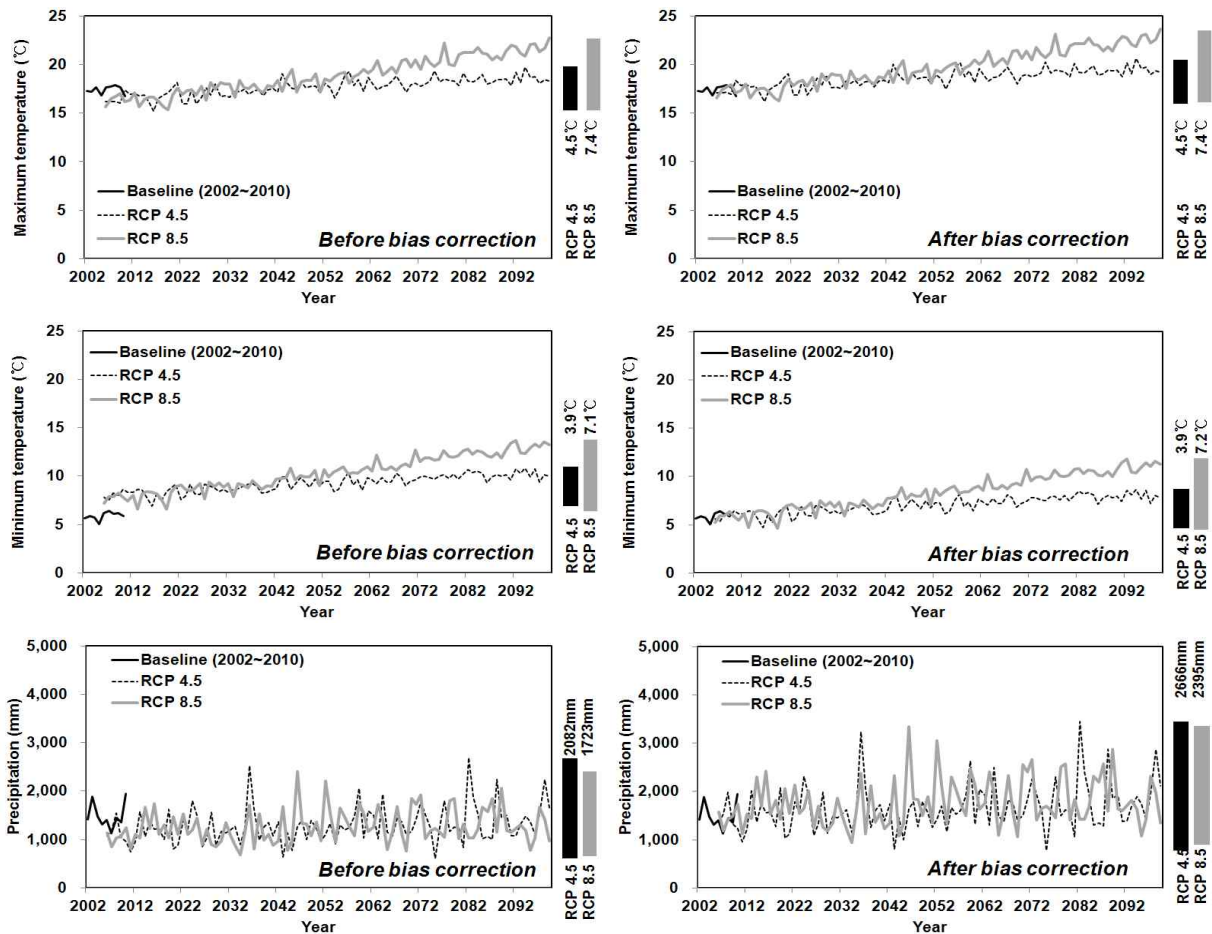


Fig. 7. Adjusted Temperature and Precipitation Data for GCM Data using Historical Observed Data

출량에 대하여 결정계수(R^2) 및 Nash and Sutcliffe (1970)가 제안한 모형효율계수(Model Efficiency, ME)를 사용하였고 증발산량 및 토양수분에 대해 결정계수(R^2)를 산정하였다. 유출량의 검보정은 유역출구지점의 자료를 이용하여 실시되었고, 증발산량에 대한 검·보정은 유역의 중류부에 위치하는 혼효림의 플렉스타워의 에디공분산 시스템을 이용하여 측정된 자료를 이용하였으며, 토양수분에 대한 검·보정은 설마천 유역 사양토(덕산 토양통) 지점에서 TDR 센서를 이용하여 측정된 자료를 이용하였다. 모의 옵션으로 지표유출은 SCS 유출곡선법, 증발산량 산정은 Penman-Monteith 방법, 하도추적은 Muskingum 방법을 이용하였다.

모형의 보정방법은 유출량, 증발산량 및 토양수분을 기준으로 먼저 유출에 관한 매개변수를 조정한 뒤 각 수문성분에 대한 결과를 도출하고, 이어서 증발산량 및 토양수분에 관련된 매개변수를 조정하여 시행착오법으로 보정을 수행하였다. 이미 Joh et al. (2009)의 연구에 의하면 유출량만을 가지고 보정했을 경우와 증발산 및 토양수분을 동시에 보정했을 경우를 비교하여 모형의 적용성을 평가한 결과 불확실성이 감소되는 것으로 분석된 바 있다. 보정을 위한 10개의 매개변수 중 유출에 관련된 5개의 매개변수 중 CN2, GWQMN, GW_DELAY, GW_REVAP, Surlag 순으로 민감하게 반응하였고, 증발산량 관련 매개변수로는 ESCO, EPCO, CANMX, 토양수분 관련 매개변수로는 ESCO, SOL_AWC, SOL_BD, CANMX를 선정하였다. 설마천 유역은 총 46개의 HRU로 구성되었으며, 검보정 시 유역 증발산 및 토양수분은 해당 관측기기가 설치된 지점의 HRU 값을 추출하여 비교하였다. SWAT 모형의 토양 데이터베이스에 따라 토양층 깊이는 100 mm로 설정하였으며, 혼효림 식생높이는 20 m로 설정하였다(Fig. 8). Table 3에는 보정에 사용된 매개변수를 정리하였으며, 보정 및 검증 결과는 Tables 4 and 5, Fig. 9와 같다. SWAT에서는

강수량에서 지표수를 뺀 나머지 양은 토양표면 아래로 침투되고, 이 양은 기존 토양수분량에 추가되며 포장용수량(field capacity)을 초과하는 토양수분량은 측방흐름과 침투량으로 이동하게 된다. 나머지 토양수분량은 식생과 기상조건에 따라 영구위조점(wilting point)에 도달할 때까지 증발산으로 토양층 내에서 제거된다. 유효토양수분량(Available water capacity)은 포장용수량(field capacity)에서 영구위조점(wilting point) 사이의 수분함량으로 SWAT에서는 SOL-AWC (available water capacity of the soil layer) 값을 매개변수로 사용자가 직접 입력할 수 있으며, 본 연구에서는 그 값을 0.18로 조정하였다. Fig. 9의 토양수분 모의 결과와 같이 대체적으로 실측 토양수분을 잘 모의하고 있으나 약 18%선 이상을 넘지 못하는 현상은 이 때문인 것으로 판단된다. 보정 및 검증 결과 유출량의 모형효율계수는 0.62~0.86, R^2 는 0.74~0.91로 나타났고, 증발산량의 R^2 는 0.56~0.71, 토양수분의 R^2 는 0.45~0.71로 나타났다.

3.2 RCP 기후변화 시나리오에 따른 유출, 증발산, 토양수분 영향평가

본 연구에서는 설마천 유역의 기후변화 시나리오 적용에 따른 유역의 각 수문성분(유출, 증발산, 토양수분)의 영향을 평가하기 위해 앞서 오차가 보정된 RCP 시나리오 자료를 SWAT 모형에 적용하였다. 이때, Baseline 기간은 검보정 기간(2007~2010)과 동일하며 미래 분석기간은 2040s(2021~2060), 2080s(2061~2099)의 2개 기간으로 구분하여 분석하였다.

미래 최고기온은 4.5 시나리오에서 2040s와 2080s에 각각 0.9°C, 1.8°C 상승하였고, 8.5 시나리오에서 2040s와 2080s에 각각 1.5°C, 4.2°C 상승하는 것으로 나타났다. 연강수량은 4.5 시나리오에서 2040s와 2080s에 각각 7.9%, 18.4% 상승하였고, 8.5 시나리오에서 2040s와 2080s에 각

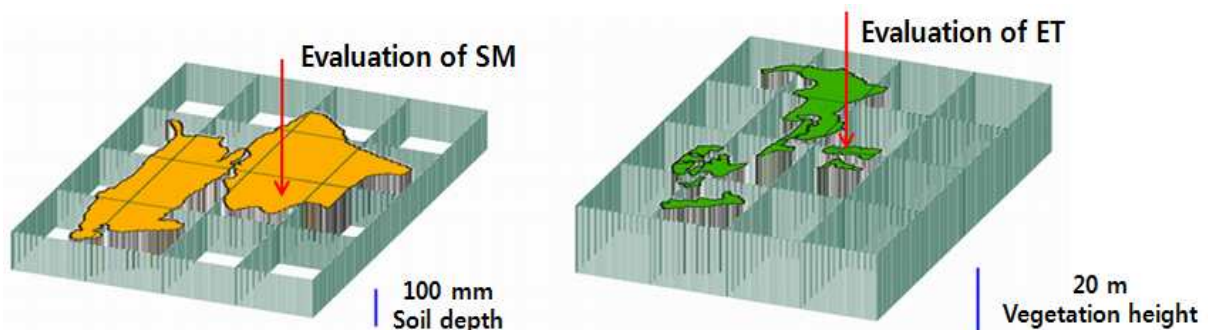


Fig. 8. SWAT Model Input Parameters for Evapotranspiration and Soil Moisture

Table 3. The Calibrated SWAT Model Parameters

Parameter	Definition	Bounds		Sensitivity Joh et al. (2011)	Adjusted Value	Value Used in Literature			
		LB	UB			Zang et al. (2007)	Muleta and Nicklow (2005)	Galvan et al. (2009)	Joh et al. (2011)
Streamflow (Q)									
CN2	SCS curve number for moisture condition	35	98	High	-	-4to+2	-	-2	0 to+4
Surlag	Surface runoff lag coefficient	1	24	Medium	24	-	-	-	24
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow	0	100	High	0	-	-	-	0
GW_DELAY	Groundwater delay	0	500	High	100	-	-	1	100
GW_REVAP	Groundwater revap coefficient	0.02	0.2	Medium	0.2	-	-	0.2	0.2
Evapotranspiration (ET)									
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	High	0.01	0.4	0.0882	0.01	0.01
EPCO	Plant uptake compensation factor	0	1	High	1	0.2	1	-	1
CANMX	Maximum canopy storage	0	100	High	10	-	-	-	5
Soil moisture (SM)									
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0	1	High	0.01	0.4	0.0882	0.01	0.01
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	0	1	High	0.18	-	-	+0.04	0.15
SOL_BD	Moist bulk density	0.9	2.5	High	1.6	-	-	-	1.6
CANMX	Maximum canopy storage	0	100	High	10	-	-	-	5

Table 4. Summary of Model Calibration and Verification for Streamflow

Year	P (mm)	Q (mm)		QR (%)		ME	R ²	Note
		Obs.	Sim.	Obs.	Sim.			
2007	1,262.2	761.0	763.8	0.60	0.61	0.62	0.74	C
2008	1,498.3	942.6	992.1	0.63	0.66	0.77	0.78	C
2009	1,351.7	1,009.0	946.7	0.74	0.70	0.86	0.91	V
2010	1,944.9	1,704.7	1,620.2	0.88	0.83	0.82	0.79	V
Mean	1,514.3	1,102.1	1,080.8	0.71	0.70	0.77	0.81	-

P: precipitation, Q: runoff, QR: runoff ratio, C: calibration, V: verification.

Table 5. Summary of Model Calibration and Verification for Evapotranspiration and Soil Moisture

Year	P (mm)	ET (mm)			SM (%)			R ²		Note
		Period	Obs.	Sim.	Period	Obs.	Sim.	ET	SM	
2007	1,262.2	Sept.-Dec.	108.0	77.5	Jun.-Dec.	13.7	14.3	0.58	0.71	C
2008	1,498.3	Jan.-Dec.	471.7	378.8	Jan.-Dec.	11.7	13.4	0.56	0.45	C
2009	1,351.7	Jan.-Dec.	408.4	370.4	Jan.-Dec.	12.1	14.3	0.67	0.55	V
2010	1,944.9	Jan.-Dec.	489.4	369.1	Jan.-Dec.	15.3	14.8	0.71	0.56	V
Mean	1,514.3	-	369.6	289.9	-	13.2	14.2	0.63	0.57	-

ET: evapotranspiration, SM: soil moisture, C: calibration, V: verification.

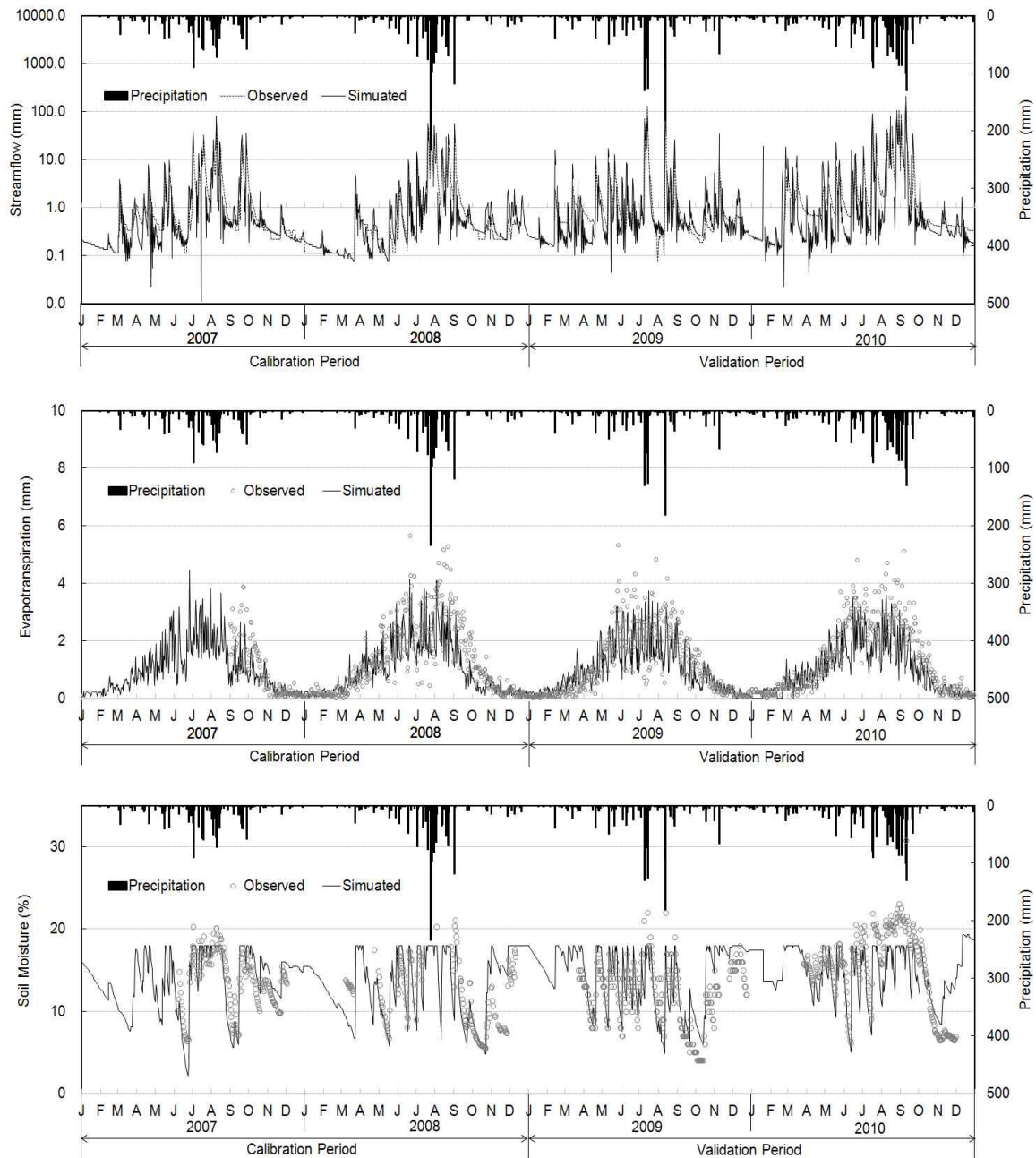


Fig. 9. The SWAT Calibration and Verification Results using Observed Data (streamflow, evapotranspiration and soil moisture)

각 15.1%, 20.4% 상승하였다. 계절별로 변화 패턴을 살펴 보면 봄철(3~5월)과 겨울철(12~2월) 강수량이 특히 증가하였고, 여름철(6~8월)은 7월에 크게 증가하고 8월에 크게 감소하여 변동성이 큰 것으로 분석되었다. 유출량의 경우 강수량의 변화에 직접적인 영향을 받아 4.5 시나리오에서 2040s와 2080s에 각각 0.6%, 14% 증가하였고, 8.5 시나리오에서 2040s와 2080s에 각각 9.8%, 15.7% 증가하는 것으로 분석되었다. 강수량에 대한 증발산비는 현재

25.3%에 비해 4.1~6.8% 증가하였고, 토양수분은 현재 14%에 비해 4.3~5.5% 정도 감소하였다. 증발산량과 토양수분의 변화 패턴은 계절적으로 변화가 크지 않고 매월 비슷한 수준으로 각각 증가, 감소하였다. 최근 온실가스 농도 변화경향을 반영한 RCP 기후변화 시나리오는 모든 시나리오에서 강수량이 증가함에 따라 유출량이 증가하는 것으로 분석되었지만, 유출률은 현재에 비해 3.8~5.4% 감소하였으며, 유출률의 감소와 온도의 상승으로 증

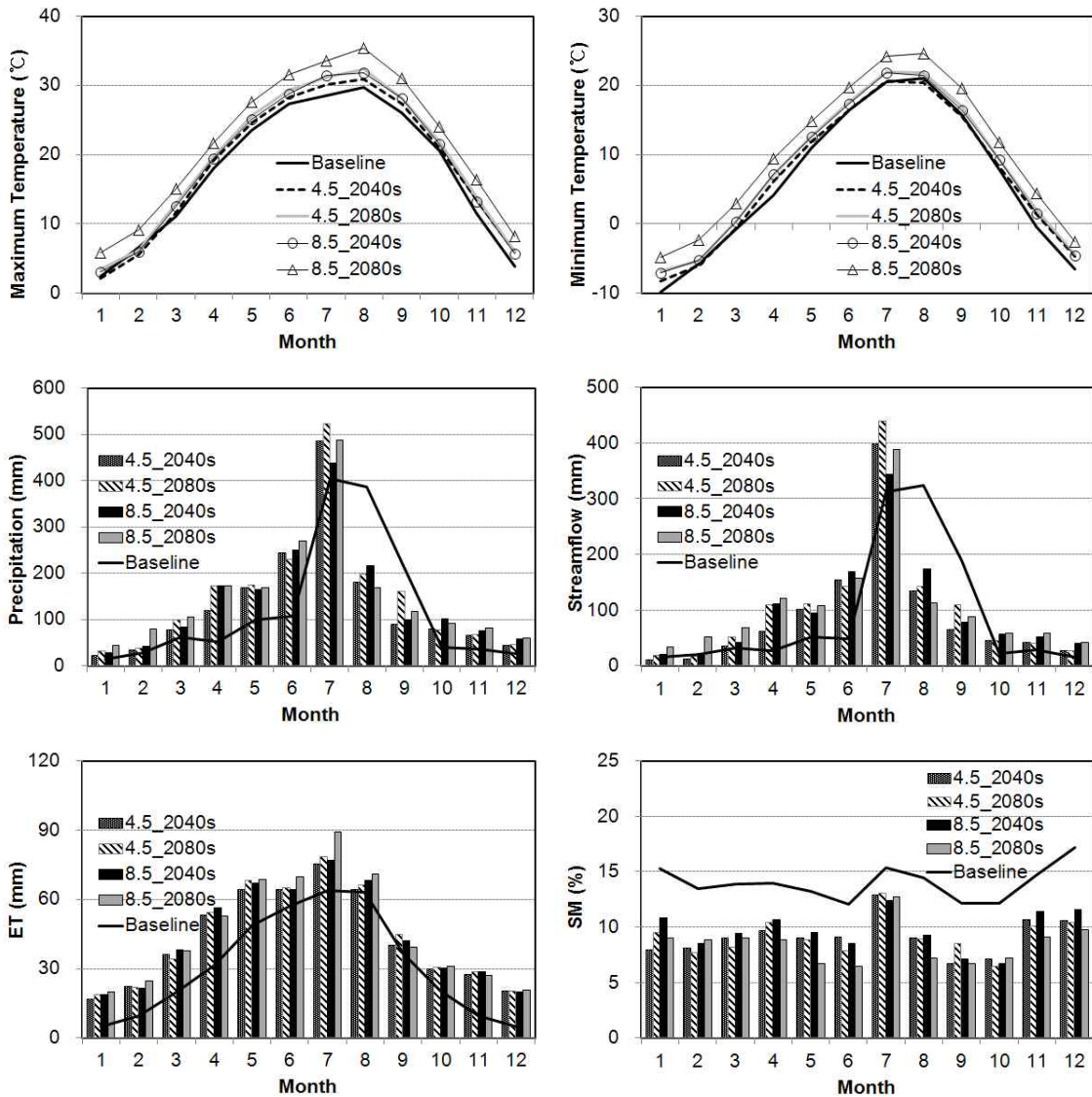


Fig. 10. The Future Hydrologic Components for RCP 4.5 and 8.5 Scenarios of GCM Models

발산량은 증가하고 이로 인해 토양수분은 감소하는 것으로 분석되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 설마천 유역을 대상으로 실측된 유량, 증발산 및 토양수분을 이용하여 모형의 보정 및 검증을 통해 SWAT 모형의 적용성을 평가하였고, 다양한 실측 자료를 활용하여 현재의 수문순환과정을 모의한 뒤, RCP 4.5, 8.5 기후변화 시나리오에 대한 모의결과 값을 오차 보정하여 SWAT 모형에 적용하여 미래 기후변화에 따른 수문순환 변화 특성을 비교분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 보다 정확한 수문모형의 검증을 위하여, 한국건설기술연구원에서 2007년부터 유역의 실측 유량, 수위, 유량, 증발산 및 토양수분을 동시에 측정하고 있는 설마천 시험유역(8.54 km²)을 본 연구의 대상유역으로 선정하였다.
- 2) 각 HRU에서 유출이 구분되어 계산되어 여러 종류의 작물과 토양에서의 다양한 증발산 및 토양수분을 반영할 수 있는 SWAT 모형을 선정하였고, 설마천 유역의 유역출구 지점의 유출량과 증발산 및 토양수분 관측지점의 실측자료를 이용하여 세 가지 수문변수를 동시에 검정(2007~2008) 및 보정(2009~2010)하여 모형의 불확실성을 감소시켰다. 그 결과 유출량의 모형효율계수는 0.62~0.86, R²는 0.74~0.91로

Table 6. Change in Future Temperature (T), Precipitation (P), Streamflow (Q), Evapotranspiration (ET), and Soil Moisture (SM) Values Compared to the Baseline (2007~2010).

Period	Tmax (°C)	Tmax difference (°C)	Tmin (°C)	Tmin difference (°C)	P (mm)	P variation (%)	Q (mm) [QR (%)]	Q variation (%)	ET (mm) [ETR (%)]	SM (%)	
[Baseline]											
2007~2010	Spring	17.5	-	4.8	-	213.8	-	109.8 [51.4]	-	100.5 [47.0]	13.7
	Summer	28.6	-	19.3	-	898.3	-	683.4 [76.1]	-	183.9 [20.5]	14.0
	Autumn	19.4	-	7.7	-	287.9	-	237.7 [82.6]	-	66.6 [23.1]	13.0
	Winter	4.3	-	-7.4	-	66.3	-	49.9 [75.2]	-	19.6 [29.5]	15.3
	Annual	17.4	-	6.1	-	1,466.3	-	1,080.8 [73.7]	-	370.5 [25.3]	14.0
HadGEM3-RA [RCP 4.5]											
2040s	Spring	18.5	+1.0	5.8	+1.0	359.5	+40.5	198.0 [55.1]	44.5	152.7 [42.5]	9.3
	Summer	29.8	+1.2	19.2	-0.1	905.5	+0.8	687.0 [75.9]	0.5	203.4 [22.5]	10.3
	Autumn	20.6	+1.2	8.4	+0.6	230.7	-24.8	152.3 [66.0]	-56.1	96.4 [41.8]	8.2
	Winter	4.5	+0.2	-6.3	+1.1	95.6	+30.7	49.7 [52.0]	-0.3	58.4 [61.1]	8.9
	Annual	18.4	+0.9	6.7	+0.6	1,591.3	7.9	1,087.0 [68.3]	0.6	510.9 [32.1]	9.2
2080s	Spring	19.4	+1.9	6.7	+1.9	441.3	+51.5	274.1 [62.1]	59.9	155.8 [35.3]	9.2
	Summer	31.0	+2.4	20.5	+1.1	946.0	+5.0	723.9 [76.5]	5.6	208.7 [22.1]	10.0
	Autumn	21.3	+2.0	9.4	+1.7	299.5	+3.9	194.7 [65.0]	-22.1	103.1 [34.4]	8.4
	Winter	5.2	+0.9	-5.6	+1.8	109.5	+39.4	63.4 [57.9]	21.4	60.4 [55.2]	9.3
	Annual	19.2	+1.8	7.8	+1.6	1,796.2	18.4	1,256.1 [69.9]	14.0	528.1 [29.4]	9.2
HadGEM3-RA [RCP 8.5]											
2040s	Spring	19.1	+1.5	6.6	+1.8	421.1	+49.2	247.7 [58.8]	55.6	161.4 [38.3]	9.9
	Summer	30.7	+2.1	20.2	+0.9	903.9	+0.6	685.8 [75.9]	0.4	209.1 [23.1]	10.1
	Autumn	21.0	+1.6	9.1	+1.4	275.2	-4.6	185.0 [67.2]	-28.5	101.1 [36.7]	8.4
	Winter	4.9	+0.6	-5.7	+1.7	127.3	+47.9	80.4 [63.1]	38.0	60.5 [47.5]	10.3
	Annual	18.9	+1.5	7.6	+1.4	1,727.5	15.1	1,198.9 [69.4]	9.8	532.1 [30.8]	9.7
2080s	Spring	21.5	+4.0	9.1	+4.3	446.1	+52.1	296.6 [66.5]	63.0	159.4 [35.7]	8.2
	Summer	33.5	+4.9	22.9	+3.6	927.1	+3.1	657.1 [70.9]	-4.0	229.9 [24.8]	8.8
	Autumn	23.8	+4.5	12.0	+4.2	288.9	+0.3	203.3 [70.4]	-16.9	97.8 [33.8]	7.7
	Winter	7.7	+3.4	-3.3	+4.1	180.5	+63.3	125.8 [69.7]	60.4	65.5 [36.3]	9.2
	Annual	21.6	+4.2	10.2	+4.0	1,842.6	20.4	1,282.7 [69.6]	15.7	552.6 [30.0]	8.5

나타났고, 증발산량의 R^2 는 0.56~0.71, 토양수분의 R^2 는 0.45~0.71로 나타나 모의치가 관측치를 잘 재현함을 알 수 있었다.

3) 미래 기후자료 구축을 위해 IPCC 5차 평가보고서 (AR5)의 RCP 4.5, 8.5 기후변화 시나리오를 이용하였고, 사용된 모델은 HadGEM3-RA 모형이며 기상청에서 제공하는 지역기후모델을 이용하여 역학적 상세화된 한반도 전망자료를 사용하였다. 2006~2099년까지의 미래 기후자료를 준비하고, 과거 실측자료로 2006~2010년까지 중복되는 기간을 baseline으로 설정하

여 과거 실측자료와 통계적인 유사성을 가지도록 오차보정 하였다. 그 결과 다소 높게 또는 낮게 모의되었던 온도는 관측 값과 유사하게 보정되었고 강수량 역시 관측 강수의 패턴을 잘 반영하도록 보정되었다. 4) RCP 4.5, 8.5 기후변화 시나리오에 따른 미래 수문순환의 변화를 분석한 결과 기온은 현재보다 0.9~4.2°C 상승하였고, 강수량은 7.9~20.4% 상승하는 것으로 분석되었고 시나리오별 강수패턴과 강수량은 비교적 차이가 있었다. 미래 유출량은 0.6~15.7% 증가, 유출률은 3.8~5.4% 감소, 증발산비는 4.1~6.8% 증가, 토

양수분은 4.3~5.5% 감소하였다.

현재 우리나라는 극한 가뭄 및 홍수와 같은 이상기후변화로 인해 기존의 수문순환 과정에 미치는 영향은 그 심각성이 더욱 악화되고 있다. 본 연구에서는 미래 기후변화에 따른 수문순환의 변동을 예측하기에 앞서 현재의 수문순환을 비교적 정확히 모의하는 것에 대한 중요성을 강조하고, 모델링의 불확실성을 줄이고자 다양한 실측자료를 활용하였다. 앞으로 기후변화에 대한 불확실성을 줄려면 증발산 및 토양수분 자료뿐만 아니라 다양한 수문인자의 장기적이고 정교한 모니터링이 더욱 활발히 이루어져야 할 것이며, 다양한 기후변화 시나리오를 활용한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 유량조사사업단의 증발산량 측정 조사 사업의 지원 및 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, S.R., Lee, Y.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2008). "Analysis of Future Land Use and Climate Change Impact on Stream Discharge." *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 2B, pp. 215-224.
- Ahn, S.R., Park, M.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2009). "Assessing Future Climate Change Impact on Hydrologic Components of Gyeongancheon Watershed." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 142, No. 1, pp. 33-50.
- Andersson, L., Wilk, J., Todd, M.C., Hughes, D.A., Earle, A., Kniveton, D., Layberry, R., and Savenije, H.G. (2006). "Impact of climate change and development scenarios on flow patterns in the Okavango River." *Journal of Hydrology*, Vol. 331, pp. 43-57.
- Arnold, J.G., and Allen, P.M. (1996). "Estimating hydrologic budgets for three Illinois watersheds." *Journal of Hydrology*, Vol. 176, No. 1, pp. 57-77.
- Bastidas, L.A., Gupta, H. Hsu, V. K-l., and Sorooshian, S. (2003). "Parameter, structure, and model performance evaluation for land-surface schemes." *Water Science and Applications*, Vol. 6, pp. 239-254.
- Bouraoui, F., Galbiati, L., and Bidoglio, G. (2002). "Climate change impacts on nutrient loads in the Yorkshire Ouse catchment (U.K.)." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 6, No. 2, pp. 197-209.
- Bouraoui, F., Grizzetti, B., Granlund, K., Rekolainen, S., and Bidoglio, G. (2004). "Impact of climate change on the water cycled and nutrient losses in a Finnish catchment." *Climate Change*, Vol. 66, No. 1-2, pp. 109-126.
- Carter, T.R., Hulme, M., and Lal, M. (1999). *IPCC-TGCIAGuidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment, version 1*, IPCC, Task Group on Scenarios for Impact Assessment.
- Doogers, P., and Aerts, J. (2005). "Adaptation strategies to climate change and climate variability: A comparative study between seven contrasting river basins." *Physics and Chemistry of the earth* Vol. 30, pp. 339-346.
- Galvan, L., Olias, M., Fernandez de Villaran, R., Domingo Santos, J.M., Nieto, J.M., Sarmiento, A.M., and Canovas, C.R. (2009). "Application of the SWAT model to an AMD affected river (Meca River, SW Spain) estimation of transported pollutant load." *Journal of Hydrology*, Vol. 377, No. 3-4, pp. 445-454.
- Hong, W.Y., Park, M.J., Park, J.Y., Ha, R., Park, G.A., and Kim, S.J. (2009). "The Correlation Analysis Between SWAT Predicted Forest Soil Moisture and MODIS NDVI During Spring Season." *Journal of Korea Society of Agricultural Engineers*, Vol. 51, No. 2, pp. 7-14.
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S.D., Qin, M., Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jha, M., Arnold, J.G., Gassman, P.W., Giorgi, F., and Gu, R. (2006). "Climate change sensitivity assessment on upper Mississippi River basin streamflows using SWAT." *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 42, No. 4, pp. 997-1015.
- Joh, H.K., Lee, J.W., Park, M.J., Shin, H.J., Yi, J.E., Kim, G.S., Srinivasan, R., and Kim, S.J. (2011). "Assessing climate change impact on hydrological components of a small forest watershed through SWAT calibration of evapotranspiration and soil moisture." *ASABE*, Vol.

- 54, No. 5, pp. 1773-1781.
- Joh, H.K., Lee, J.W., Shin, H.J., Park, G.A., and Kim, S.J. (2009). "Evaluation of Evapotranspiration and Soil Moisture of SWAT Simulation for Mixes Forest in the Seolmacheon Catchment." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 12, No. 4, pp. 289-297.
- Kuczera, G., and Mroczkowski, M. (1998). "Assessment of hydrological parameter uncertainty and the worth of multi-response data." *Water Resources Research*, Vol. 34, pp. 1481-1489.
- Kwon, H.J., Lee, J.H., Lee, Y.K., Lee, J.W., Jung, S.W., and Kim, J. (2009). "Seasonal Variations of Evapotranspiration Observed in a Mixed forest in the Seolmacheon Catchment." *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 11, No. 1, pp. 39-47.
- Lee, Y.J., Ahn, S.R., Kang, B.S., and Kim, S.J. (2008). "Assessment of Future Climate and Land Use Change on Hydrology and Stream Water Quality of Anseongcheon Watershed Using SWAT Model (II)." *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 8, No. 6B, pp. 665-673.
- Marshall, E., and Randhir, T. (2008). "Effect of climate change on watershed system: A regional analysis." *Climate Change*, Vol. 89, No. 3-4, pp. 263-280.
- Merritt, W.S., Alila, Y., Barton, M., Taylor, B., Cohen, S., and Neilsen, D. (2006). "Hydrologic response to scenario of climate change in sub watersheds of the Okanagan basin, British Columbia." *Journal of Hydrology*, Vol. 326, pp. 79-108.
- Muleta, M.K., and Nicklow, J.W. (2005). "Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model." *Journal of Hydrology*, Vol. 306, No. 1-4, pp. 127-145.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282-290.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., and Williams, J.R. (2001). "Soil and Water Assessment Tool: the theoretical documentation." *U.S. Agricultural Research Service*, pp. 340-367.
- 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*, Vol. 42, No. 10, pp. 877-889.
- Park, J.Y., Park, M.J., Ahn, S.R., Park, G.A., Yi, J.E., Kim, G.S., Srinivasan, R., Kim, S.J. (2011). "Assessment of future climate change impacts on water quantity and quality for a mountainous dam watershed using SWAT." *ASABE*, Vol. 54, No. 5, pp. 1725-1737.
- 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 Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 2B, pp. 121-135.
- Refsgaard, J.C., and Storm, B. (1996). *Storm construction calibration and validation of hydrological models*. Distributed Hydrological Modeling, M. B. Abbott and Refsgaard (Eds.), Kluwer Academic Publishers, pp. 41-54.
- Seibert, J., and McDonnell, J.J. (2003). "The quest for an improved dialog between modeler and experimentalist." *Water Science and Applications*, Vol. 6, pp. 301-316.
- Shin, H.J., Park, M.J., and Kim, S.J. (2012). "Evaluation of Forest Watershed Hydro-Ecology using Measured Data and RHESSys Model-For the Seolmacheon Catchment." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 12, pp. 1293-1307.
- Varanou, E., Gkouvatou, E., Baltas, E., and Mimikou, M. (2002). "Quantity and quality integrated catchment modelling under climatic change with use of Soil and Water Assessment Tool model." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp. 228-244.
- Viner, D., and Mayer, L. (1994). *Climate change scenarios of impact studies in the UK*, Report, Contract No PECD 7/12/96, CRU, Norwich, University of East Anglia.
- Zhang, X., Srinivasan, R., and Hao, F. (2007). "Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River basin using the SWAT model." *ASABE*, Vol. 50, No. 3, pp. 901-910.

논문번호: 13-022	접수: 2013.02.18
수정일자: 2013.03.11	심사완료: 2013.03.11