Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers
Vol. 53, No. 6, pp. 75~84, November, 2011
DOI:http://dx.doi.org/10.5389/KSAE.2011.53.6.075

# 장래 기후변화와 토지이용 변화에 따른 농촌소유역의 수문 영향 분석

## Climate and Land use Changes Impacts on Hydrology in a Rural Small Watershed

김학관* · 강문성**,† · 이은정*** · 박승우**
Kim, Hak Kwan · Kang, Moon Seong · Lee, Eun Jeong · Park, Seung Woo

**ABSTRACT**

The objective of this study is to evaluate the hydrologic impacts of climate and land use changes in a rural small watershed. HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, ver.3) A2 scenario and LARS-WG (Long Ashton Research Station - Weather Generator) were used to generate future climatic data. Future land use data were also generated by the CA-Markov (Cellular Automata-Markov) method. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used to evaluate hydrologic impacts. The SWAT model was calibrated and validated with stream flow measured at the Baran watershed in Korea. The SWAT model simulation results agreed well with observed values during the calibration and validation periods. In this study, hydrologic impacts were analyzed according to three scenarios: future climate change (Scenario Ⅰ), future land use change (Scenario Ⅱ), and both future climate and land use changes (Scenario Ⅲ). For Scenario Ⅰ, the comparison results between a 30-year baseline period (1997～2004) and a future 30-year period (2011～2040) indicated that the total runoff, surface runoff, lateral subsurface runoff, groundwater discharge, and evapotranspiration increased as precipitation and temperature for the future 30-year period increased. The monthly variation analysis results showed that the monthly runoff for all months except September increased compared to the baseline period. For Scenario Ⅱ, both the total and surface runoff increased as the built-up area, including the impervious surface, increased, while the groundwater discharge and evapotranspiration decreased. The monthly variation analysis results indicated that the total runoff increased in the summer season, when the precipitation was concentrated. In Scenario Ⅲ, the results showed a similar trend to that of Scenario Ⅱ. The monthly runoff for all months except October increased compared to the baseline period.

***Keywords:*** Hydrologic impact; climatic change; land use change; SWAT model; LARS-WG; CA-Markov

## Ⅰ. 서 론

지구온난화에 따른 지구대기의 온도 상승은 해양과 대기의 에너지 순환 변동을 야기하여 강수량, 증발량, 지표수 유출, 토양함수량 등이 달라지는 물 순환 변동을 일으키며 결과적으로 하천유량, 수생태계, 농업, 호수, 가뭄, 수질 등 미래의 농업수자원에 커다란 영향을 미칠 것으로 예상된다 (Hong et al., 2009; Shin et al., 2010). 기후변화뿐만 아니라 토지이용 및 토지피복 변화도 수문학적 요소에 영향을 미치는 중요한 요소이다 (Chung et al., 2011). 도시 및 주거지의 개발로 인한 불투수면 지역의 증가는 지표 유출이 증가를 초래하며 증발량, 침투량, 지하수 함량의 감소를 야기한다 (Dow and Dewalle, 2000). 과거에는 기후변화에 따른 수자원 영향에 관한 연구와 토지이용변화에 따른 영향에 관한 연구가 개별적으로 이루어졌으나 최근에는 두 요소 모두가 중요한 요소임을 인식하여 기후변화 및 토지이용 변화 모두를 고려하여 이에 대한 영향을 정략적으로 평가하기 위해 많은 연구들이 이루어지고 있다.

국외의 경우 Choi (2008)은 HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, ver.3)와 기후변화에 관한 정부간 협의체 (International governmental Penal on Climate change; IPCC)에서 제시하는 SRES (Special Report on Emissions Scenarios) A2, B2를 기반으로 하여 기후변화시나리오를 구축하고 동적 도시성장모델을 이용하여 토지이용변화 시나리오를 생산하여 HSPF (Hydrological Simulation Program-Fortran) 모델을 통해 유역 수문영향을 평가하였다. 그 결과 유출량은 기후변화에 따른 민감하게 변화하며 토지이용변화에 따라서는 지표 유출량이 최대 29 %까지 변화

* Dept. of Agricultural and Biological Engineering, Mississippi State University
** 서울대학교 조경·지역시스템공학부, 농업생명과학연구원 겸임연구원
*** 국립환경과학원 수질통합관리센터
† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4582
Fax: +82-2-873-2087
E-mail: mskang@snu.ac.kr
2011년 10월 25일 투고
2011년 10월 31일 심사완료
2011년 11월 2일 게재확정

하는 것으로 나타났다. Praskievicz and Chang (2011)은 U.S. Environmental Protection Agency's Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources (BASINS) 모델을 이용하여 8개의 통계적 다운스케일된 기후변화 시나리오와 2개의 토지이용변화, 4개의 복합 시나리오를 구축하여 수자원 영향을 평가하였다. Tu (2009)는 CCCma (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis) CGCM (Coupled Global Climate Model) 3.1과 개발된 토지이용시나리오를 바탕으로 AVGWLF (ArcView Gerneralized Watershed Loading Function) 모형을 통해 유출량 변화를 분석하였다. Qi et al. (2009)은 PRMS (Precipitation Runoff Modeling System)을 이용하여 기후변화와 토지이용변화에 따른 유출량 변동성을 평가하였다.

국내의 경우 Im et al. (2006)은 IPCC SRES A2, B2 기후변화 시나리오에 대한 CCCma CGCM2 모의결과와 미래 토지피복변화를 CA-Markov (Cellular Automata-Markov) 기법을 이용하여 구축한 것을 SLURP (Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes) 모형에 적용하여 소양강댐의 수문영향을 분석하였으며, Ahn et al. (2008)은 IPCC SRES A2, B2 기후변화 시나리오에 대한 CCCma CGCM2 모의결과 값을 SST-RCM (Stochastic Spatio-Temporal Random Cascade Model) 기법을 이용하여 다운스켈링한 뒤 SLURP 모형에 적용하여 경안수위관측소 상류유역의 수문영향을 분석한 바 있다. Lee et al. (2008)은 다운스케일된 전지구기후모형 (Global Climate Model: GCM) 기후변화 시나리오 및 미래 토지이용 예측 기법인 개선된 CA-Markov기법으로 이용하여 수문환경 변화를 예측하였으며, Park et al. (2010a)과 Park et al. (2010b)은 편이보정과 CF 다운스케일 기법에 의한 CCCma CGCM2 A2, B2 시나리오의 미래 기후자료, 개선된 CA-Markov 기법에 의한 미래 토지이용자료, 월 NDVI와 평균온도와의 선형회귀식에 의한 미래 식생자료 등을 모형에 입력하여 미래 기후변화에 따른 저수지 저수량과 유입량에 미치는 영향을 평가하고 전체적인 유역 수문 (증발산량, 토양수분, 지하수충진량, 유출량)의 변화를 평가하였다. Chung et al. (2011)은 SDSM (Statical Downscaling Model)과 ICM (Impervious Cover Model)을 이용하여 기후변화와 도시화과정 변천에 따른 시나리오를 구성하고 HSPF 모형을 이용하여 도시유역의 수문변화를 분석하였다.

장래 시나리오는 미래를 전망하는 하나의 도구로, 미래에 이와 같이 변화된다는 의미를 가지는 것이 아니라 하나의 가능성으로 이해해야 한다 (Bae et al., 2007). 그러므로 지역조건에 따라 장래의 기후 및 토지이용 시나리오는 다양해 질 수 있으며 기후변화 및 토지이용변화에 대한 효율적인 적응방안을 모색해 하기 위해서는 보다 다양한 시나리오 및 지역조건에 대한 영향을 분석하고 이에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

따라서 본 연구의 목적은 장래 기후변화와 토지이용변화에 따른 농촌 소유역의 수문 영향을 분석하는 것이다. 이를 위해 시험유역을 선정하고 기상자료와 수문자료를 수집하였으며, HadCM3와 IPCC SRES A2 시나리오를 기반으로 과거 30년 자료와 일 기상발생기인 LARS-WG을 이용하여 장래 기후변화 자료를 생산하였다. 장래 토지이용변화 예측을 위해 Landsat영상과 CA-Markov 기법을 이용하였다. 유역의 수문해석을 위해서는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 이용하였으며 관측자료를 바탕으로 매개변수 보정을 실시하였다. 구축된 SWAT 모형과 생산된 기후변화 및 토지이용변화 시나리오를 이용하여 각 시나리오에 따른 농촌 소유역의 수문 영향을 분석하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. LARS-WG 모형

LARS-WG 모형은 Racko et al. (1991)이 개발한 추계학적 일 기상생성모형을 기본으로 하여 강우일수와 무강우일수, 월별 강수량, 최저기온 및 최고기온의 빈도분포와 평균 및 표준편차, 최저기온이 0 ℃보다 낮은 날의 분포, 최고기온이 30 ℃이상인 날의 분포 등을 매개변수로 활용하여 일 기상자료를 생산한다 (Semenov and Barrow, 2002; Hong et al., 2009). 이렇게 산정된 매개변수들을 통해 기후자료를 생산하고, t-test와 F-test를 통해 모의된 기후자료의 평균과 분산이 관측치 값과 동일한 모집단에서 생성된 자료인지를 분석하게 된다. Semenov and Barrow (2002)에 따르면 오랜 기간 동안 모의된 기후자료의 통계적 특성이 입력자료의 통계적 특성에 근접한다고 한다 (Lee et al., 2010).

LARS-WG ver.5.0에서는 26개의 GCM과 IPCC SRES에 의한 A1B, A2, B1 배출시나리오를 제공하고 있으며 본 연구에서는 HadCM3 A2 시나리오를 채택하였다. HadCM3는 영국의 Hadley 기후예보 연구센터 (Hadley Centre for Climate Prediction and Research)에서 개발한 모델로 전 세계의 물리적 변화와 상태를 함께 고려하여 개발되었으며, 대기모델 (HadOM3)과 해양모델 (HadM3)로 구성되어 있다. 대기모델은 19개의 레벨로 나누어지며 2.50°×3.75°의 해상도를 가지고 있으며 해양모델의 경우 20개의 레벨로 구성되며 1.25°×1.25°의 해상도를 지닌다. HadCM3는 GCM의 모델 중 하나로 기후변화 시나리오를 모색하기 위해 개발되었으며 해수의 3차원 표현과 지표의 3차원 생물권과 결합하여 분석한다. HadCM3는 전 모델인 HadCM2에서 고려하지 못했던 기체성분 (gas)을 고려할 수 있으며 과다 예측을 피하기 위한 인위적인 유동 (flux) 보정을 따로 하지 않아도 되는 장점이 있다 (Lee et al., 2010).

## 2. SWAT 모형

미국 농무성 농업연구소에서 개발된 분포형 매개변수 모형인 SWAT 모형은 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동을 모의할 수 있도록 개발되었다 (Arnold et al., 1998). SWAT 모형은 다양한 국가 및 분야에서 수문 및 수질을 모의하기 위한 강력한 유역 모형으로 인정받고 있으며 최근까지도 기능이 추가되고 보완되고 있다 (Neitsch et al., 2005; Gassman et al., 2007; Douglas-Mankin et al., 2010). 본 연구에서는 SWAT2005를 적용하였으며, SWAT 모형을 위한 사용자 편의시스템을 제공하며 GIS (Geographical Information System)와 유역, 기상자료, 모델링 도구를 하나의 통합시스템으로 구축할 수 있는 ArcSWAT (Winchell et al., 2008)을 이용하였다. SWAT 모형은 수문반응의 최소단위로 토지이용과 토양특성 및 소유역을 기준으로 생성되는 수문응답단위 (hydrologic response unit, HRU)를 사용한다. 각 수문응답단위에 대해 모의가 되며 전체 유역에 대한 유출을 모의하기 위해 하도추적 과정을 거치게 된다. SWAT 모형에서는 지표면 유출 (surface runoff)을 계산하기 위해 NRCS 유출곡선법 (NRCS, 2004)과 Green and Ampt 침투법 (Green and Ampt, 1911)의 두 가지 방법을 제공하고 있다. 본 연구에서는 NRCS 유출곡선법을 이용하였다.

## 3. CA-Markov 기법

CA-Markov 기법은 Markov Chain 모델과 Cellular Automata (CA)의 이론적 체계가 결합한 수학통계적기법이다 (Park et al., 2008). Markov Chain 기법은 반복되는 상황에 대해 특정 시스템의 변화나 발전과정을 연구하는데 유용한 분석기법으로 이전 사건이나 실험결과가 바로 이전 사건이나 실험결과에 의해서만 결정되는 확률적 과정이다. Markov chain 기법은 현재 토지이용의 변화된 경향을 잘 반영하는 장점을 가지고 있지만, 시간이 변하더라도 전이 확률은 항상 일정하고 모든 위치에 동일하게 적용되는 것을 기본 가정으로 하기 때문에 실제적인 토지 피복 변화의 경향을 나타내기 힘들다. 따라서, 시계열 공간자료를 모의함에 있어 일정한 간격의 추이경향을 가지는 자료의 변화만을 고려하게 되면 급격한 변화폭을 가지는 공간자료의 처리에는 어려움이 따르며, 이런 단점은 CA 기법을 사용하여 보완 할 수 있다 (Park et al., 2008). CA는 비선형 동적 모형으로써 복잡계의 특성을 분석하거나 모의하기 위해 1963년 John von Neuman과 Stanislaw Ulam에 의해 'Celluar Space'로 소개된 이론적 체계이다. CA는 이산적인 시공간 (discrete time and space)에 기반한 비선형 동적 모델 혹은 시스템으로 정의된다 (Gutowitz, 1991). CA의 기본개념은 격자공간상의 셀들이 일정의 전이규칙을 따라 다음 상태로 변화되고, 이 과정이 지속적으로 반복되면서 일종의 자기조직화 (self-oganization)를 이룬다는 것이며, CA를 구성하는 기본요소는 격자형의 셀공간 (cellular space), 셀의 상태 (cell state), 네이버후드 (neighborhood), 전이규칙 (transition rule), 시간 (time step)이다 (Choi, 2003).

CA는 위의 가정을 토대로 시계열 공간자료의 변화양상을 인접한 격자 거리, 방향에 의해 공통적으로 적용시킴으로써 지역적인 인접격자의 상태를 지속적으로 변화시킨다. 인접격자는 중심셀 (focus cell) 주위에 인접하고 있는 격자들의 집합을 말하는데 보통 거리, 방향 혹은 각도에 의해 결정된다. 변화규칙은 각각의 셀이 시기별로 어떻게 변화할 지를 규정하는데 여기에는 인접격자들의 구성과 위치가 정의되어 있다. 변화된 인접격자의 상태는 시공간상에서 반복적으로 실행되어 복잡한 특성과 형태를 분석 및 모의할 수 있으며 변화규칙은 모든 격자에 동일하게 적용되는 공통규칙으로 지역적인 특성을 지니고 있으며 CA에서 가장 중요한 요소이다 (Lee et al., 2007).

## 4. 대상 유역 및 자료구축

### 가. 대상 유역 개요

본 연구에서는 SWAT 모형의 매개변수의 보정 및 기후변화와 토지이용 변화에 따른 유역 수문 영향을 분석하기 위하여 경기도 화성시 봉담읍과 팔탄면에 위치한 발안유역의 HP#6 소유역을 시험유역으로 선정하였다 (Fig 1). HP#6 소유역의 면적은 385 ha, 유로장은 3.1 km, 유역경사가 1.5 m/km였고, 형상계수

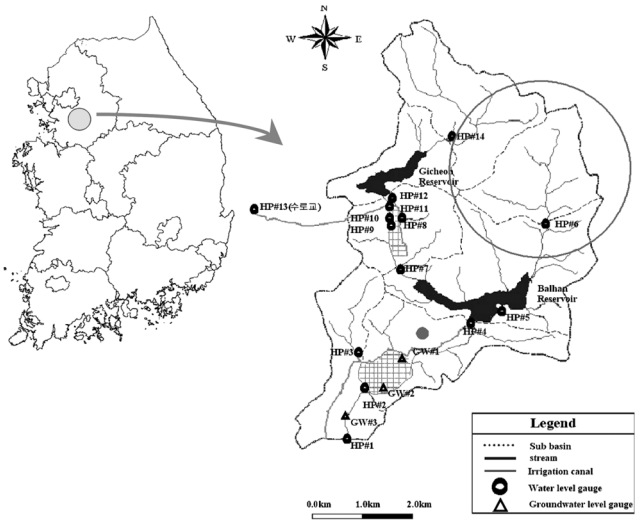



Fig. 1 Monitoring networks of Baran study watershed (Kim et al., 2009)

가 1.56으로 정방형의 소유역이다. HP#6 측점의 하천수위자료는 1996년부터 1998년 8월까지는 자기 수위계를 1998년 9월부터는 압력식 수위계를 설치하여 관측되고 있다. 유량자료는 하천수위측점에 대한 수위-유량관계를 조사하여 수집하였다 (Kim et al., 2009).

나. 토지이용도

본 연구에서는 시험유역의 토지피복 분류를 위해 기하보정이 완료된 위성영상을 이용하여 감독분류 (supervised classification)를 통해 발안 시험유역의 토지피복을 분류하였다. HP#6 유역은 농촌 소유역으로 토지이용 형태가 단순하여 물, 산림, 논, 밭, 시가지의 총 5개의 분류항목으로 분류되었으며, 1990년 4월 26일 촬영된 Path 116/Row 34 Landsat-5 TM 영상과 2002년 9월 10일 및 2007년 4월 9일의 Landsat-7 ETM+ 영상을 이용하였다. 위성영상은 토양명도지수 (soil brightness index), 녹색식생지수 (green vegetation index), 그리고 토양수분지수 (soil moisture index) 등의 식생지수를 사용하여 최대우도법에 의한 토지피복분류를 수행하였으며, 이를 바탕으로 1990, 2002, 2007년 토지이용도를 작성하였다. 미래 토지이용도 작성은 CA-Markov 기법을 이용하여 1990년 토지이용도와 2007년 토지이용도를 이용하여 2020년을 예측하였다.

다. LARS-WG 모형 자료 구축

기후변화는 현재나 과거에서 장기간의 평균적인 기후가 미래에 어떻게 변화되는가를 뜻하는 것으로 본 연구에서는 30년 동안의 자료를 기준으로 시나리오를 생산하고자 하였다. 이는 국·내외 연구에서도 30년 단위의 평가를 보편적으로 적용하고 있기 때문이다 (Bae et al., 2007). 기후변화를 고려한 장래 기상자료 발생을 위하여 수원기상대의 1973년～2004년까지 총 30년간의 일별 최고기온, 최저기온, 강수량, 태양복사량 자료를 수집하였다.

라. SWAT 모형 자료 구축

SWAT 모형은 기상자료, 수치표고모델, 토지이용도, 토양도 등을 필요로 한다. 본 연구에서는 1/5,000 NGIS (national geographical information system) 수치지도와 농촌진흥청의 1/25,000 정밀도양도를 이용하였다. SWAT 모형에서 필요로 하는 토양특성 값들은 농업과학기술원에서 구축한 농업토양정보시스템과 Saxton et al. (1986)의 결과를 이용하여 구축하였다. 토지이용도는 2002년 자료를 이용하였으며, 풍속, 일 최고온도, 일 최저온도, 일사량, 상대습도 등의 기상자료와 강우자료는 LARS-WG 모형을 같은 수원기상대의 자료를 이용하였다. 소유역은 23개로 구분하였다.

### 5. SWAT 모형의 보정

SWAT 모형은 많은 수의 매개변수들을 포함하고 있어 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 합리적인 매개변수의 추정이 필요하다. 본 연구에서는 모형의 보정을 위해 단순시행착오법을 이용하였으며, 매개변수의 보정에 대한 평가를 위해 평균제곱근오차 (root mean square error, RMSE), 상대평균절대오차 (relative mean absolute error, RMAE), Nash-Sutcliffe 효율지수 (efficiency index, EI) (Nash and Sutcliffe, 1970), 결정계수 ($R^2$) 등의 통계적인 변량을 사용하였다 (David and Gregory, 1999; Moriasi et al., 2007).

## III. 결과 및 고찰

### 1. SWAT 모형의 보정 및 검정

유출량에 대한 보정은 총 유출량과 첨두유량에 대하여 변위가 큰 매개변수부터 수정하였다. 모형의 보정을 위해 대상유역인 HP#6 소유역을 대상으로 1997년부터 2000년까지의 실측된 유출량 자료를 이용하였으며, 검정을 위해 2001년부터 2004년까지의 자료를 이용하였다. 모형의 유출에 비교적 큰 영향을 주는 매개변수는 CN2, SOL_AWC, ALPHA_BF, GWQMN, REVAPMN 등으로 분석되었으며, Table 1은 대상유역에서의 유출에 대한 매개변수의 보정결과를 보여주고 있다.

Table 2는 모형의 보정 및 검정결과를 보여주고 있으며, 모

**Table 1 Parameter values for runoff simulation**

| Parameters | Definition | Unit | Initial value | Calibrated value | Range |
|---|---|---|---|---|---|
| CN2 | Initial SCS runoff curve number for moisture condition II | - | - | ▽ 4 | 0 - 98 |
| SOL_AWC | Available water capacity of the soil later | mm/mm | - | ▽ 0.08 | 0 - 1 |
| ALPHA_BF | Baseflow alpha factors | days | 0.048 | 0.01 | 0.0 - 1.0 |
| GWQMN | Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur | mm | 0 | 100 | 0 - 5000 |
| REVAPMN | Threshold depth of water in the shallow aquifer for “revap” or percolation to the deep aquifer to occur | mm | 0 | 500 | 0 - 500 |

Table 2 Statical summary of calibration and verification results for daily runoff in the study watershed

| Statistical criteria | Calibration period | Validation period |
|---|---|---|
| Mean daily runoff | | |
| Observed (mm/day) | 2.81 | 2.80 |
| Simulated (mm/day) | 3.01 | 2.21 |
| Root mean square error (mm/day) | 4.34 | 4.03 |
| Relative mean absolute error (mm/day) | 0.47 | 0.52 |
| Determination coefficient | 0.88 | 0.82 |
| Nash-Sutcliffe efficiency index | 0.88 | 0.83 |

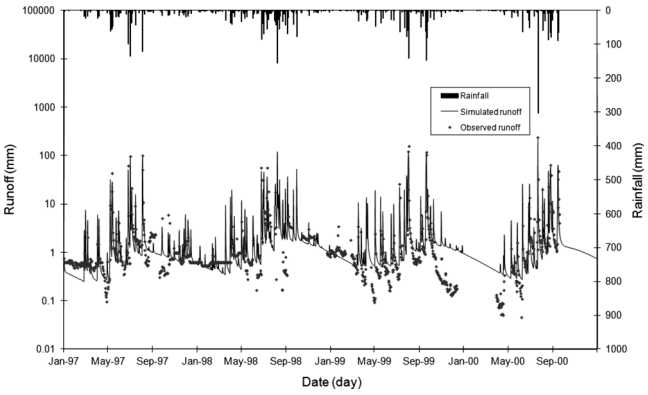



Fig. 2 Observed and simulated daily runoff over the calibration period for the study watershed

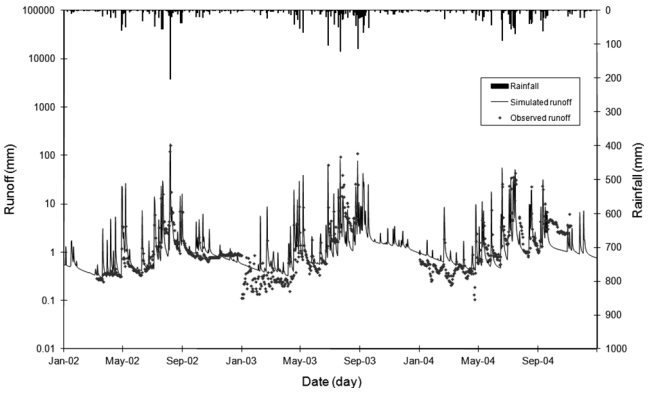



Fig. 3 Observed and simulated daily runoff over the validation period for the study watershed

형의 보정에 사용된 자료기간에 대하여 RMSE는 4.34 mm/day, RMAE는 0.47 mm/day, $R^2$는 0.88, EI는 0.83의 값을 보였다. 검정기간에 대해서는 RMSE는 4.03 mm/day, RMAE는 0.52 mm/day, $R^2$는 0.82, EI는 0.83의 값을 보였다. Moriasi et al (2007)은 EI가 0.75 이상이면 모형의 결과가 매우 만족스러운 결과라고 보고하였다. Fig. 2와 3은 보정 및 검정기간동안 강우량에 따른 유출량의 실측치와 모의치의 변화를 보여주고 있다. 모형의 보정 및 검정기간 동안에 모의된 값을 실측치와 비교하였을 때 잘 일치하는 것으로 나타났다.

## 2. LARS-WG 모형의 적용

### 가. 기상자료 생성 및 검정

기후시나리오를 적용하여 미래 일 기상자료를 모의하기 전 LARS-WG 모형의 지역 기후 모의 적합성을 분석하기 위하여 수원지역의 과거 실측 기상자료와 LARS-WG 모형을 통하여 모의된 기상자료를 비교하고 분석하였다. LARS-WQ 모형은 모의된 기상자료의 매개변수의 검정을 위해 Q-Test 분석을 포함하고 있으며, 관측 자료를 모집단으로 가정하고 모의된 기상자료와 모집단의 평균과 분산에 대한 적합성으로 평가하게 된다 (Sermenov and Barrow, 2002). 분석결과를 통해 도출된 P-value (probabilities)는 모의된 기상자료와 실측 기상자료의 유의수준을 판단하는 값으로 0.05보다 클 경우 동일한 모집단으로 평가할 수 있는 유의수준으로 판단되며, 0.01보다 작을 경우 유의성이 없다고 평가된다 (Sermenov and Barrow, 2002; Hong et al., 2009). Q-Test 결과 P-value가 모든 항목에 대해 0.05보다 큰 것으로 나타나 모형의 적용에 무리가 없는 것으로 판단된다.

### 나. 장래 기상자료 생성

검증된 LARS-WG 모형을 통하여 HadCM3과 A2 시나리오를 적용하여 분석기간인 2025s (2011～2040년)의 기상자료를 발생시켰다. Table 3은 생성된 월별 최저기온, 최고기온, 강수량, 태양복사에너지에 대하여 분석한 결과를 보여주고 있다. 2025s에는 월평균 최저기온 및 최고기온이 기준년도 (1973-2004)에 비하여 모두 증가하는 경향을 보였고, 강수량은 3, 5, 9, 10월을 제외하고는 모두 증가하는 것으로 나타났다. 7월의 강수량 변화가 22 %로 가장 컸으며 1월과 5월의 강수량 변화가 다음으로 큰 것으로 나타났다. 태양복사에너지의 경우 모두 감소하는 경향을 보였다.

## 3. 장래 토지이용 변화

Table 4는 Landsat 영상을 이용하여 작성된 1990, 2002, 2007년의 토지이용도 및 CA-Markov 기법을 이용하여 예측된 2020년 토지이용도를 보여주고 있다. 산림과 논은 계속 감소하는 경향을 보였으며, 주거지의 경우 증가하는 것으로 분석되었다. 밭의 경우는 2002년에는 감소하였다가 2010년에는 증가하였으며 2020년 예측된 면적은 감소하는 것으로 나타났다. 2020년에는 주거지가 유역의 46 % 정도를 차지할 것으로 예측되었

Table 3 Characteristics of generated weather data from LARS-WG (monthly mean values)

| Month | Min. Temp. (℃) | | Max Temp. (℃) | | Rainfall (mm) | | Solar radiation (MJ/m$^2$/day) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Base (1973-2004) | 2025s (2011-2040) | Base (1973-2004) | 2025s (2011-2040) | Base (1973-2004) | 2025s (2011-2040) | Base (1973-2004) | 2025s (2011-2040) |
| JAN | -7.6 | -6.5 | 2.1 | 3.2 | 20.6 | 22.6 | 7.75 | 7.61 |
| FEB | -5.3 | -4.5 | 4.6 | 5.3 | 23.3 | 23.9 | 9.73 | 9.60 |
| MAR | -0.2 | 0.4 | 11.1 | 11.8 | 37.6 | 37.0 | 12.66 | 12.47 |
| APR | 5.6 | 6.2 | 17.5 | 18.1 | 79.8 | 80.0 | 14.98 | 14.78 |
| MAY | 11.4 | 12.1 | 22.7 | 23.3 | 77.8 | 77.4 | 16.35 | 16.25 |
| JUN | 17.2 | 18.1 | 26.4 | 27.2 | 119.3 | 123.5 | 15.27 | 15.04 |
| JUL | 21.3 | 22.1 | 28.3 | 29.1 | 278.3 | 339.1 | 12.77 | 12.29 |
| AUG | 21.7 | 22.3 | 29.4 | 30.0 | 266.9 | 279.3 | 13.24 | 12.81 |
| SEP | 15.7 | 16.4 | 25.7 | 26.3 | 123.3 | 117.2 | 12.96 | 12.82 |
| OCT | 8.4 | 9.1 | 19.7 | 20.5 | 59.9 | 57.7 | 11.26 | 11.20 |
| NOV | 1.9 | 3.0 | 12.3 | 13.4 | 50.4 | 54.1 | 7.96 | 7.83 |
| DEC | -4.1 | -2.7 | 5.2 | 6.6 | 30.3 | 33.6 | 6.68 | 6.53 |

Table 4 Land use classification of the study watershed

| Land use | 1990 | | 2002 | | 2007 | | 2020 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Area (km$^2$) | Percentage (%) | Area (km$^2$) | Percentage (%) | Area (km$^2$) | Percentage (%) | Area (km$^2$) | Percentage (%) |
| Forest | 2.40 | 62.3 | 1.96 | 51.0 | 1.67 | 43.4 | 1.37 | 35.5 |
| Paddy | 1.00 | 26.0 | 0.74 | 19.1 | 0.61 | 16.0 | 0.51 | 13.4 |
| Upland | 0.23 | 5.9 | 0.18 | 4.8 | 0.28 | 7.2 | 0.21 | 5.4 |
| Built-up | 0.22 | 5.8 | 0.97 | 25.1 | 1.29 | 33.4 | 1.76 | 45.7 |
| Total | 3.85 | 100 | 3.85 | 100 | 3.85 | 100 | 3.85 | 100 |

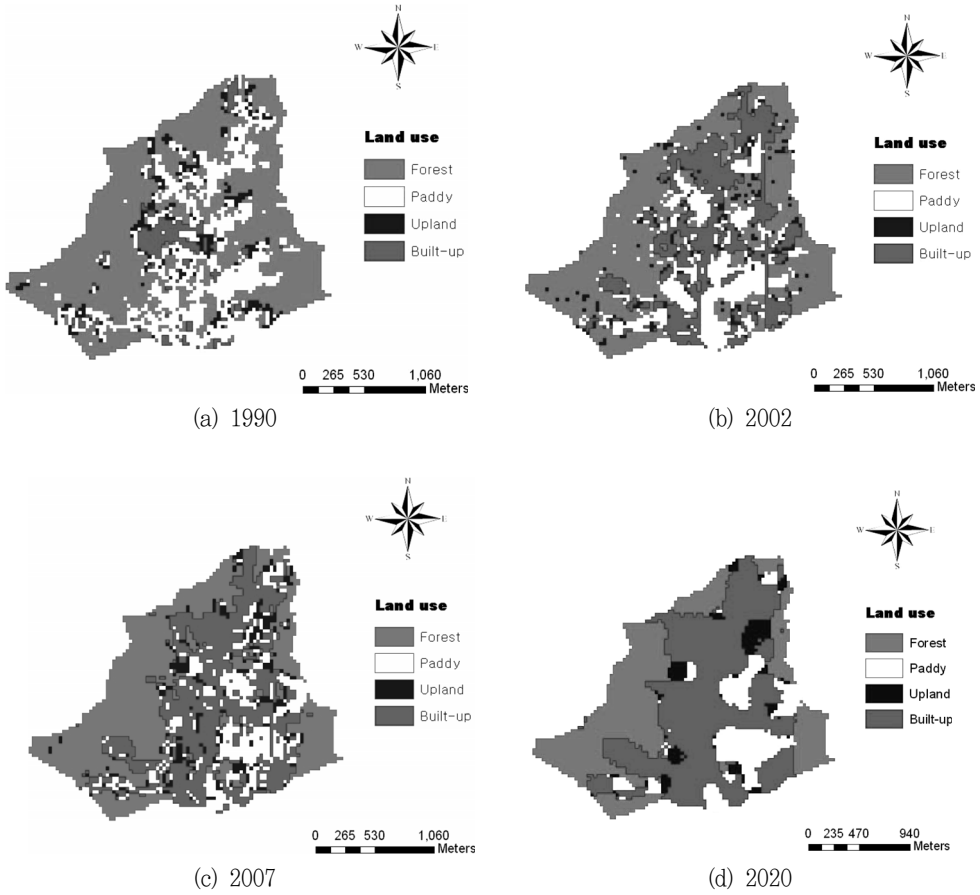
다. Fig. 4는 각 연도의 토지이용도를 보여주고 있다.

## 4. 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 수문변화 분석

본 연구에서는 기후변화와 토지이용 변화에 따른 유역 수문 영향을 분석하기 위하여 3가지 시나리오를 구축하고 보정된 SWAT 모형을 이용하여 기준기간 (1975～2004년)에 대한 수문 변동성을 분석하였다. 시나리오는 예측기간 2025s (2011～2040년)의 장래 기후변화만을 고려한 시나리오 (Scenario Ⅰ), 장래 토지이용변화만을 고려한 시나리오 (Scenario Ⅱ), 장래 토지이용 및 기후변화를 모두 고려한 시나리오 (Scenario Ⅲ)로 구성하였다.

### 가. 물수지 변화

기준연도를 기준으로 시나리오에 따른 대상유역의 수문학적 요소들의 변화를 분석하였다. Table 5는 대상유역의 수문학적 요소들의 변화를 분석한 결과를 보여주고 있다. 장래 기후변화만을 고려한 경우 (Scenario Ⅰ) 2025s에는 기준년도에 비해 평균 유출량이 10 %, 지표 유출량은 11 %, 측방 유출량은 7 % 증가하는 것으로 나타났으며 증발산량도 1 % 증가하는 것으로 분석되었다. 이는 생산된 기후변화 시나리오에서 강수량 및 기온이 증가했기 때문이다. 토지이용변화 시나리오만을 고려한 경우 (Scenario Ⅱ) 토지이용변화 결과에서 보듯이 도로, 주차장, 건물의 지붕 등과 같은 불투수면이 많은 도시 면적이 증가하고 삼림지, 농경지 등과 같이 자연계에서 우수유출의 흡수와 지하수 함양 기능을 갖는 투수면 공간이 감소함에 따라 2025s에는 기준년도에 비해 전체 유출량은 3 %, 지표 유출량은 24 % 증가한 반면 측방 유출량은 14 %, 지하수 유출량은 15 %, 증발산량은 7 % 감소하는 것으로 나타났다. 기후변화와 토지이용변화 모두를 고려한 경우 (Scenario Ⅲ) 토지이용변화만을 고려한 경우 (Scenario Ⅱ)와 유사한 경향을 보였으며, 강우량 및 불투수면이 많은 도시가 증가함에 따라 지표면 유출량이 37 % 증가하였으며 반면 지하수 유출량은 7 % 감소하는 것으로 나타났다. 증발산량은 5 % 감소하는 것으로 분석되었다. 이처럼 기후변화 및 토지이용변화에 따라 수문학적 요소들이 영향을 받는 것으로 나타났으며, 전체적으로 지표 유출량 및 전체 유출량은 증가하는 것으로 나타났다.




(a) 1990 (b) 2002

(c) 2007 (d) 2020

Fig. 4 Landuse map of the study site

Table 5 Results of hydrologic simulation using land use and climatic scenarios

| Item | Base | Scenario Ⅰ | Scenario Ⅱ | Scenario Ⅲ |
|---|---|---|---|---|
| Evapotranspiration (mm) | 374 | 378 | 353 | 355 |
| Surface runoff (mm) | 359 | 400 | 444 | 491 |
| Lateral subsurface runoff (mm) | 206 | 221 | 177 | 189 |
| Groundwater discharge (mm) | 219 | 237 | 187 | 203 |
| Transmission losses (mm) | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Total runoff (mm) | 776 | 850 | 800 | 875 |
| Percolation out of soil layer (mm) | 227 | 245 | 104 | 210 |

나. 월별 유출량 변화

Table 6은 기준년도 및 시나리오에 따른 월별 유출량을 보여주고 있다. 장래 기후변화만을 고려한 경우 (Scenario Ⅰ) 2025s에는 기준년도에 비해 9월을 제외하고는 모두 증가하는 것으로 나타났다. 강수량 변동이 가장 컸던 7월에는 기준년도에 비해 27 % 증가하는 것으로 나타났으며, 11월, 12월 1월의 유출량 변화도 큰 것으로 분석되었다. 장래 토지이용변화만을 고려하는

Table 6 Results of monthly runoff simulation using land use and climatic scenarios

| Month | Base | Scenario Ⅰ | | Scenario Ⅱ | | Scenario Ⅲ | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Runoff (mm) | Runoff (mm) | Change rate (%) | Runoff (mm) | Change rate (%) | Runoff (mm) | Change rate (%) |
| JAN | 22.5 | 25.1 | 11.6 | 20.4 | -9.3 | 23.0 | 2.2 |
| FEB | 20.0 | 21.1 | 5.5 | 19.1 | -4.5 | 20.0 | 0.0 |
| MAR | 25.3 | 26.1 | 3.2 | 25.3 | 0.0 | 26.2 | 3.6 |
| APR | 43.6 | 44.6 | 2.3 | 46.4 | 6.4 | 47.5 | 8.9 |
| MAY | 42.4 | 42.6 | 0.5 | 45.3 | 6.8 | 45.6 | 7.5 |
| JUN | 67.1 | 69.4 | 3.4 | 71.9 | 7.2 | 74.5 | 11.0 |
| JUL | 165.8 | 210.4 | 26.9 | 177.2 | 6.9 | 224.4 | 35.3 |
| AUG | 171.5 | 185.5 | 8.2 | 182.1 | 6.2 | 195.9 | 14.2 |
| SEP | 92.8 | 92.1 | -0.8 | 94.4 | 1.7 | 92.8 | 0.0 |
| OCT | 53.8 | 55.0 | 2.2 | 51.4 | -4.5 | 52.2 | -3.0 |
| NOV | 40.6 | 44.1 | 8.6 | 38.1 | -6.2 | 41.7 | 2.7 |
| DEC | 31.0 | 34.2 | 10.3 | 27.9 | -10.0 | 31.2 | 0.6 |
| Total | 776.4 | 850.2 | 9.5 | 799.5 | 3.0 | 875.0 | 12.7 |

경우 (Scenario Ⅱ) 도시 면적이 증가하고 삼림지 및 농경지가 감소함에 따라 우리나라 강우 특성상 강우량이 많은 여름철의 유출량은 증가하고 불투수면 증가로 인해 지하수에 의한 유출량이 감소되어 가을 및 겨울철의 유출량은 감소하는 경향을 보였다. 장래 토지이용 및 기후변화를 모두 고려한 시나리오 (Scenario Ⅲ)의 경우 10월을 제외하고는 유출량이 모두 증가하는 것으로 나타났다.

## Ⅳ. 요약 및 결론

본 연구에서는 장래 기후변화 및 토지이용 변화에 따른 농촌소유역에서의 수문 영향을 분석하였다.

과거 30년간 (1975-2004) 수원 관측 자료를 통해 검증된 LARS-WG 모형을 이용하여 전지구기후모형인 HadCM3의 A2 시나리오를 기반으로 분석기간인 2025s (2011～2040)의 기상자료를 생산하였으며, 장래 토지이용변화 시나리오는 CA-Markov 모형을 이용하여 구축하였다. 농촌 소유역의 수문 모의를 위해 시험유역에서 관측된 유출량 자료를 이용하여 SWAT 모형의 매개변수 보정 및 검정을 실시하였으며 그 결과 모의치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

이렇게 구축된 SWAT 모형과 기후변화 및 토지이용변화 시나리오를 이용하여 기준연도를 기준으로 시나리오에 따른 대상유역의 수문학적 요소들의 변화를 분석한 결과 장래 기후변화만을 고려한 경우 (Scenario Ⅰ) 2025s에는 기준년도에 비해 강수량과 기온이 증가함에 따라 전체 유출량, 지표 유출량, 측방 유출량, 지하수 유출량, 증발산량이 모두 증가하는 것으로 분석되었다. 토지이용변화 시나리오만을 고려한 경우 (Scenario Ⅱ) 불투수면이 많은 도시 면적이 증가하고 삼림지, 농경지 등과 같이 투수면 공간이 감소함에 따라 2025s에는 기준년도에 비해 전체 유출량과 지표 유출량은 증가한 반면 측방 유출량, 지하수 유출량, 증발산량은 감소하는 것으로 나타났다. 기후변화와 토지이용변화 모두를 고려한 경우 (Scenario Ⅲ) 토지이용변화만을 고려한 경우와 유사한 경향을 보였으며, 강우량 및 불투수면이 많은 도시가 증가함에 따라 지표면 유출량이 증가하였으며 반면 지하수 유출량과 증발산량은 감소하는 것으로 나타났다.

시나리오에 따른 월별 유출량을 분석한 결과 기후변화만을 고려한 경우 (Scenario Ⅰ) 강수량 변동이 가장 컸던 7월에는 기준년도에 비해 27 % 증가하는 것으로 나타났으며, 11월, 12월 1월의 유출량 변화도 큰 것으로 분석되었다. 장래 토지이용변화만을 고려하는 경우 (Scenario Ⅱ) 강우량이 많은 여름철의 유출량은 증가하고 불투수면 증가로 인해 지하수에 의한 유출량이 감소되어 가을 및 겨울철의 유출량은 감소하는 경향을 보였다. 장래 토지이용 및 기후변화를 모두 고려한 시나리오 (Scenario Ⅲ)의 경우 10월을 제외하고는 유출량이 모두 증가하는 것으로 나타났다.

이처럼 기후변화 및 토지이용변화에 따라 수문학적 요소들이 영향을 받는 것으로 나타났으며, 전체적으로 지표 유출량 및 전체 유출량은 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 다양한 기후변화 및 토지이용 변화에 대한 이해를 돕고 이에 따른 적응방안을 모색하는데 필요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

## REFERENCES


1. Ahn, S. R., Y. J. Lee, G. A. Park, and S. J. Kim, 2008. Analysis of future and use and climate change impact on stream discharge. *Korea Society of Civil Engineers* 28(2B): 215-224 (in Korean).
2. Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams, 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment Part Ⅰ: Model development. *Journal of American Water Resources Association* 34(1): 73-89.
3. Bae, D. H., I. W. Jung, and W. T. Kwon, 2007. Generation of high resolution scenarios for climate change impacts on water resources(I): Climate scenarios on each sub-basins. *Journal of Korea Water Resources Association* 40(3): 191-204 (in Korean).
4. Choi W. 2008. Catchment-scale hydrological response to climate-land-use combined scenarios: A case study for the Kishwaukee River Basin, Illinois. *Physical Geography* 29: 79-99.
5. Choi, D. S., 2003. Density-incorporated celluar automata modelling for land use control policy evaluation: focusing on the green belt policy in the Seoul metropolitan area. Master thesis. Seoul National University, Seoul, Republic of Korea (in Korean, with English abstract).
6. Chung E. S., K Park, and K. S. Lee, 2011. The relative impacts of climate change and urbanization on the hydrological response of a Korean urban watershed. *Hydrological Processes* 25: 544-560.
7. David, R. L., and M. J. Gregory, 1999. Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research* 35(1): 233–241.
8. Douglas-Mankin K. R., R. Srinivasan, and J. G. Arnold,

2010. Soil and water assessement tool (SWAT) model: Current developments and applications. *Trans. ASAE* 53(5): 1423-1431.

9. Dow, C. L. and D. R. DeWalle, 2000. Trends in evaporation and Bowen ration on urbanizing watersheds in Eastern United States. *Water Resources Research* 36(7): 1835-1843.
10. Gassman, P. W., M. R. Reyes, C. H. Green, and J. G. Arnold, 2007. The soil and water assessemnt tool: Histroical development, applications, and future research directions. *Trans. ASAE* 50(4): 1211-1240.
11. Green, W. H., and G. A. Ampt, 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4:11-24.
12. Gutowitz, H., 1991. Cellular automata : Theory and experiment. MIT Press, Cambridge.
13. Hong, E. M., J. Y. Choi, S. H. Lee, S. H. Yoo, and M. S. Kang, 2009. Estimation of Paddy Rice Evapotranspiration Considering Climate Change Using LARS-WG. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(3): 25-35 (in Korean).
14. Im H. J., H. J. Kwon, D. H. Bae, and S. J. Kim, 2006. Analysis of hydrological impact using climate change scenarios and the CA-Markov Technique on Soyanggan-dam watershed. *Korea Water Resources Association* 39(5): 453-466 (in Korean).
15. Kim, H. K., M. S. Kang, S. W. Park, J. Y. Choi, and G. J. Yang. 2009. Auto-calibration for the SWAT model hydrological parameters using multi-objective optimization method. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(1): 1-9. (In Korean).
16. Lee, E. J., M. S. Kang, J. A. Park, J. Y. Choi, and S. W. Park, 2010. Estimation of future reference crop evapotranspiration using artificial neural networks. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(5): 1-9 (in Korean).
17. Lee, Y. J. and S. J. Kim, 2007. The effect of spatial scale and resolution in the prediction of future land use using CA-Markov technique. *Korean Association of Geographic Information Studies* 10(2): 737-744 (in Korean).
18. Lee, Y. J., S. R. An, B. Kang, and S. J. Kim, 2008. Assessment of future climatic and land use change on hydrology and stream water quality of Anseongcheon watershed using SWAT model (Ⅱ). *Korea Society of Civil Engineers* 28(6B): 665-673 (in Korean).
19. Moriasi D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith, 2007. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Trans. ASAE* 50(3): 885-900.
20. Nash J. E., and J. V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual models par Ⅰ-A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10: 282-290.
21. National Resources Conservation Service (NRCS), 2004. National engineering handbook, Part 630-Hydrology. United States Department of Agriculture, Washington, D. C., USA.
22. Neitsch, S. G., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams, 2005. Soil and water assessment tool theoretical documentation. Version 2005, United States Department of Agriculture Agricultural Research Service, Temple, Texas, USA.
23. Park G. A., S. R. Ahn, M. J. Park, and S. J. Kim, 2010b. Assessment of the contribution of weather, vegetation, land use change for agricultural reservoir and stream watershed using the SLURP model (I) - Calibration, Validation and Application of the Model -. *Korea Society of Civil Engineers* 30(2B): 121-135 (in Korean).
24. Park G. A., Y. J. Lee, H. J. Shin, and S. J. Kim, 2010a. Assessment of the contribution of weather, vegetation, land use change for agricultural reservoir and stream watershed using the SLURP model (I) - Preparation of input data for the Model -. *Korea Society of Civil Engineers* 30(2B): 107-120 (in Korean).
25. Park J. Y., M. S. Lee, Y. J. Lee, and S. J. Kim, 2008. The analysis of future land use change impact on hydrology and water quality using SWAT model. *Korea Society of Civil Engineers* 28(2B): 107-120 (in Korean).
26. Praskievicz S, and Chang H, 2011. Impacts of climate change and urban development on water resources in the Tualatin River Basin, Oregon. *Ann. Assoc. Am.*

*Geogr.* 101(2): 249–971.

27. Qi S., G. Sun, Y. Wang, S. G. McNulty, and J. A. Moore Myers, 2009. Streamflow response to climate and landuse changes in a coastal watershed in North Carolina. *Trans. ASABE* 52(3): 739-749.
28. Racsko, P., L. Szeidla and M. Semenovb, 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57: 27-41.
29. Saxton, K. E., W. J. Rawls, J. S. Romberger, and R. I. Papendick, 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal* 50(4): 1031-1036.
30. Semenov, M. A., and E. M. Barrow, 2002. LARS-WG: A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies, Harpenden.
31. Shin, H. J., M. J. Park, H. K. Joh, G. A. Park and S. J. Kim, 2010. Projection and analysis of future temperature and precipitation using LARS-WG Downscaling Technique - For 8 meteorological stations of South Korea -. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(4): 83-91 (in Korean).
32. Tu J., 2009. Combined impact of climate and land use changes on streamflow and water quality in eastern Massachusetts, USA. *Journal of Hydrology* 379: 268-283.
33. Winchell B., R. Srinivasan, M. Di Luzio, and J. Arnold, 2008. ArcSWAT 2.0 interface for SWAT2005 user's guide. United States Department of Agriculture Agricultural Research Service, Temple, Texas, USA.