



Assessment of future climate and land use changes impact on hydrologic behavior in Anseong-cheon Gongdo urban-growing watershed

Kim, Da Rae^a · Lee, Yong Gwan^a · Lee, Ji Wan^a · Kim, Seong Joon^{a*}

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

Paper number: 17-090

Received: 25 October 2017; Revised: 28 November 2017; Accepted: 28 November 2017

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the future hydrologic behavior affected by the potential climate and land use changes in upstream of Anseong-cheon watershed (366.5 km²) using SWAT. The HadGEM3-RA RCP 4.5 and 8.5 scenarios were used for 2030s (2020-2039) and 2050s (2040-2059) periods as the future climate change scenario. It was shown that maximum changes of precipitation ranged from -5.7% in 2030s to +18.5% in 2050s for RCP 4.5 scenarios and the temperature increased up to 1.8°C and 2.6°C in 2030s RCP 4.5 and 2050s 8.5 scenarios respectively based on baseline (1976-2005) period. The future land uses were predicted using the CLUE-s model by establishing logistic regression equation. The 2050 urban area were predicted to increase of 58.6% (29.0 to 46.0 km²). The SWAT was calibrated and verified using 14 years (2002-2015) of daily streamflow with 0.86 and 0.76 Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE) for stream flow (Q) and low flow 1/Q respectively focusing on 2 drought years (2014-2015) calibration. For future climate change only, the stream discharge showed maximum decrease of 24.2% in 2030s RCP 4.5 and turned to maximum increase of 10.9% in 2050s RCP 4.5 scenario compared with the baseline period stream discharge of 601.0 mm by the precipitation variation and gradual temperature increase. While considering both future climate and land use change, the stream discharge showed maximum decrease of 14.9% in 2030s RCP 4.5 and maximum increase of 19.5% in 2050s RCP 4.5 scenario by the urban growth and the related land use changes. The results supported that the future land use factor might be considered especially for having high potential urban growth within a watershed in the future climate change assessment.

Keywords: SWAT, Land use change, CLUE-s, Climate change, RCP

미래 기후변화와 토지이용변화가 안성천 공도 도시성장 구역의 수문에 미치는 영향 평가

김다래^a · 이용관^a · 이지완^a · 김성준^{a*}

^a건국대학교 사회환경플랜트공학과

요 지

본 연구의 목적은 안성천 상류 공도구역(366.5km²)을 대상으로 SWAT 모형을 이용하여 미래 기후변화 평가에 있어, 미래의 토지이용변화를 동시에 고려하면 수문학적 거동에 얼마나 영향을 주는지를 분석하고자 하였다. 미래기후변화 시나리오는 HadGEM3-RA의 RCP 4.5와 8.5 시나리오를 이용하여 2030s (2020-2039)과 2050s (2040-2059) 기간으로 나누어 적용하였으며, 토지이용변화는 도시성장 시나리오에 따른 회귀모형 기반의 CLUE-s 모델을 이용하였다. 기준년(1976-2005) 대비 미래 강수량은 RCP 4.5에서 2030s에 최대 5.7%의 감소, 2050s에는 최대 18.5% 증가하였고, 미래 기온은 2030s RCP 4.5에서 최대 1.8°C, 2050s RCP 8.5에서 최대 2.6°C 증가하였다. 미래 토지이용은 2050년 도시지역이 58.6% (29.0 km²에서 46.0 km²) 증가하는 것으로 예측되었다. SWAT 수문 검보정은 14년(2002-2015) 동안의 공도관측소 일유량 자료를 이용하였으며, 저유량 모델효율의 향상을 위하여 2014-2015년 연속 가뭄년을 대상으로 보정을 실시한 결과, 하천유량(Q)과 1/Q을 대상으로 Nash-Sutcliffe 모델효율은 각각 0.86과 0.76이었다. 미래 기후변화 시나리오만을 적용한 결과, 하천유출량이 2030s RCP 4.5에서 최대 24.2% 감소하다가 2050s RCP 4.5에서 최대 10.9% 증가하는 변화를 보여주었다. 한편, 기후변화와 더불어 미래의 토지이용변화를 함께 고려한 경우는 하천유출량이 2030s RCP 4.5에서 최대 14.9% 감소, 2050s RCP 4.5에서 최대 19.5% 증가하는 변화를 보여주어, 미래 기후변화에 따른 구역의 수문평가 시, 도시성장이 기대되는 구역 등 미래의 토지이용변화가 클 가능성이 있는 구역에 대해서는 토지이용변화 요소를 고려할 필요가 있다고 생각된다.

핵심용어: SWAT, 토지이용변화, CLUE-s, 기후변화, RCP

*Corresponding Author. Tel: +82-2-450-3749
E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr (S. J. Kim)

1. 서론

1970년대 이후 우리나라에서는 인구의 도시집중과 경제 개발 계획에 따른 산업의 고도화로 토지이용의 변화가 심화되었다. 도시화 초기단계에는 산발적으로 소규모의 택지가 조성되기 시작하고 불투수 지역이 확대되며, 식생에 감소에 따라 증발산량이 감소하고 지표유출은 증가하기 시작했다(Ahn *et al.*, 2015). 또한 지구온난화에 의한 미래 기온과 강수량의 패턴 변화는 증발산이나 토양수분 등의 변화로 이어져 궁극적으로 물 순환의 변화를 초래한다. 이러한 물순환 체계 왜곡에 따른 하천 유출량의 변화는 해당 지역의 치수 대책 및 하천정비 계획에 직접적인 영향을 미치게 되므로(Lee *et al.*, 2016), 과거로부터 현재 그리고 미래 토지이용 변화 및 기후변화에 따른 하천 유역의 유출특성 변화를 정량적으로 구명해야만 효율적이고 능동적으로 하천유역 관리를 할 수 있게 된다.

토지피복 및 토지이용 특성은 지역의 생태계의 순환 과정부터 전 지구적인 대기 및 물순환, 정책 및 사회·경제적인 여건 등 다양한 요인과 관련이 있기 때문에, 미래 토지이용변화 모델링 과정은 매우 복잡하고 많은 불확실성을 내포하고 있다(Park *et al.*, 2009). 현재 토지 이용 변화에 대하여 공간적으로 예측할 수 있는 방법으로 Cellular Automata (CA)기법, Markov chain 기법, CA-Markov, CA-Deltatron, Conversation of Land Use Change and its Effects at Small regional extent (CLUE-s) 모형 등이 있지만, 이 중 CLUE-s는 환경변화와 토지이용정책 및 사회 경제적 변화를 반영할 수 있어 전 세계적으로 다양한 토지이용 예측 분야에 활용되고 있다. 우리나라에서는 Kim *et al.* (2008)이 CLUE-s 모형과 시계열 Landsat 영상을 이용해 토지피복 변화 예측 연구를 수행하였고, Ryu *et al.* (2014)이 진위A 단위유역을 대상으로 시공간적 미래 토지 이용 변화에 대한 분석을 CLUE-s 모형을 이용해 수행한 바 있다. 또한 Han *et al.* (2015)은 안양천 유역을 대상으로 Dyna-CLUE 모형을 이용해 기후 및 토지이용변화를 고려한 미래 홍수 유출을 분석하였다. 외국에서는 Zhang *et al.* (2013)이 CLUE-s와 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형을 결합하여 서로 다른 토지이용변화 시나리오에서 오염 부하 실험 모의를 수행하였다. 그러나 선행 토지이용 변화 연구들은 소규모 및 중규모 유역을 대상으로 과거 토지이용변화 면적을 기준으로 선행외삽을 통해 추정하였을 뿐, 미래 토지이용 정책반영을 고려하지 않았었다. 이에 Lee *et al.* (2016)이 토지이용 정책 반영을 고려한 도시성장 시나리오를 CLUE-s 모형에 적용하여 한반도의 미래 토지이용 변화를 예측한 바 있다.

토지이용변화와 더불어 기후변화를 적용한 연구로는 Legesse *et al.* (2003)이 열대 아프리카를 대상으로 기후 및 토지이용변화에 대하여 수문학적 반응을 연구하였고, Li *et al.* (2009)가 중국의 황토 고원을 대상으로 기후변화와 토지이용변화를 적용하여 수문학적 영향을 분석한 바 있다. 특히, Park *et al.* (2011)과 Ahn *et al.* (2015)은 충주댐 유역과 안성천 상류 유역에서 각각 SWAT 모형과 CLUE-s 모형을 이용해 기후변화 시나리오와 토지이용변화 시나리오에 따른 수문학적 영향 평가를 수행한 바 있으나, 기후변화나 토지이용변화를 고려한 수문분석 시 극한 기후사상에 대한 고려를 하지 않고 일반적인 수문 모델 보정이 수행되었다.

이에 본 연구에서는 미래에도 지속적으로 도시성장이 이뤄질 가능성이 있는 안성천의 공도 유역(366.5 km²)을 대상으로, 2014-2015년의 연속 가뭄년을 대상으로 한 저유량에서의 SWAT 모형 보정을 실시한 후에, 미래 기후변화 시나리오만으로 유역 수문 영향을 평가한 경우와 기후변화와 더불어 미래의 토지이용 변화에 따른 도시성장을 고려한 경우의 영향을 비교, 평가하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 대상유역

본 연구의 대상 유역은 안성천의 공도 수위관측소를 유역 출구로 하는 상류유역(Fig. 1)으로 북위 36°94'~36°95', 동경 127°23'~127°24'의 범위에 위치하고 있으며, 행정구역상으로는 안성시, 천안시와 용인시가 각각 90.2%, 1.1%, 8.7%를 차지하고 있다. 유역면적은 366.5 km², 주 하천의 유로연장은 26.8 km, 유역 평균 표고는 EL. 113.6 m, 유역 평균경사는 10.6%이며, 안성천 전체의 약 23%를 차지하고 있다. 유역의 연평균(1975-2015년) 강수량은 1219.4 mm이고, 연평균(1998-2015년) 유출량은 609.63 mm, 연평균(1975-2015년) 기온은 13°C이다.

2.2 SWAT 모형의 개요

본 연구에서는 수문모의를 위해 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)에서 개발된 일 단위의 모의가 가능한 유역 단위의 준 분포형 모형인 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형을 선정하였다. SWAT 모형은 물리적 기반의 장기 강우-유출 모형으로서, 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 유출의 영향을 예측하기 위해 개

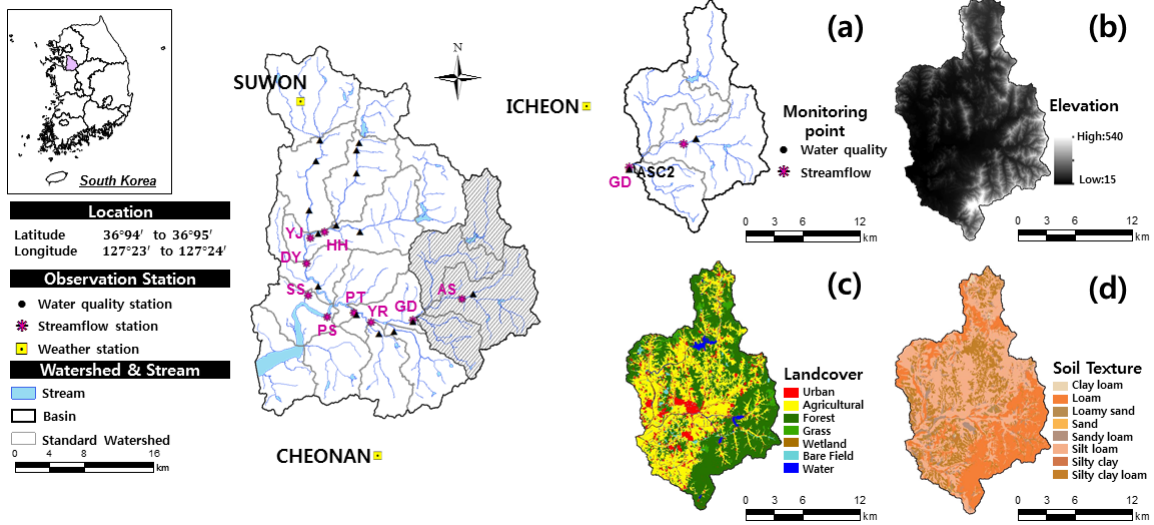


Fig. 1. Location of Gongdo watershed and (a) Observation stations, (b) DEM, (c) Land cover, (d) Soil Texture

발되었으며 물수지 방정식에 근거를 두고 강수, 증발산, 지표 유출, 기저유출, 지하수, 토양수분 등에 대한 모의를 각 수문반응단위(Hydrologic Response Units, HRUs) 별로 계산할 수 있다(Arnold *et al.*, 1996). SWAT 모형에서 사용되는 물수지 방정식은 Eq. (1)과 같다(Neitsch *et al.*, 2001).

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

여기서, SW_t 는 최종 토양수분량($mm H_2O$), SW_0 는 i 일의 초기 토양수분량($mm H_2O$), R_{day} 는 i 일의 강수량(mm), t 는 시간(일), Q_{surf} 는 i 일의 지표유출량(mm), W_{secp} 는 i 일의 지표하 침투량(mm), E_a 는 i 일의 증발산량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀수량($mm H_2O$)이다. 이 때, 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수량 추적기법을 사용하여 계산하게 된다. 한편, SCS (USDA-SCS, 1972)의 유출곡선법(Curve Number)에 의해 지표유출량을 산정하며, 측방유출량은 동역학적 저류 모형(Kinematic Storage Model)을 이용하였다.

2.3 토지 이용 변화 시나리오 및 CLUE-s 모형

도시화율은 전체 인구 중 도시에 거주하는 인구의 비중으로 나타낼 수 있으며, 도시화율의 증감을 통해 한 나라의 도시화가 어떻게 전개되고 있는지 가늠해 볼 수 있다. 우리나라는 1961년 정부의 경제개발 이후 도시화가 급속하게 전개되었으며 도시화율은 1960년 28.0%에서 1970년 41.2%, 1980년 57.3%로 상승하며 1990년에는 74.4%로 서구 도시화의 종착

단계라 할 수 있는 75%에 이르렀다고 평가된 바 있다(Cho, 2003). 그러나, Kim *et al.* (2013)의 우리나라의 농지이용 전망에 따르면, 경지 면적이 2012년 168.9만 ha에서 향후 도시개발 등에 따른 농지 전용 등의 영향으로 2022년에는 2012년보다 9.1만 ha 감소한 159.8만 ha 수준으로 전망한 바 있어, 수도권 외곽지역의 도시성장은 미래에도 꾸준히 이어질 것으로 생각된다. 가장 최근의 미래 토지이용변화 선행연구로는 Lee *et al.* (2016)의 CLUE-s 모형을 통한 2100년까지의 예측 연구가 수행된 바 있다.

CLUE-s 모형은 네덜란드 Wageningen 대학에서 지역단위의 작은 스케일에 적용하지 못하는 기존의 CLUE 모형을 개선하여 개발한 모형이다. CLUE-s 모형은 비공간적 모듈과 공간적 모듈로 구성되어 있으며, 비 공간적 모듈은 총괄적으로 모든 토지이용 유형에 대한 지역의 변화를 계산하고 공간적 모듈에서 이를 레스터 자료로 기반 시스템을 사용하여 인

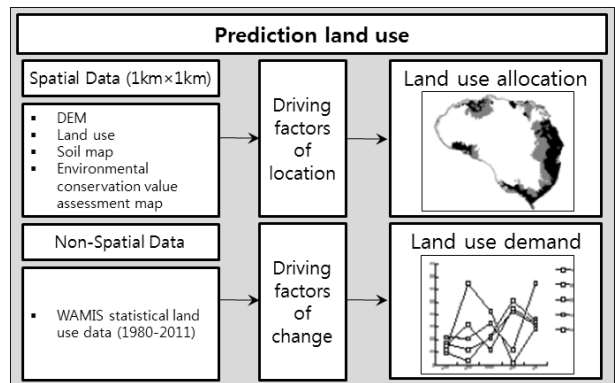


Fig. 2. CLUE-s modeling procedure (Verburg *et al.*, 1999)

구지역 내 다른 위치로 토지이용 유형을 할당하는 구조를 지닌다(Fig. 2). CLUE-s 모델은 비공간적 모듈을 제외한 공간적 모듈만 사용자 인터페이스(User-Interface)로 제공하기 때문에, 비공간적 모듈에 필요한 자료와 결과는 사용자가 직접 엑셀이나 SPSS와 같은 통계 프로그램을 이용하여 작성하여야 한다(Rye *et al.*, 2014).

2.4 자료수집 및 분석 방법

2.4.1 SWAT 모의 데이터

SWAT 모형 구동을 위한 공간자료는 DEM, 토지이용도, 토양도가 요구되며, 기상자료는 강수량(mm), 최저 및 최고기온(°C), 풍속(m/sec), 상대습도(%) 및 일사량(MJ/m²)이 필요하다. 본 연구에서는 Kim and Kim (2017)이 안성천 공도유역에 대하여 총 14년(2002-2015년)에 대하여 기 구축한 SWAT 모의 데이터를 활용하였다.

Kim and Kim (2017)은 공도유역에 대하여 수문 매개변수 민감도 분석을 실시하여 가뭄 시 적용 가능한 매개변수를 선정하고 이를 일반보정(평균)과 가뭄기간(2014-2015년)을 고려한 보정한 결과를 비교하였다. 일반보정에 의한 전 기간(2002-2015년)의 평균 R²는 0.60, NSE_Q 와 $NSE_{inverseQ}$ 에 대한 효율은 각각 0.78, 0.58이었으며, 가뭄년 집중 보정한 매개변수 적용 시 전 기간의 평균 R²는 0.69, 유출량 NSE_Q 와 $NSE_{inverseQ}$ 에 대한 효율은 각각 0.86, 0.76으로 전체적인 모

델 효율이 향상된다는 것을 보여주었다. 본 연구에서는 Kim and Kim (2017)이 추정된 SWAT 가뭄보정 매개변수를 활용하여 2016년도 자료를 추가 검보정을 실시한 후, 기후변화와 토지이용 변화에 따른 수문환경의 변화가 유역의 유출에 미치는 영향을 평가하였다.

2.4.2 기후변화 시나리오

IPCC AR5 (Fifth Assessment Report)의 RCP는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 산정하였다. RCP 시나리오는 SRES 자료의 노후화 및 해상도 문제를 보완

Table 1. Summary of future predicted HadGEM3-RA temperature and precipitation in study watershed

Period		Temperature (°C)	Precipitation (mm)
Baseline (1976-2005)		11.7	1267.3
RCP 4.5	2030s (2020-2039)	13.6 (+1.8)	1195.4 (-5.7%)
	2050s (2040-2059)	14.1 (+2.4)	1504.6 (18.5%)
RCP 8.5	2030s (2020-2039)	13.3 (+1.6)	1264.4 (-0.2%)
	2050s (2040-2059)	14.3 (+2.6)	1349.8 (6.5%)

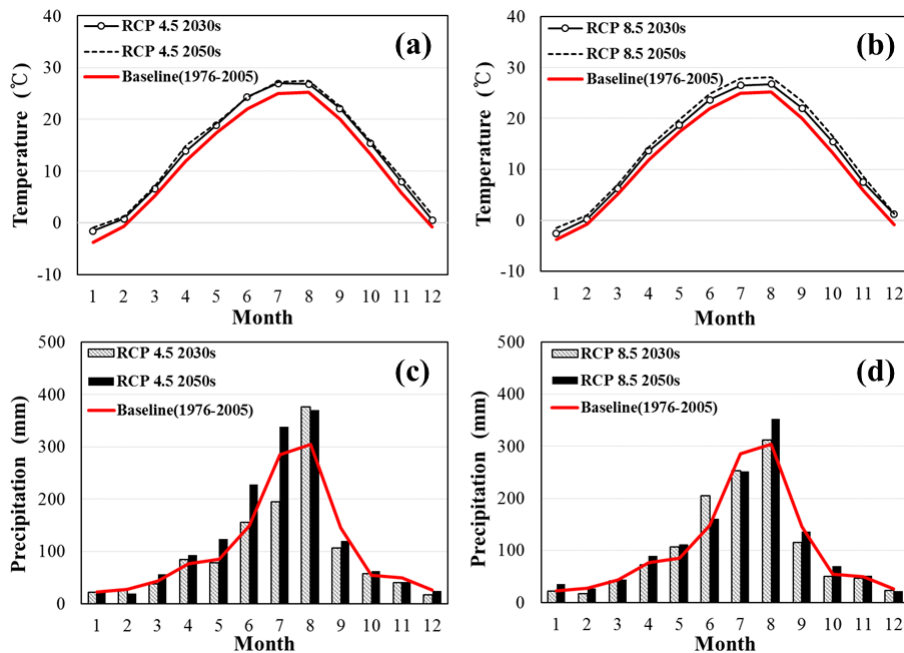


Fig. 3. Future monthly temperature and precipitation based on baseline period (1976-2005) (a) RCP 4.5 temperature, (b) RCP 8.5 temperature, (c) RCP 4.5 precipitation and (d) RCP 8.5 precipitation

하고 정확도 향상을 위해 새로운 시나리오 도입의 필요성에 의해 개발된 것이다. RCP 시나리오는 복사강제력(W/m^2)을 기준으로 RCP 2.6, 4.5, 6.0 및 8.5로 구분된다(NIMR, 2011).

미래기후예측모형으로 전지구 기후모형(Global Climate Models, GCMs)은 수백 킬로미터에 달하는 기후 예측치를 비교적 정확하게 전망하는 것으로 평가되고 있지만, 공간해상도의 제약으로 인하여 지역규모 기후변화 전망에는 한계를 갖는다. 이에 GCMs의 공간해상도 문제의 해결방안으로 다양한 상세화 과정이 있으며 그 중에서 대표적인 방안으로는 지역기후모형(Regional Climate Models, RCM 또는 RCMs)이 있다. RCM은 특정지역 및 국지규모를 대상으로 활용이 가능한 대표적인 역학적 상세화 방안으로, 물리적으로 기후경계조건을 고려하기 때문에 공간적으로 상세하고 예측도 높은 미래 기후정보의 생산이 가능하다(Kim *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2016) 따라서, 본 연구에서는 기상청에서 제공하는 HadGEM3-RA 기후모형의 모의결과 값을 이용하였다. HadGEM3-RA 기후모형의 공간해상도는 12.5 km이며, RCP 4.5, 8.5 기반의 일별 강수량, 최고/최저 기온, 상대습도, 풍속 자료(2006-2099년)를 제공하고 있다(NIMR, 2011). 본 연구에서는 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 대한 과거 30년(1976-2005년, Baseline), 미래는 가까운 미래의 영향을 집중적으로 평가하기 위하여, 2030s (2020-2039년)와 2050s (2040-2059년)의 두 기간으로 구분하여 분석을 수행하였다.

HadGEM3-RA의 RCP 4.5와 8.5 시나리오에 대한 연별 변화 및 월별 변화는 Table 1 and Fig. 3에 정리하였다. 기준년(1976-2005년) 대비 미래 강수량은 RCP 4.5에서 2030s에 최대 5.7%의 감소, 2050s에는 최대 18.5% 증가하였고, 미래 기온은 2030s RCP 4.5에서 최대 1.8°C, 2050s RCP 8.5에서 최대 2.6°C 증가하였다. 기온은 2050s RCP 8.5에서 6~9월에 최대 3.4°C까지 증가하였다. 강수량의 경우는 6~9월에 2030s RCP 4.5에서 최대 7.4% 감소, 2050s RCP 4.5에서는 최대 19.3% 증가하는 변화를 보여, 미래 강수량에 대하여 큰 증감폭을 보이고 있다.

2.4.3 CLUE-s 모형을 이용한 미래토지이용 변화

CLUE-s 모형의 구동을 위해 필요한 자료(driving factor)는 총 5가지로 토지이용도(land use map), 특별토지이용정책(spatial policies and restriction), 토지이용요구자료(land use requirements), 지역특성자료(location characteristics), 토지이용변화 매개변수자료(land use type specific conversion setting)로 구분된다.

토지이용도는 SWAT 모형과 동일한 자료를 활용하였으며, 특별토지이용정책 자료로는 환경부의 국토환경성평가 지도를 이용하였다. 토지이용요구 자료는 국가수자원관리 종합정보시스템(Water Management Information System, WAMIS)의 과거 1980년부터 구축된 토지이용 통계자료를 활용하였다. 지역특성자료로는 총 9가지(DEM, 경사(slope), 경사향(aspect), 수문학적 토양그룹, 토양 깊이, 토양 타입, 하천으로부터의 거리, 도시로부터의 거리, 국도/지방도로부터의 거리)의 토지 변화요소를 생성한 후, SPSS 통계프로그램을 이용해 각 토지이용 항목의 영향에 대한 회귀분석을 실시하고, 다중공선성 및 상관관계를 확인한 후 p값이 0.05 미만인 해당하는 유효한 값들을 CLUE-s 모형의 입력 자료로 활용하였다. 마지막으로 토지이용변화 매개변수자료로는 변환탄성 계수와 변환행렬을 이용하였으며, CLUE-s 모형의 입력자료 구축 및 결과 분석에 대한 자세한 내용은 Lee *et al.* (2016)에서 찾아볼 수 있다. 본 연구에서는 2100년대까지의 토지이용변화 예측자료 중에서 2020년대에서 2050년대의 토지이용도를 적용하였다.

도시성장 시나리오와 CLUE-s 모형을 이용해 미래 토지이용 변화를 예측한 결과, 2020-2050년도의 토지이용 변화를 Table 2에 정리하였다. 토지이용변화 시나리오에 따른 미래 토지이용별 면적은 전반적으로 농경지의 면적이 최소 6.7%에서 최대 17.8% (135.0 → 102.0 km²)로 줄어들었으며, 도시 지역 면적이 최대 58.6% (29.0 → 46.0 km²) 까지 늘어나는 것으로 나타났다. 산림의 경우 2.3%에서 최대 4.1% (171.0 → 178.0 km²)로 증가하는 추세를 보였는데, 이는 전체면적이 변

Table 2. Summary of future CLUE-s land use change prediction

Period	Year	Land use (km ²)				
		Water	Urban	Agriculture	Forest	Grass
Baseline	2008	9	29	135	171	17
Prediction	2020	10 (+11.1%)	35 (+20.7%)	126 (-6.7%)	175 (+2.3%)	15 (-11.8%)
	2030	10 (+11.1%)	42 (+44.8%)	118 (-12.6%)	176 (+2.9%)	15 (-11.8%)
	2040	10 (+11.1%)	44 (+51.7%)	114 (-15.6%)	177 (+3.5%)	16 (-5.9%)
	2050	10 (+11.1%)	46 (+58.6%)	102 (-17.8%)	178 (+4.1%)	16 (-5.9%)

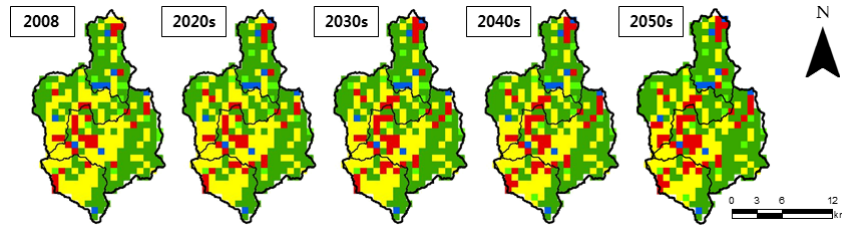


Fig. 4. Future land use change prediction results

Table 3. Validation of regression equation based on land use data at 2013

Water			Urban			Agriculture			Forest			Grass			Total		
Obs (km ²)	Sim (km ²)	Err. (%)	Obs (km ²)	Sim (km ²)	Err. (%)	Obs (km ²)	Sim (km ²)	Err. (%)	Obs (km ²)	Sim (km ²)	Err. (%)	Obs (km ²)	Sim (km ²)	Err. (%)	Obs (km ²)	Sim (km ²)	Err. (%)
10.0	10.0	0.0	32.0	35.0	8.6	129.0	128.0	0.8	173.0	175.0	1.1	17.0	16.0	6.3	361.0	364.0	0.8

하지 않는다는 조건 하에 CLUE-s 모형을 통하여 토지이용변화가 예측되었기 때문에 일부 농경지의 감소가 산림의 증가로 반영된 것으로 판단된다(Fig. 4).

본 연구에서는 시나리오 검증에 위해 2015년의 환경부 토지 이용도와 비교를 통한 오차 분석을 실시하였다. 이를 통하여 과거 통계자료를 기반으로 하여 도시성장시나리오를 적용한 안성천의 공도구역의 미래 토지이용 변화에 관하여 Lee *et al.* (2016)에서 제시한 회귀방정식의 모의 정확도를 확인해 보고자 하였다. Table 3에서는 미래 토지이용변화 회귀방정식을 통하여 2013년의 각 토지이용 면적을 산정하고 토지이용 요소별 각각의 면적과 실제 통계자료와의 오차율을 나타낸 것이다. 각 항목별 오차율을 산정한 결과 수역(0.0%), 도시지역(8.6%), 농경지(0.8%), 산림(1.1%) 및 초지(6.3%)의 오차율을 보였으며, 평균 5% 이하의 오차율을 보이며 산정한 토지이용 회귀방정식에 대하여 적절하게 예측하고 있음을 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SWAT 수문 검보정

유출량에 대한 SWAT 모형의 검보정은 선행연구의 민감도 분석과 검보정 자료를 참고하였으며 덧붙여 2014년, 2015년에 이어 가뭄의 영향이 있었던 2016년도 기상청에서 기상자료 및 WAMIS에서 유출량 자료를 추가 구성하여 검보정(2002-2016년, 15개년)을 진행하였다(Kim and Kim, 2017). 가뭄보정에 사용되어진 9개의 매개변수를 그대로 적용하여 모의를 실시하였으며, 검보정 결과 전 기간 평균 R²는 0.67, NSE_Q와 NSE_{inverseQ}에 대한 효율은 각각 0.84, 0.75를 나타냈다(Table 4).

3.2 미래 기후변화를 고려한 경우의 수문거동 변화 분석

Table 5는 SWAT 모형으로 미래 기후변화 RCP 시나리오 자료를 적용하여 수문요소인 증발산(Evapotranspiration, ET), 토양수분(Soil Water, SW), 지표유출(Surface Runoff, SQ), 회귀유출(Return Flow, RF), 중간유출(Lateral Flow, LAT), 그리고 총 유출(Total Runoff, TQ)에 대한 변동성을 분석하여 정리한 것이다.

증발산량의 경우, 미래 기온의 증가영향으로, 2030s RCP 4.5에서 최소 13.7%, 2050s RCP 4.5에서 최대 28.9%로 증가하였으며, 토양수분은 2050s RCP 4.5에서 최소 23.0%, 2030s RCP 4.5에서 최대 43.4%의 감소 추세를 보였다. 지표유출은 2030s RCP 4.5에서 강수량의 감소원인으로 최대 12.1% 감소, 2050s RCP 4.5에서는 강수량의 증가로 최대 22.4% 증가하는 증감의 경향을 보였으며, 회귀유출은 2050s RCP 4.5에서 최소 6.6%, 2030s RCP 4.5에서 최대 51.4% 감소하는 것으로 나타났다. 이와 같은 수문요소들의 변화로, 총 유출은 2030s RCP 4.5에서 최대 24.2%까지 감소하였고, 2050s RCP 4.5에서는 10.9% 증가하는 것으로 나타났다.

3.3 미래 기후변화와 토지이용변화를 고려한 경우의 수문거동 변화분석

SWAT을 이용한 수문 검보정 결과에 미래 기후변화 시나리오와 토지이용 변화 시나리오를 동시에 적용한 결과(Table 6), 강수량의 경우 3.2절에서 적용된 기후변화 시나리오와 동일하기 때문에 증감의 변화가 동일하게 나타났다. Baseline 대비 증발산량은 2030s RCP 4.5에서 최소 9.2% 증가, 2050s RCP 4.5에서 최대 24.1% 증가하였다. 토양수분 2030s RCP 4.5에서 25.1%까지 감소, 2050s RCP 4.5에서 2.1% 증가하였으며, 지표유출은 2030s RCP 4.5에서 최소 48.9%, 2050s

Table 4. Summary of calibration and validation results

Year	PCP (mm)	Runoff (mm)		Runoff ratio (%)		R ²	RMSE (mm/day)	NSE	
		Observed	Simulated	Observed	Simulated			Q*	InQ**
2002	1,146.4	555.0	663.5	48.4	57.9	0.96	1.99	0.96	0.51
2003	1,522.9	857.8	948.5	56.3	62.3	0.83	2.59	0.96	0.86
2004	1,168.7	635.2	723.3	54.4	61.9	0.73	0.12	0.94	0.90
2005	1,362.5	690.9	686.4	50.7	50.4	0.87	0.24	0.98	0.91
2006	1,008.4	647.8	695.5	64.2	69.0	0.81	0.63	0.82	0.88
2007	1,437.9	630.9	781.7	43.9	54.4	0.62	7.89	0.95	0.64
2008	1,118.8	428.5	511.6	38.3	45.7	0.67	4.35	0.92	0.79
2009	1,291.1	338.5	566.6	26.2	43.9	0.81	11.94	0.44	0.80
2010	1,426.0	653.8	721.7	45.8	50.6	0.40	3.55	0.49	0.75
2011	1,927.3	1,285.5	1,230.0	66.7	63.8	0.74	2.91	0.81	0.75
2012	1,548.8	737.1	835.1	47.6	53.9	0.71	5.12	0.97	0.73
2013	1,193.4	663.8	633.5	55.6	53.1	0.40	1.59	0.90	0.71
2014	997.9	375.2	362.7	37.6	36.3	0.73	0.66	0.97	0.88
2015	514.4	201.5	169.4	39.2	32.9	0.44	1.94	0.86	0.58
2016	998.2	519.4	583.6	52.0	58.5	0.49	3.91	0.62	0.54
Avg.	1,277.2	621.1	664.7	47.5	50.8	0.67	4.19	0.84	0.75

*NSE_Q, **NSE_{InQ} (inverse discharge)**Table 5.** Summary of future predicted hydrological components by climate change scenario

Scenarios		PCP mm, (%)	ET mm, (%)	SW mm, (%)	SQ mm, (%)	RF mm, (%)	LAT mm, (%)	TQ mm, (%)
Baseline (1976-2005)		1,267.3	603.2	93.2	115.9	150.7	334.4	601.0
RCP 4.5	2030s	1,195.4 (-5.7)	685.7 (+13.7)	52.7 (-43.4)	101.9 (-12.1)	73.2 (-51.4)	280.8 (-16.0)	455.8 (-24.2)
	2050s	1,501.6 (+18.5)	777.6 (+28.9)	71.7 (-23.0)	141.9 (+22.4)	140.7 (-6.6)	384.0 (+14.8)	666.6 (+10.9)
RCP 8.5	2030s	1,264.4 (-0.2)	712.9 (+18.2)	61.3 (-34.2)	113.4 (-2.2)	92.6 (-38.6)	301.7 (-9.8)	507.6 (-15.5)
	2050s	1,349.8 (+6.5)	742.4 (+23.1)	63.2 (-32.2)	107.0 (-7.7)	110.4 (-28.7)	339.1 (+1.4)	556.5 (-7.4)

PCP: Precipitation, ET: Evapotranspiration, SW: Soil Water, SQ: Surface Runoff, RF: Return Flow, LAT: Lateral flow, TQ: Total Runoff

Table 6. Summary of future predicted hydrological components by climate change and land use change scenarios

Scenarios		PCP mm, (%)	ET mm, (%)	SW mm, (%)	SQ mm, (%)	RF mm, (%)	LAT mm, (%)	TQ mm, (%)
Baseline (1976-2005)		1,267.3	603.2	93.2	115.9	150.7	334.4	601.0
RCP 4.5	2030s	1,195.4 (-5.7)	658.6 (+9.2)	69.8 (-25.1)	172.6 (+48.9)	39.6 (-73.8)	299.1 (-10.6)	511.2 (-14.9)
	2050s	1,501.6 (+18.5)	748.5 (+24.1)	95.2 (+2.1)	245.7 (+111.9)	75.8 (-49.7)	396.6 (+18.6)	718.1 (+19.5)
RCP 8.5	2030s	1,264.4 (-0.2)	685.4 (+13.6)	81.0 (-13.0)	189.0 (+63.1)	50.5 (-66.5)	319.6 (-4.4)	559.2 (-7.0)
	2050s	1,349.8 (+6.5)	715.4 (+18.6)	86.1 (-7.6)	192.4 (+66.0)	59.8 (-60.3)	356.4 (+6.6)	608.6 (+1.3)

PCP: Precipitation, ET: Evapotranspiration, SW: Soil Water, SQ: Surface Runoff, RF: Return Flow, LAT: Lateral flow, TQ: Total Runoff

RCP 4.5에서 최대 111.9%까지 증가하는 경향을 보였다. 회귀유출은 2030s RCP 4.5에서 최대 73.8%까지 감소하였으며, 총유출은 2030s RCP 4.5에서 14.9% 감소, 2050s RCP 4.5에서 19.5% 증가하는 것으로 나타났다.

Tables 4 and 5에서 보는 바와 같이, 미래 기후변화만을 고려하였을 경우보다 미래의 기후변화와 토지이용 변화를 동시에 고려한 경우에는 도시성장에 따른 불투수지역의 증가로 증발산량의 감소, 이에 따른 지표유출의 증가로, Baseline (1976-2005년) 기준으로 2050s RCP 4.5에서 최대 103.8 mm (+89.5%)의 지표유출량의 차이를 보였으며, 2030s RCP 4.5에서는 -12.1% (101.9 mm)의 감소가 +48.9% (172.6 mm)의 증가로 변화되는 것으로 나타났다. 이로 인하여 2030s와 2050s RCP 4.5의 경우에 기후변화만에 의한 총유출 -24.2% (455.8 mm), +10.9% (666.6 mm)가 미래 토지이용변화를 추

가로 고려하면 각각 -14.9% (511.2 mm), +19.5% (718.1 mm)로 증가하여, 미래의 토지이용 요소가 기후변화에 따른 유역 수문에 미치는 영향이 필요한 것으로 나타났다.

3.4 도시성장지역의 수문거동 변화분석

유역 출구지점인 공도 수위 관측소 지점의 유역 평균 수문 순환 해석과 더불어, 공도유역 내 4개의 표준단위유역을 대상으로 미래의 수문 요소별 변화를 소유역 별로 정리하여 보았다. Fig. 5에서 보는 바와 같이, 도시면적(2008: 17.0 km²)이 가장 큰 Basin 2 (면적: 147.3 km²)의 2050년대 도시면적이 23.0 km²로 증가하는 것으로 나타나, 이 유역을 중심으로 나머지 유역들의 수문변화를 비교 평가해 보았다.

Table 7에서 보는 바와 같이 기후변화만을 적용한 결과, 도시성장유역 Basin 2의 증발산량은 2030s RCP 4.5에서 최소

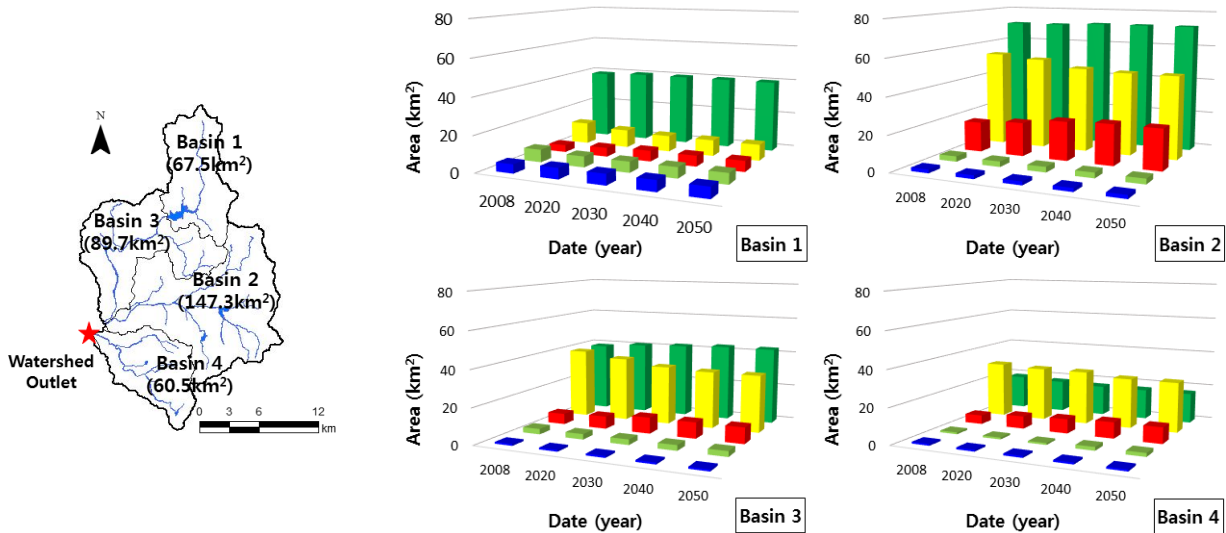


Fig. 5. Summary of future land use change by standard watershed unit

Table 7. Summary of future predicted hydrological components by climate change scenario in basin 2

Scenarios		PCP mm, (%)	ET mm, (%)	SW mm, (%)	SQ mm, (%)	RF mm, (%)	LAT mm, (%)	TQ mm, (%)
Baseline (1976-2005)		1,252.4	570.3	132.3	30.4	169.9	442.2	641.6
RCP 4.5	2030s	1,225.7 (-2.1)	618.8 (+8.5)	60.0 (-54.7)	44.0 (+44.7)	127.8 (-24.4)	404.5 (-8.5)	576.3 (-10.2)
	2050s	1,490.7 (+19.0)	713.6 (+25.1)	95.7 (-27.7)	46.5 (+52.9)	188.4 (+11.5)	521.3 (+17.9)	756.2 (+17.9)
RCP 8.5	2030s	1,259.9 (+0.6)	648.3 (+13.7)	73.3 (-44.6)	34.3 (+12.8)	145.1 (-14.1)	417.0 (-5.7)	596.4 (-7.0)
	2050s	1,313.1 (+4.8)	672.7 (+17.9)	72.3 (-45.4)	27.3 (-10.2)	154.4 (-8.6)	441.0 (-0.3)	622.7 (-2.9)

PCP: Precipitation, ET: Evapotranspiration, SW: Soil Water, SQ: Surface Runoff, RF: Return Flow, LAT: Lateral flow, TQ: Total Runoff

Table 8. Summary of future predicted hydrological components by climate change and land use change scenarios in basin 2

Scenarios		PCP mm, (%)	ET mm, (%)	SW mm, (%)	SQ mm, (%)	RF mm, (%)	LAT mm, (%)	TQ mm, (%)
Baseline (1976-2005)		1,252.4	570.3	132.3	30.4	169.9	442.2	641.6
RCP 4.5	2030s	1,225.7 (-2.1)	557.3 (-2.3)	43.6 (-67.1)	139.8 (+359.9)	92.6 (-45.2)	405.1 (-8.4)	637.5 (-0.6)
	2050s	1,490.7 (+19.0)	646.6 (+13.4)	67.2 (-49.2)	165.4 (+444.2)	145.8 (-13.7)	507.7 (+14.8)	819.0 (+27.6)
RCP 8.5	2030s	1,259.9 (+0.6)	583.0 (+2.2)	50.3 (-62.0)	127.0 (+317.7)	108.0 (-36.1)	421.1 (-4.8)	656.1 (+2.3)
	2050s	1,313.1 (+4.8)	602.7 (+5.7)	52.0 (-60.7)	116.8 (+284.3)	123.0 (-27.2)	444.3 (+0.5)	684.1 (+6.6)

PCP: Precipitation, ET: Evapotranspiration, SW: Soil Water, SQ: Surface Runoff, RF: Return Flow, LAT: Lateral flow, TQ: Total Runoff

8.5% 증가, 2050s RCP 4.5에서 최대 25.1% 증가하여, Table 7의 기후 및 토지이용변화를 동시에 적용한 결과와 비교하면, 동일 기간, 동일 시나리오에 대한 2.3% 감소, 13.4% 증가와 비교하면 큰 차이를 보였다. 기후변화만을 적용한 지표유출은 2050s RCP 4.5에서 최대 52.9% 증가, 이로 인한 총유출은 최대 17.9% 증가한 반면, 기후 및 토지이용변화를 동시에 적용하면 동일 기간, 동일 시나리오에 대하여 각각 444.2% 증가, 27.6% 증가하여 총유출의 변화도 큰 것을 알 수 있었다.

Table 8에서 보는 바와 같이 기후 및 토지이용변화를 동시에 적용한 결과, Basin 2의 증발산량은 2030s RCP 4.5에서 2.3% 감소, 2050s RCP 4.5에서 최대 13.4% 증가하여, 전체 유역의 동일 기간, 동일 시나리오에 대한 9.2% 증가, 24.1% 증가에 비해 도시성장유역은 증발산량이 감소하거나 증가율이 크게 저하되는 것으로 나타났다. 2050s RCP 4.5에서 지표유출은 최대 444.2% 증가, 이로 인한 총유출은 최대 27.6% 증가하는 것으로 나타나, 전체유역의 동일 기간, 동일 시나리오에 대하여 각각 111.9% 증가, 19.5% 증가와 비교하면, Basin 2 유역의 도시성장에 따른 수문변화가 전체유역의 수문변화에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 따라서, 미래의 토지이용변화가 크게 나타난 지역을 대상으로 저영향개발 (Low Impact Development, LID) 기법을 도입하는 등 미래의 유역관리에 집중적으로 대비할 필요가 있다.

4. 결론

본 연구에서는 안성천의 상류 공도유역(366.5 km²)을 대상으로 미래 기후변화와 토지이용변화에 따른 수문영향을 평가하기 위해, HadGEM3-RA RCP 4.5 및 8.5 기후변화 시나리오와 CLUE-s 모형의 도시성장 시나리오에 의한 미래 토지이용

도를 SWAT 모형에 적용하여 유역의 미래 수문변화를 분석하였다.

총 15년(2002-2016년) 동안의 유역출구 일유량 자료를 이용하여, 2014-2016년 가뭄년을 중심으로 SWAT모형을 검보 정했으며, 전 기간 평균 R²는 0.67, Nash-Sutcliffe 모형효율 NSE_Q 와 $NSE_{inverse_Q}$ 대하여 각각 0.84, 0.75를 나타냈다. 미래 기후변화 및 토지이용변화 평가를 위하여, 가까운 미래인 2030s (2020-2039년), 2050s (2040-2059년) 두 기간으로 나누어 적용하였으며, Baseline (1976-2005년)을 기준으로 2050s RCP 4.5에서 평균기온이 최대 2.4°C 증가하며, 강수량은 RCP 4.5에서 2030s에서는 5.7% 감소하다가 2050s에서 다시 최대 18.5% 증가하였다. 미래 토지이용변화는 2008년 대비 2050년대에 농경지의 면적이 최대 17.8%로 감소하였으며, 도시면적이 최대 58.6%까지 증가하는 것으로 예측되었다.

기후변화 시나리오만을 적용한 결과, 미래 기온 증가의 영향으로 2050s RCP 4.5에서 Baseline 대비 증발산량은 최대 28.9% 증가, 토양수분은 23.0% 감소하였다. 지표유출의 경우 최대 22.4% 증가, 총유출은 최대 10.9% 증가하는 경향을 보였다. 한편, 기후변화와 토지이용변화 시나리오를 동시에 적용한 결과에서는 Baseline 대비 2050s RCP 4.5에서 Baseline 대비 증발산량은 최대 24.1% 증가, 토양수분은 최대 2.1% 증가하였다. 지표유출은 111.9% 증가, 총유출은 최대 19.5% 증가하였다. 이는 미래 기후변화만을 고려한 경우보다 미래의 기후변화와 토지이용 변화를 동시에 고려한 경우 도시성장에 따른 불투수지역의 증가가 증발산량의 감소로 나타났으며, 이에 따라 지표유출의 증가로 나타났다. 따라서, 도시성장 가능성이 큰 유역이나 토지이용 변화 가능성이 높은 유역에 대해서는 미래의 기후변화에 따른 유역의 수문평가 시, 토지이용변화 요소도 함께 고려할 필요가 있다. 특히, 미래 도시성장이 진행되는 소유역에서는 토양수분의 감소와 더불어 회귀유

량의 감소가 보다 진행되어 평상시 하천유량이 줄어들고, 홍수기에는 홍수유출의 증가로 가뭄과 홍수에 더욱 취약해질 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업 연구비지원 (과제번호 17AWMP-B079625-04)에 의해 수행되었습니다.

References

- Ahn, S. R., Jang, C. H., Lee, J. W., and Kim, S. J. (2015). "Assessment of climate and land use change impacts on watershed hydrology for an urbanizing watershed." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 35, No. 3, pp. 567-577.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Srinivasan, R., and King, K. W. (1996). *SWAT Manual*. USDA, Agricultural Research Service and Blackland Research Center, Texas.
- Cho, M. R. (2003). "Trend and prospect of urbanization in Korea: reflections on Korean cities." *Economy and Society*, Vol. 60, pp. 10-39.
- Han, W. S., Jeong, S. J., and Kim, B. S. (2015) "The analysis method of future flooding discharge considering climate and land-use change using Dyna-CLUE." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 6, pp. 361-371.
- Kim, D. R., and Kim, S. J. (2017). "A Study on parameter estimation for SWAT calibration considering streamflow of long-term drought periods." *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 59, No. 2, pp. 19-27.
- Kim, J. H., Kim, S. D., Park, M. J., and Joo, J. G. (2016) "A comparison of drought prospection by future climate models." *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 16, No. 2, pp. 463-472.
- Kim, J. H., Park, M. J., and Joo, J. G. (2015) "Comparison of characteristics and spatial distribution tendency of daily precipitation based on the regional climate models for the Korean peninsula." *Journal of Korea Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 4, pp. 59-70.
- Kim, M. H., Han, S. H., Joh, J. S., and Kim, T. W. (2013). *KREI outlook of the agricultural economy*. Korean Rural Economic Institute, p. 31.
- Kim, W. S., Yun, K. H., Heo, J., and Jayakumar, S. (2008). "The expectation of the land use and land cover using CLUE-s model and Landsat images." *The Korean Society for Geospatial Information System*, Vol. 16, No. 1, pp. 33-41.
- Lee, Y. G., Cho, Y. H., and Kim, S. J. (2016). "Prediction of land-use change based on urban growth scenario in South Korea using CLUE-s model." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 19, No. 3, pp. 75-88.
- Legesse, D., Vallet-Coulomb, C., and Gasse, F. (2003). "Hydrological response of a catchment to climate and land use change in Tropical Africa: case study South Central Ethiopia." *Journal of Hydrology*, Vol. 275, No. 1-2, pp. 67-85.
- Li, Z., Liu, W. Z., Zhang, X. C., and Zheng, F. L. (2009). "Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China." *Journal of Hydrology*, Vol. 377, No. 1-2, pp. 35-42.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2001). *Soil and Water Assessment Tool: Theoretical documentation*. Texas Water Resources Institute.
- NIMR (2011). *Climate change scenario report 2011 to respond to the IPCC 5th Assessment Report*. National Institute of Meteorological Research, Korea.
- 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., Joh, H. K., Shin, H. J., Kwon, H. J., Srinivasn, R., and Kim, S. J. (2011). "Assessment of MIROC3.2 HiRes climate and CLUE-s land use change impacts on watershed hydrology using SWAT." *Transactions of the ASABE*, Vol. 54, No. 5, pp. 1713-1724.
- Ryu, J. C., Ahn, K. H., Han, M. D., Hwang, H. S., Choi, J. W., Kim, Y. S., and Lim, K. J. (2014). "Evaluation and application of CLUE-s model for spatio-temporal analysis of future land use change in total water pollution load management system." *Journal of Korea Society on Water Environment*, Vol. 30, No. 4, pp. 418-428.
- USDA-SCS (1972). *National Engineering Handbook, Section 4: Hydrology*. USDA Soil Conservation Service, Washington, D.C.
- Zhang, P., Liu, Y., Pan, Y., and Yu, Z. (2013). "Land use pattern optimization based on CLUE-S and SWAT models for agricultural non-point source pollution control." *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 58, No. 3-4, pp. 588-595.