

SWAT 모형과 BFlow를 이용한 지하수 함양, 기저유출의 시공간적 변화 분석

이지민 · 박윤식 · 정영훈* · 조재필** · 양재의*** · 이관재 · 김기성 · 임경재†

국립강원대학교 지역건설공학과

*국립강원대학교 환경연구소

**APEC 기후센터

***국립강원대학교 바이오자원환경학과

Analysis of Spatiotemporal Changes in Groundwater Recharge and Baseflow using SWAT and BFlow Models

Ji Min Lee · Youn Shik Park · Younghun Jung* · Jaepil Cho** · Jae Eui Yang*** ·
Gwanjae Lee · Ki-sung Kim · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

*Environmental Research Center, Kangwon National University

**APEC climate center

***Department of Biological Environment, Kangwon National University

(Received 19 August 2014, Revised 23 September 2014, Accepted 25 September 2014)

Abstract

Occurrence frequency of flood and drought tends to increase in last a few decades, leading to social and economic damage since the abnormality of climate changes is one of the causes for hydrologic facilities by exceedance its designed tolerance. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used in the study to estimate temporal variance of groundwater recharge and baseflow. It was limited to consider recession curve coefficients in SWAT model calibration process, thus the recession curve coefficient was estimated by the Baseflow Filter Program (BFLOW) before SWAT model calibration. Precipitation data were estimated for 2014 to 2100 using three models which are GFDL-ESM2G, IPSL-CM5A-LR, and MIROC-ESM with Representative Concentration Pathways (RCP) scenario. SWAT model was calibrated for the Soyang watershed with NSE of 0.83, and R^2 of 0.89. The percentage to precipitation of groundwater recharge and baseflow were 27.6% and 17.1% respectively in 2009. Streamflow, groundwater recharge, and baseflow were estimated to be increased with the estimated precipitation data. GFDL-ESM2g model provided the most large precipitation data in the 2025s, and IPSL-CM5A-LR provided the most large precipitation data in the 2055s and 2085s. Overall, groundwater recharge and baseflow displayed similar trend to the estimated precipitation data.

Key words : Baseflow, Climate change, Groundwater, RCP Scenario, SWAT

1. Introduction

최근 기후변화로 인하여 여러 지역에서 극심한 기상이변에 따른 홍수와 가뭄의 발생빈도가 증가하고 있으며, 이와 관련한 자연재해의 형태는 점차 다양화되고 있다. 기후변화에 따른 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)에서는 전 지구의 평균 기온이 상승할 것을 예측하고 있으며, 이로 인해 대기가 포함할 수 있는 수증기의 양이 증가되어 호우 강도와 빈도를 증가시키고, 수문순환과 수자원의 시공간적 변화에 영향을 미칠 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2013). 또한 장기간의 이상기후로 인하여 과거 관측 자료를 기반으로 설계된 다양한 시설물들의 용량을

초과 및 붕괴시킴으로서 경제적, 사회적인 피해를 증가시키고 있다. 이외에도 집중호우 아닌 시기에는 가뭄 등의 많은 문제가 발생하기 때문에 유역내 지속가능한 수자원 이용 및 관리 보전을 위해 지하수 함양 및 이동에 관한 연구가 필요하다. 이를 대응하기 위해 기존의 강우, 하천뿐만 아니라 지하수 함양 및 이동에 관한 연구들이 활발히 이루어지고 있다(Kim et al., 2013; Lee and Lee, 2007; Park et al., 2010; Park et al., 2013; Ruy et al., 2012). 지하수는 하천수량의 보충원으로서 중요한 역할을 하며, 기후변화에 따른 지표수자원 공급에도 변동성을 줄일 수 있는 자원이다.

기저유출은 강우 및 유량, 대수층의 유출입 되는 지하수의 영향을 받기 때문에 지하수 함양에 있어 밀접한 연관성이 있다. 이러한 기저유출 특성을 파악하기 위해서는 직접유출량과 기저유출량으로 구분할 필요가 있다. 이에 기저유출 특성을 분석하기 위한 많은 노력들이 진행되어 왔으며, 대표적으

† To whom correspondence should be addressed.

kjlim@kangwon.ac.kr

로 기저유출-감수곡선 분석법, 지하수위 변동곡선법 등 해석 방법들을 사용되어 왔으며, 기저유출과 직접유출을 분리하기 위한 소프트웨어가 개발된 바 있다. 또한 컴퓨터의 발달로 인하여 장기간 유량자료에 대한 기저유출 분리 프로그램들이 개발되었다. 미국 USGS (US Geological Survey; Rutledge, 1998)에서 개발하여 배포된 RECESS (Anderson and Burt, 1980), HYSEP (HYdrograph SEparation Program), WHAT SYSTEM (Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool; Lim et al., 2005; Lim et al., 2010; Yang and Chi, 2011), RORA (Rutledge, 1998), BFlow (Arnold and Allen, 1999; Arnold et al., 1995) 등이 널리 사용되어 온 기저유출 분리 프로그램이다. 기저유출을 분리하기 위해 사용되고 있으며, 그 중 BFlow 프로그램은 고주파에서 저주파를 분리하는 신호분석에 사용되는 방법으로, 단시간에 기저유출을 분리할 수 있는 Digital filter (Chapman and Maxwell, 1996)를 사용한 프로그램이다. 또한 BFlow는 유역내의 지하수 함양과 기저유출 변화에 관련 있는 매개변수인 Alpha factor 산정할 수 있다.

유역 및 하천관리를 관리하기 위해서는 직접/기저유출 특성과 같은 유역의 수문학적 거동을 이해하는 것이 필요하며, 실측 유량뿐만 아니라 강우유출모형에 의한 예측 유량에 대해서도 기저유출과 직접유출을 분리할 수 있다. 이를 위해서는, 우선 유역에서는 강우유출을 모형을 이용하여 예측 유량을 모의한 후, 직접유출과 기저유출 분리가 가능하며, 유량을 예측하기 위해서 다양한 강우유출 모형들이 사용될 수 있다. 강우유출 모형에는 SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al., 1998) 모형과 HSPF (Hydrological Simulation Program in Fortran; Bicknell et al., 2001), ANSWERS (Beasley et al., 1980), HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System; USACE, 2005) 모형 등이 있으며, 이 중 SWAT 모형이 널리 활용되고 있다 (Ahn et al., 2013; Ji et al., 2014; Joh et al., 2012; Lee et al., 2011). Arnold et al. (2000)은 SWAT 모형을 이용하여 미시시피 강 유역의 지하수 함양을 추정하고 이를 통해 기저유출 평가하였으며, Kim et al., 2005; Kim et al., 2006)은 SWAT을 이용하여 유역의 지하수 함양을 예측하였다. 지하수 함양을 예측하는 데에 있어서 이와 밀접한 관계가 있는 기저유출에 대한 분석이 필요하며, 이 과정에서 기저유출의 감수 특성에 대한 분석이 필요하다. 즉, SWAT 모형을 이용하여 유역의 지하수 함양을 예측 및 평가하기 위해서는 감수곡선에 영향을 주는 모형매개변수에 대한 이해와 분석이 필요한 것으로 생각된다. 하지만 지하수위 변동에 따른 함양량 영향을 고려하기 어려우며, SWAT 모형은 많은 수의 매개변수가 포함되어 있어서 매개변수를 추정하는데 있어 각 수문요소들의 특성을 나타내지 못한다. 또한 유역 출구에서의 유량 보정시 사용되는 통계치의 한계로 인해서 주로 고유량 값에 의해서 좌우되는 경우가 많다. 따라서 이렇게 보정된 유량으로 유역내에서의 지하수 함양량 등을 평가하기에는 한계점이 있다. 또한 기존의 지하수 함양량 산정 방법은 주로 유역 전체의 함양량 산정에 국한 되는 경우가 많기 때문에, 유역내 기

상, 토지이용, 토양, 수리지질학적 조건 등에 따라 지하수 함양량의 시·공간적 특성을 반영하기 어려운 단점이 있으며, 특히 유역내 감수 특성을 고려하여 지하수 함양을 산정한 연구는 거의 수행되지 않은 실정이다.

이에 본 연구의 목적은 1) 수문곡선의 감수특성을 고려한 SWAT Bflow를 이용하여, SWAT 매개변수인 Alpha factor를 산정한 후, 자동보정모형을 적용하여 유량산정의 정확성을 높이고, 2) 기후변화 모형을 통해 미래기후 시나리오를 적용하여 미래 지하수 함양 및 기저유출량을 전망하는데 있다.

2. Materials and Methods

2.1. 연구지역 및 자료

본 연구에서는 유역에서의 기후변화에 따른 함양량 영향 및 기저유출 특성을 파악하기 위하여 북한강 상류지역인 소양강댐 유역을 연구대상지역으로 선정하였다. 소양강댐 유역의 유역 평균 폭은 16.5 km, 유역 면적은 약 2,703 km²로 이중 산림이 차지하는 비율은 91.80%, 농경지 5.11%, 초지 0.54%, 주거 및 상업지역은 0.89%이며 나머지 1.66%는 내륙수역이다 (Fig. 1). 또한 유역 평균표고 650.5 m, 유역 평균 경사는 40.6%로써 우리나라 북동부 산악지역에 위치하고 있다. 소양강댐 유역의 유출 모니터링 자료는 Fig. 1과 같이 유역 말단부에 위치한 소양강댐에 측정된 자료를 이용하였다. 소양강댐 유역은 수위관측소의 유입량이 자연적인 수문패턴을 가지고 유출이 발생한다고 볼 수 있어 일별 유출 자료의 신뢰성이 우수하기 때문에 (Lim et al., 2006) 소양강댐 유역을 연구대상지역으로 선정하였다. SWAT모형은 유량을 모의하기 위해 표고자료, 토지이용도, 토양도와 함께 기상자료를 이용한다. 본 연구에서는 SWAT 모형의 입력 자료인 표고자료는 국립지리원에서 제공해 주는 30 m × 30 m 해상도의 수치표고모델(Digital Elevation Model: DEM)을 이용하여 구축하였으며, 환경지리정보시스템에서 제공하는 토지이용도 (1:25,000)와 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공해주는 토양도를 사용하였다 (Fig. 2). 소양강댐 유역의 토양속성 현황은 Af (alluvial soils and river wash, flood plains), An (complex of soils, narrow valleys), Ma (lithosols, siliceous crystalline), Mm (lithosols, micaceous and hard siliceous), Mu (brown forest soils and lithosols, undifferentiated), Ra (red-yellow podzolic soils, siliceous crystalline), Re (lithosols, severely eroded, siliceous) and Rocky (rocky lands)로 구성되어 있다 (Fig. 3). 또한 기상자료로는 일사량(MJ/m²), 일 강수(mm), 일 평균상대습도(%), 일 평균풍속(m/sec), 일 최고·최저기온(°C)을 이용하는데 본 연구에서는 2005년 1월부터 2009년 12월까지 기상청에서 제공하는 4개(춘천, 인제, 대관령, 속초)의 일별 기상자료를 구축하였다. SWAT 모형의 기상 자료 중 유출 및 지하수 함양량에 가장 많은 영향을 미치는 강수량 자료는 4개 관측소마다 다른 차이를 보였다. 이중 S4 지점의 연 평균 강수량은(2005~2009년) 1,594 mm로 가장 많은 것으로 관측되었으며, S2 지점의 연 평균 강수량이 가장 적은 1,356 mm로 관측되었다 (Fig. 4).

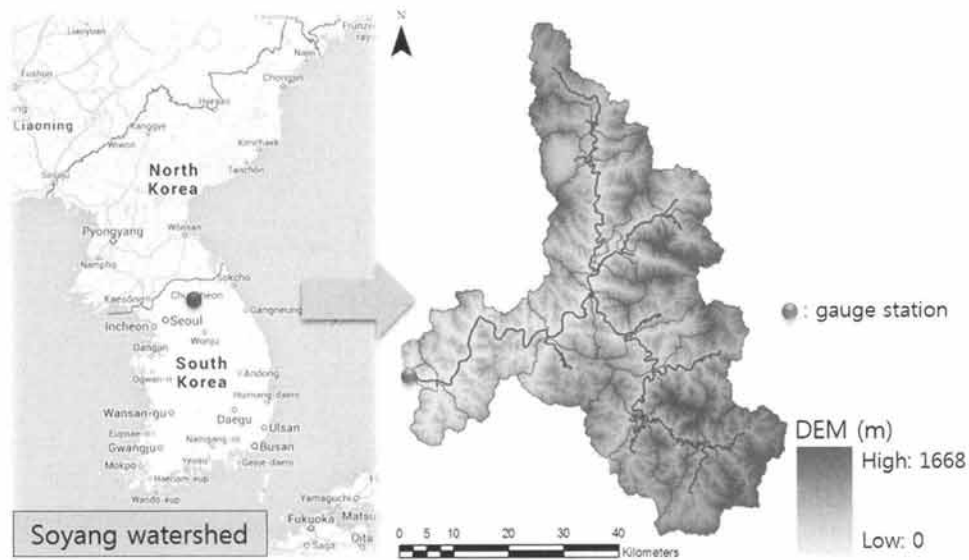


Fig. 1. Location of the Soyang watershed.

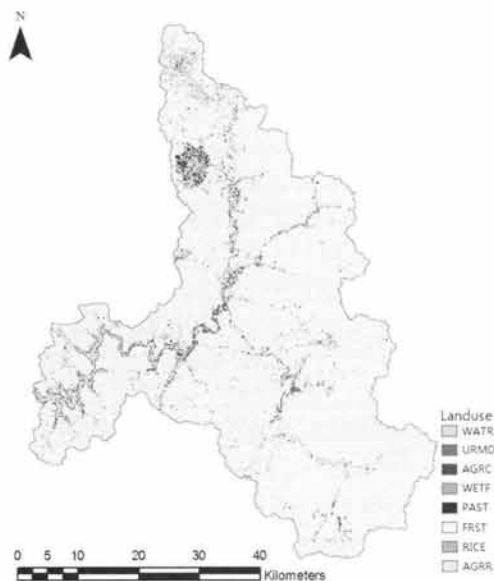


Fig. 2. Landuse.

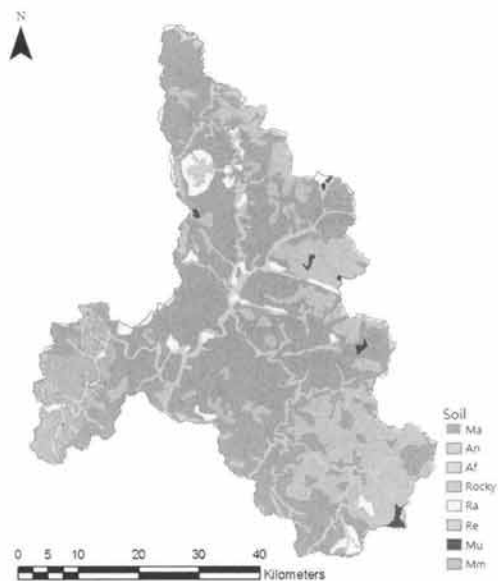


Fig. 3. Major soil types.

2.2. SWAT BFlow 모형을 이용한 Alpha factor 산정

SWAT BFlow(Baseflow filter program)는 Arnold and Allen (1999)이 제시한 알고리즘을 적용하여 총 유량 중 기저유출량 비율을 결정하는 기저유출량 필터 프로그램이다.

SWAT BFlow는 유역의 장기 유량 자료를 이용하여 감수특성을 파악한 후 기저유출을 분리하며, 장기 유량자료를 토대로 그 유역을 대표할 수 있는 Alpha factor를 제시할 수 있기 때문에 계절별/연별로 변화하는 감수부분의 특성을 반영할 수 있다.

Alpha factor (α)는 식 (1)에 의하여 산정된다.

$$Q_t = Q_0 K^t = Q_0^{-\alpha t} \quad (1)$$

$$\alpha = -\ln K$$

여기서, Q_0 는 감수부 시작점에서의 유량, Q_t 는 시간 t에서

의 유량, 그리고 K는 감수인자(recession index)이다. 본 연구에서는 지하수 함양량 및 기저유출의 예측 정확성을 높이기 위해서 SWAT BFlow를 이용하여 소양강댐 유역의 관측 유량으로부터(2005~2009년) Alpha factor를 산정하여 SWAT모형 보정계수에 적용하였다. 각 소유역별 특성을 파악하여 Alpha factor를 산정하여 달리 적용하는 것이 중요하나, 본 연구에서는 관측자료의 부족으로 인하여 유역 출구의 유량 자료를 이용하여 산정된 Alpha factor를 유역 전체에 적용하였다.

2.3. SWAT의 개요

SWAT 모형은 유역내의 장기 강우-유출, 유사 이동 및 과정을 모의할 수 있으며, 미 계측 지역에서의 모의도 가능하며, 경작형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의

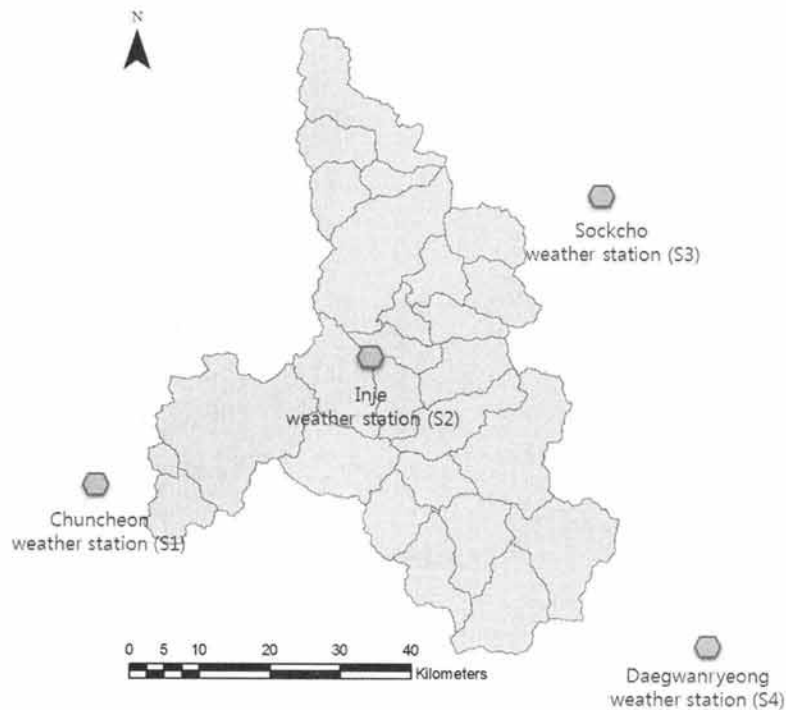


Fig. 4. Spatial location of weather stations in the Soyang watershed.

상대적 효과도 수치화할 수 있다. 또한 일 단위의 모의가 가능한 유역단위 모형으로서 수문, 토양유실, 하도추적, 영양물질의 4가지 부모형(sub-model)으로 구성되어있으며, 이 중 수문 부모형은 지류방식에 의해 침투, 기저유출, 직접유출 등을 되어있다. SWAT 모형에서 침투는 토층을 최대 10개 층까지 세분화하여 선형저수지 추적기법을 사용하여 계산하고, 지하수를 두 개의 대수층으로 구분한다. SWAT에서 모의되는 수문순환은 식 (2)의 물수지 방식에 토대로 하고 있다.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_o - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (2)$$

여기서, SW_t : 최종 토양수분량 (mm H₂O), SW_o : i일의 초기 토양수분량 (mm H₂O), R_{day} : i일의 강수량 (mm H₂O), Q_{surf} : i일의 직접유출량 (mm H₂O), E_o : i일의 증발산량 (mm H₂O), Q_{gw} : i일의 회귀수량 (mm H₂O), w_{seep} : i일의 토양층으로부터 투수층으로 유입수량 (mm H₂O).

2.4. SWAT-CUP의 개요

SWAT-CUP (Calibration and Uncertainty Program for SWAT; Abbaspour et al., 2007)은 스위스 연방연구소 Eawang에서 개발되었다(Abbaspour, 2008). SWAT 모형은 자동보정모형을 제공하지만, 이 모듈은 다양한 알고리즘을 적용하지 못하고, 각각에 따른 계산 및 결과 비교 등 모든 과정을 사용자가 직접 계산하여야 하는 번거로움이 있다. 이에 SWAT-CUP은 이를 보완해주며, 5가지 통계 알고리즘 SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting Ver.2), GLUE (Generalized

Likelihood Uncertainty Estimation), MCMC (Markov Chain Monte Carlo), PSO (Particle Swarm Optimization), ParaSol (Parameter Solution)으로 구성되어있다. 이에 SWAT 모형과 연계함으로써 모형의 최적 매개변수를 도출하고 이를 통해 모형의 정확도를 향상시켜, 모형의 적용과정에서 발생하는 보정오차를 제거함으로써 사용자에게 의한 불확실성을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

2.5. SWAT 모형의 감수부분을 고려한 유출량 보정

본 연구에서는 소양강댐 유역을 대상으로 SWAT-CUP을 사용하여 SWAT 모형의 유출량을 보정 하였으며, 보정 시 SWAT BFlow를 이용하여 소양강지점의 2005년부터 2009년까지 Alpha factor를 산정한 보정계수를 SWAT-CUP에 적용하여 감수부분을 고려하였다. 또한 실측유출량을 대상으로 SWAT BFlow를 적용하여 나온 Alpha factor(S1)를 SWAT-CUP 적용한 결과와 기존의 방법인 SWAT-CUP에서 자동보정모형을 적용하여 Alpha factor(S2)를 산정한 결과의 감수곡선 그래프를 작성하여 경향을 분석하였다. 보정기간은 2009년 1월 1일부터 2009년 12월 31일까지 소양강댐 일유량 자료를 사용하여 보정하였다.

소양강댐 유역의 SWAT 모형 적용성 평가는 Nash-Sutcliffe 효율계수(NSE, Nash-Sutcliffe efficiency), 결정계수(R²)를 이용하였으며, NSE, R²는 식 (3-4)에 의하여 각각 계산될 수 있다.

$$NSE = 1 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n (y_i^o - y_i^s)^2 \right)}{\left(\sum_{i=1}^n (y_i^o - \bar{Y}^o)^2 \right)} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n (y_i^o - \bar{Y}^o)(y_i^s - \bar{Y}^s) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^o - \bar{Y}^o)^2 \sum_{i=1}^n (y_i^s - \bar{Y}^s)^2} \quad (4)$$

여기서, y_i 는 i 번째의 유량이며, n 은 자료의 개수를 나타낸다. o 는 관측값 s 는 모의값, \bar{Y}^o 는 모의값의 평균, \bar{Y}^s 는 관측값의 평균을 나타낸다.

2.6. 지하수 함양량/기저유출량 산정

본 연구에서는 유량의 감수부분을 고려하여 보정한 SWAT 모형의 예측치 자료를 이용하여 월별 지하수 함양량 분포를 분석하였으며, 지하수 함양량이 가장 많은 월과 적은 월의 HRU별 지하수 분포도를 산정하였다. 유량 보정된 SWAT 모형 예측치를 SWAT BFlow 시스템을 통해 기저유출량을 분리하여 분석하였다. 2009년 1월 1일부터 2009년 12월 31일까지 소양강댐 유역의 지하수 함양량과 기저유출량 경향을 보기 위해 총 강수량 중 지하수 함양량이 차지하는 비율과 총 유출량 중 기저유출량이 차지하는 비율을 분석하였다.

2.7. 미래기후변화 시나리오 적용

2.7.1. 미래 기후변화 시나리오 개요

IPCC 4차 보고서 작성에 사용된 SRES는 정보지연성과 해상도 문제에 대한 한계성을 드러내고 있어, IPCC 5차 평가보고서를 위해 이를 보완하는 새로운 온실가스 시나리오인 RCP (representative concentration pathways)를 도입하였다(APEC, 2013) RCP는 토지이용변화에 따른 영향을 포함하였으며, 기후변화 대응정책이 수행되었는가에 따라 온실가스 배출 농도가 달라질 수 있는 점을 고려하여 배출농도를 2.6, 4.5, 6.0, 8.0의 4가지 경우로 구분되어 있다.

본 연구에서는 현재 추세로 저감 없이 온실가스가 배출되는 경우를 나타낸 RCP 8.5를 미래기후 시나리오로 선택하였다. 또한 APEC 기후센터에서 제공한 기후변화 모형인 미국의 GFDL-ESM2G(Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)와 프랑스의 IPSL-CM5A-LR (Institut Pierre Simon Laplace), 우리나라와 가장 가까우면서 높은 해상도를 가진 일본의 MIROC-ESM (Atmosphere and Ocean Research Institute, National Institute for Environmental Studies, and Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)의 RCP 8.5 시나리오를 적용하여(APEC, 2013) 산정된 일단위 결과 자료를 SWAT모형에 사용하였다.

2.7.2. 편의보정된 미래기후변화 시나리오를 적용한 지하수함양량/ 기저유출량 분석

미래기후변화 시나리오는 전지구적인 모형이고, 결과 자료들이 불확실성을 내포하고 있어 한반도 지형에 적용하기 위해서는 편의 보정을 해야 한다. 이에 본 연구에서는 APEC 기후센터에서 제공하는 편의보정된 미래기후변화 시나리오를 소양강 유역에 적용하였다. 편의보정된 기상자료는 SWAT

모형의 입력자료로 이용되었으며 기후변화 시나리오 RCP8.5와 기후변화 모형(GFDL-ESM2G, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM)에 따른 지하수 함양량, 기저유출량을 분석 및 전망하였다. 모의 기간은 2014년~2100년까지 87년을 선정하였으며, 세 개의 기간으로 2025s (2014~2040년), 2055s (2041~2070년), 2085s (2071~2100년) 나누어 분석하였다. 편의보정된 강수량 자료를 통하여 월별로 미래 강수량 변화 예측을 전망하였으며, 예측된 강수량 자료를 통하여 강수량 대비 지하수 함양량과 기저유출 비율을 분석하였다. 또한 총 유출량 중 기저유출량이 차지하는 비율을 분석하였다.

3. Results and Discussion

3.1. SWAT 유량 보정 결과

본 연구에서 SWAT모형을 이용하여 유량을 모의하는 과정에서 감수특성을 고려하기 위해 SWAT BFlow를 이용하여 Alpha factor를 산정하였다. 소양강 유역의 Alpha factor는 0.257(S1)이었으며, 이를 SWAT-CUP에 고정하여 8개의 다른 매개변수들을 보정하였다. 2009년 1월부터 2009년 12월까지 소양강 유역의 실측 유출량에 대하여 보정하였으며, 보정에 사용된 매개변수와 보정 값은 Table 1과 같다. 보정 결과는 NSE는 0.83, R^2 는 0.89로 산정되어 Saleh et al. (2000)의 SWAT보정의 평가기준(NSE > 0.65)에 있어 “very good”으로 평가되었다(Table 2). 또한 기존의 SWAT-CUP 자동보정을 통한 보정 결과는 Alpha factor는 0.995(S2) 산정하였으며, Alpha factor를 제외한 Table 1에 제시한 보정 값을 동일하게 적용한 결과 NSE는 0.82, R^2 는 0.86이다. 이러한 결과에서 보듯이 소양강 유역의 유량 부분을 S1과 S2가 잘 모의하였다. 하지만, Fig. 5에서 보듯이 2009년 실측 유출량을 대상으로 감수부 부분에 대해 Alpha factor 0.257(S1)를 적용한 것과 SWAT-CUP 자동보정하여 Alpha factor 0.995(S2) 나온 것을 비교할 때 S1이 기존의 방법 S2보다는 감수부 영향을 보다 정확하게 고려하였다. 또한 Jung et al. (2014)의 연구 결과에서 보듯이 SWAT-CUP의 자동보정 모듈에 의하여 산정된 Alpha factor 결과보다는 유량관측소에서 관측된 유량에 의하여 SWAT BFlow와 같은 기저유출필터 프로그램을 적용하여 Alpha factor를 산정하여 보정한 것이 감수특성을 고려하여 평가하였다고 제시하였다. 이에 따라 본 연구 결과에서 보이는 바와 같이 Alpha factor 0.257(S1)의 결과를 이용하여 SWAT 모형이 소양강 유역의 유출량 및 기저유출의 영향성 평가를 정확히 할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2. 지하수 함양량/기저유출량 산정 결과

유량 보정된 SWAT 모형을 이용하여 연별/월별 지하수 함양량을 산정하였다(Fig. 6; Table 3). 소양강 유역의 2009년 지하수 함양량은 390.4 mm/year로 2009년 강수량 1415.5 mm/year의 약 27.6% 정도 차지하는 것으로 나타났다. 또한 월별 지하수 함양량 결과를 보면, 여름철인 7월은 98.8 mm/month로 함양량이 가장 적은 겨울철인 1월 2.6 mm/

Table 1. Nine parameters used in calibration for flow

Parameter	Description	Variation Method	Value
CN2	Moisture condition II curve number	Multiply by Value	0.2925
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	Replace by value	0.38
GW_DELAY	Delay time for aquifer recharge (days)	Replace by value	18.45
GWQMN	Threshold water level in shallow aquifer for base flow (mm H ₂ O)	Replace by value	4975.00
GW_REVAP	Revap coefficient	Replace by value	0.15
CH_N2	Manning "n" value	Replace by value	0.12
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	Replace by value	14.38
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	Multiply by Value	0.23
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	Multiply by Value	0.1925

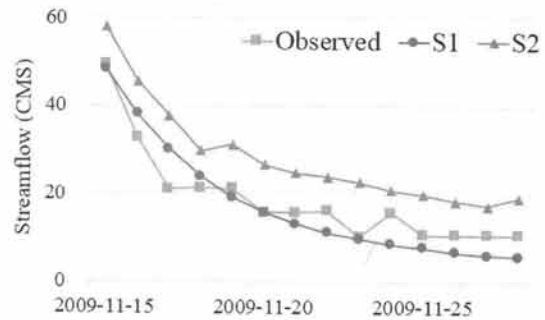
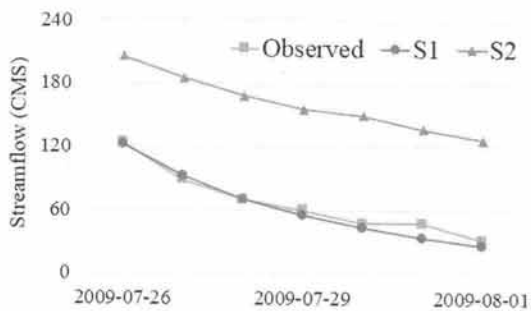


Fig. 5. Observed and simulated streamflow recessions.

Table 2. Reported performance ratings for the NSE statistics (Saleh et al., 2000)

Method	Value	Performance rating
NSE	$NSE \geq 0.65$	Very good
	$0.54 < NSE \leq 0.65$	Adequate
	$NSE > 0.50$	Satisfactory

month 보다 약 38배 정도 큰 것으로 분석되었다. Fig. 6과 Table 3에서 보이듯이 9월의 경우 강수량 대비에 지하수 함양량이(9월 강수량 23.6 mm/month, 9월 지하수 함양량

35.1 mm/month) 크게 나타난 이유는 6월, 7월, 8월에 유역 내 내렸던 강수량에 의한 영향이라 판단된다. Table 4는 소양강 유역에서의 기저유출량의 특성을 분석하기 위하여 강수량, 유출량, 기저유출, 강수량 대비 기저유출 비율, 유출량 대비 기저유출을 나타낸다. 이 표에서 보이는 바와 같이 산림이 차지하는 비율이 91.8%인 소양강 유역의 경우 강수량 대비하여 17.1%가 기저유출로 되며, 총 유량의 27.3%가 기저유출 형태로 하천으로 유입되는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 소양강 유역에서의 지하수 함양량 특성을 분석

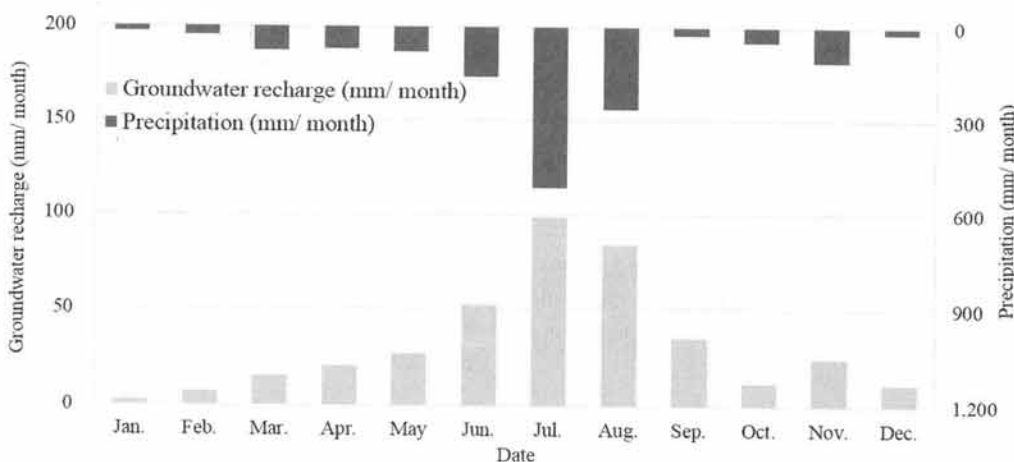


Fig. 6. Precipitation vs. Groundwater Recharge in 2009.

Table 3. Monthly Precipitation and Recharge rate in 2009

mm	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.	Sum
Groundwater recharge	2.6	7.3	15.2	20.4	26.8	52.1	98.8	84.2	35.1	11.9	24.7	11.4	390.4
Precipitation	14.9	26.8	77.4	73.8	80.7	160.7	513.4	264.9	23.6	47.7	112.9	18.9	1415.5

Table 4. Average annual hydrological components in 2009

	2009 (year)
Precipitation (mm)	1415.5
Streamflow (mm)	884.0
Baseflow (mm)	241.8
Baseflow/Precipitation (%)	17.1
Baseflow/Streamflow (%)	27.3

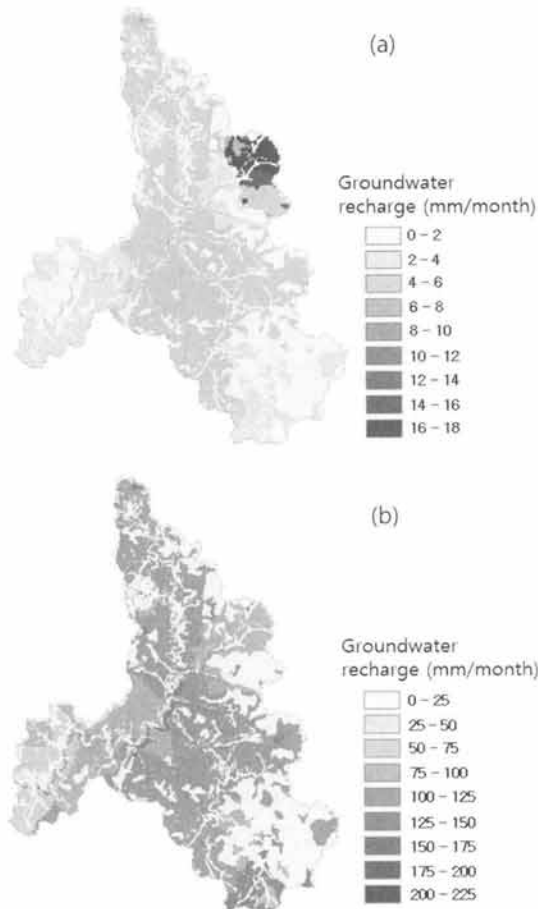


Fig. 7. Spatio-temporal distribution of monthly groundwater recharge of HRUs in 2009 (mm/month). (a) January (minimum), (b) July (maximum)

하기 위하여 Ryu et al. (2012)를 이용하여 월별 지하수 함양 분포를 비교 분석하였다. Ryu et al. (2012)은 해안면 유역을 대상으로 2009년 지하수 함양을 월별로 분석한 결과 여름철 7월, 8월에 각각 73.54 mm/month, 73.59 mm/month로 분석되었으며, 7월, 8월이 함양량이 가장 적은 겨울철인 12월(4.17 mm/month) 보다 약 18배 정도 큰 것으로 분석되었다. 이러한 결과를 통해 계절별 지하수 함양량 분포도 경향은 유사하지만, 해안면유역이 경사가 가파르기 때문에 소

양강 유역에 비해 지하수 함양량이 적은 것으로 나타났다. Fig. 7은 2009년 소양강 유역의 월별 함양량의 시간적 공간적 변화 특성을 보여주는 그림이다. 그림에서 보이듯이 월별 지하수 함양량 중 가장 적은 1월은 최대 18.0 mm/month로 강수 및 기온 등의 영향으로 인하여 HRU별 지하수 함양량이 적은 것으로 분석되었으며, 반면 가장 많은 7월의 함양량은 최대 225.0 mm/month로 HRU별 지하수 함양량 차이가 많이 나는 것으로 분석되었다. 또한 소양강 유역의 지형 특성상 지하수 함양량이 유역 가운데 부분에서 상대적으로 많이 일어나는 것으로 분석되었다.

3.3. 미래기후 시나리오에 따른 모형 결과

본 연구에서는 미래 기후 시나리오 분석하는 기후변화 모형(GFDL-ESM2G, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM)에 RCP 8.5 시나리오를 적용한 후, 그 결과를 유량 보정된 SWAT 모형에 입력하여 모의하였다. RCP 8.5 시나리오를 세 기간 2025s (2014~2040년), 2055s (2041~2070년), 2085s (2071~2100년)로 구분하여 소양강 유역에 적용하였다. 기후변화 분석기간은 2014년부터 2100년까지 87년을 대상기간으로 선정하였다. 분석결과 IPSL-CM5A-LR 모형은 2025s, 2055s, 2085s 기간동안 강수량이 약 67%(+608.7mm) 증가되었으며, MIROC-ESM 모형 결과 약 8.4%(+108.9mm) 증가되었다. 하지만 GFDL-ESM2G 모형에서는 두 모형과 다른 결과를 보였다. 2055s 부터는 약 9%(-132.8mm)로 감소하였고, 2085s 에서는 2055s 에 비해 다시 약 30%(+438.4mm) 증가하는 경향을 보였다(Table 5). 월별로 강수량 분포도 경향을 보면, MIROC-ESM 모형은 2025s, 2055s, 2085s 기간 동안 평균 강수량이 7월에 가장 많은 분포를 보였으며 (Fig. 7), IPSL-CM5A-LR 모형에서는 2025s 기간 동안에는 평균 강수량이 7월에 분포하였지만, 2055s 와 2085s 에서는 평균 강수량이 8월에 가장 많이 분포하였다. 또한 GFDL-ESM2G 모형에서는 평균 강수량이 8월에 가장 많은 분포도를 보였다. 기후변화 모형을 비교하였을 때 2025s 에서는 GFDL-ESM2G 모형의 평균 강수량이 1,587.5 mm로 가장 크게 나타났지만, 2055s와 2085s 기간에 상대적으로 IPSL-CM5A-LR 모형이 1,706.7 mm, 2,099.4 mm 로 크게 나타났다.

Fig. 8에서 강수량 경향을 보듯이 GFDL-ESM2G 모형은 미래로 가면 갈수록 건기 시기인 1월, 12월에 점차 감소하는 경향을 보였다. 7월에는 점차 증가하는 경향을 보였지만, 같은 여름철인 8월에는 2055s까지 감소하였다가 2085s 에서 증가하는 변동성이 큰 경향을 보였다. IPSL-CM5A-LR 모형은 2014년에서 2100년으로 향해 갈수록 강수량이 증가하는 경향을 보여, RCP8.5의 특징인 미래로 갈수록 강수량 증감하는 경향과 동일하게 나타났다. MIROC-ESM 모형은

Table 5. Estimated precipitation data by the three models for the period from 2014 to 2100

Scenario	GFDL-ESM2G			IPSL-CM5A-LR			MIROC-ESM		
	2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
Precipitation (mm/year)	1587.5	1454.7	1893.1	1490.7	1706.7	2099.4	1295.4	1349.6	1404.3

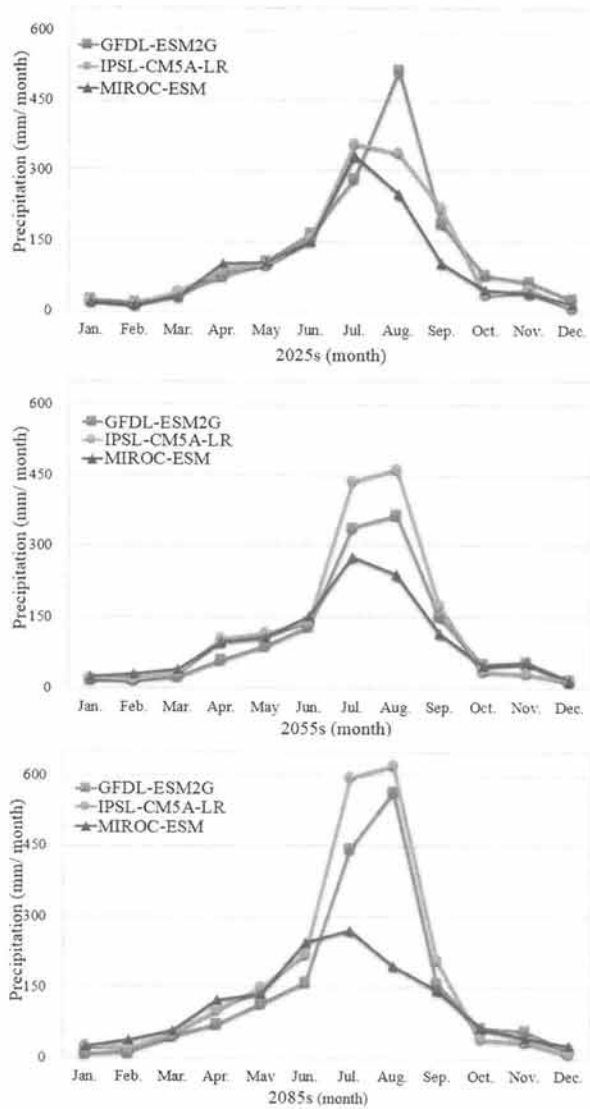


Fig. 8. Estimated monthly precipitation data by three models.

미래로 향해 갈수록 7월 강수량이 감소하면서, 반면 6월 강수량이 증가하는 결과를 보였다.

3.4. 미래기후 시나리오를 적용한 지하수 함양량/기저유출량 산정결과

미래기후 시나리오를 적용한 지하수 함양량의 기간별 결과는 GFDL-ESM2G 모형의 경우 403.8 mm/year, 365.9 mm/year, 429.3 mm/year 로 2055s 기간때 감소하였는데, 이는 2025s 과 2085s 기간에 비해 2055s 기간 때 강수량이 적기 때문인

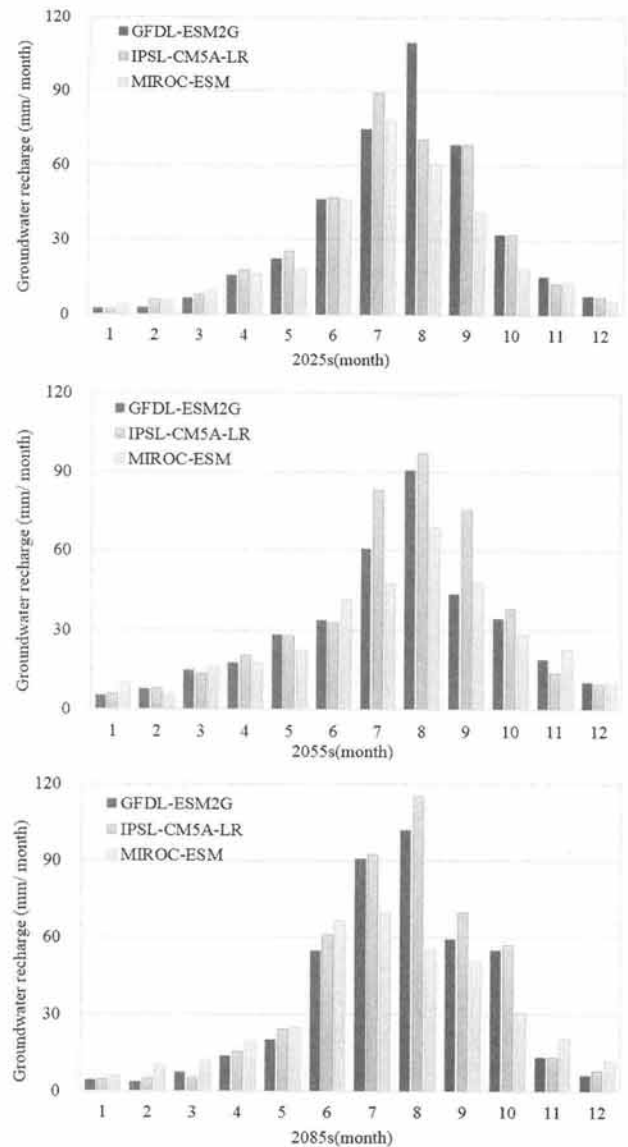


Fig. 9. Application of future climate scenarios to estimate monthly groundwater recharge (2014~2100).

것으로 판단된다(Table 6). IPSL-CM5A-LR 과 MIROC-ESM 는 2025s, 2055s, 2085s 기간 동안 총 강수량이 증가함에 따라 지하수 함양도 같이 증가하는 경향을 보였다. 세 개의 기후변화 모형마다 연강수량의 분포는 다르지만 총 강수량에 대한 지하수 함양 비율이 세 기간 모두 20% 이상인 것으로 분석되었다(Table 6). Fig. 9에서 보듯이 월별 지하수 함양량 결과는 2025s 에서 GFDL-ESM2G 모형이 8월에

Table 6. Groundwater recharge and baseflow estimations using bias-corrected precipitation data

Scenario	GFDL-ESM2G			IPSL-CM5A-LR			MIROC-ESM		
	2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s	2025s	2055s	2085s
Groundwater recharge (mm)	403.8	365.9	429.3	386.2	425.0	470.78	316.4	337.6	376.6
The ratio of Groundwater to precipitation recharge (%)	25.4	25.2	22.7	25.9	24.9	22.4	24.4	25.0	26.8
Streamflow (mm)	1052.1	950.3	1322	1098.8	1309.7	1487.2	808.9	848.0	877.0
Baseflow (mm)	204.1	190.1	263.9	208.7	252.6	374.5	178.7	188.9	238.8
Baseflow/ Streamflow (%)	19.4	20.0	20.0	19.0	19.3	25.2	22.1	22.3	27.2
Baseflow/ precipitation (%)	12.9	13.1	14.0	14.0	14.8	17.8	13.8	14.0	17.0

109.8 mm/month로 크게 나타났으며, 2055s에서는 IPSL-CM5A-LR 모형이 8월에 97.0 mm/month로 나타났다. 8월에 큰 경향을 보인 이유는 7,8월에 내린 강수량의 영향으로 판단된다. 2085s에는 IPSL-CM5A-LR 모형을 적용해서 나온 2085s 총강수량이 2099.4 mm 내려 7,8,9월에 지하수 함양량이 65.0 mm/month 이상인 것으로 분석되었다. MIROC-ESM 모형에 의한 예측 강우자료 이용 시, 미래로 갈수록 9,10,11,12월 지하수 함양량이 증가된 결과가 나타났다. 유량에 대한 기저유출은 결과는 GFDL-ESM2G 모형의 경우 19.4%에서 20.0%로 증가되었으며, IPSL-CM5A-LR 경우 19.0%에서 25.2%, MIROC-ESM 22.1%에서 27.2%로 증가하였다. 또한 기후변화 모형을 통해 미래기후 시나리오 적용한 분석결과에서 보이는 바와 같이 지하수 함양량이 증가/감소함에 따라 기저유출량 부분도 같이 증가/감소하는 유사한 경향이 보였으며, 2100년으로 가면 갈수록 지하수 함양량과 기저유출량이 증가되는 경향이므로, 건기 시 유황이 개선될 것이라 판단된다. 지하수 함양률이 높은 경우 지하수위를 일정수준 이상 유지시켜 하천의 유량이 지속적으로 흐르도록 할 수 있으므로 건천화 방지 대책으로 판단된다. 또한 지하수를 활용하여 취수원 확보가 가능할 것이다.

4. Conclusion

본 연구에서는 Alpha factor를 산정하여 미래기후의 지하수 함양과 기저유출 경향을 전망하였다. 기존 연구에서는 SWAT 모형 유량 보정시 감수특성 영향을 고려하지 않고 평가하였다. 이에 본 연구에서는 SWAT BFlow 통해 소양강 유역에 해당되는 감수특성을 반영하는 Alpha factor를 산정하여 보다 정확한 유량산정을 모의하였다.

SWAT 모형을 이용하여 유량보정 결과(2009년) NSE는 0.83, R2는 0.89 결과를 통해 지하수 함양, 기저유출 분석 고려시 정확하게 모의하는 것으로 판단된다.

기후변화모형에 RCP 시나리오를 적용하여 미래기후변화에 따른 지하수 함양과 기저유출 분석한 결과 대체적으로 미래 후기로 갈수록 유량, 지하수 함양, 기저유출이 증가하는 경향이 나타났다. 기후변화 모형별로 전망해 본 결과 2025s 에 GFDL-ESM2G 모형이 강수량이 가장 크게 측정되었으며, 이에 따라 지하수 함양과 기저유출도 많이 유출되는 경향을 보였다. 2055s 시기와 2085s 시기에는 IPSL-CM5A-LR 모형이 미래로 갈수록 지하수 함양과 기저유출이 크게 측정되었다. 이에 반면 MIROC-ESM 모형은 앞서 제시한 두 모형과 다르게 지하수 함양, 기저유출 경향이 적게 측정되었다. 세 개의 기후변화 모형의 경향을 본 결과 2055s에 GFDL-ESM2G 모형이 강수량, 지하수 함양, 기저유출이 감소하는 경향을 보인 것을 제외하고는 미래로 갈수록 일관성 있게 증가하는 경향을 보였다.

본 연구를 통해 기후변화에 따른 소양강 유역의 지하수 함양과 기저유출의 경향을 파악 할 수 있으며, 향후 수자원관리를 위한 기초자료로 이용될 수 있다고 판단된다. 또한 매년 강수량 영향에 따라 변화되는 지하수 함양과 기저

유출 부분에 대응하는 예방, 관리 차원으로도 이용될 수 있으며, 장기적인 관점으로 효율적인 물관리 체계를 전환하여 전망해야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 각 소유역별 특성을 파악한 후 Alpha factor를 산정하여 달리 적용하는 것이 기후변화로 인한 상류측 건천화 현상과 소하천의 범람 등을 대비할 수가 있지만, 소양강 유역의 관측자료의 부족으로 인하여 유역 출구의 유량 자료를 이용하여 산정된 Alpha factor를 유역 전체에 적용하였으므로 이에 향후 연구를 통하여 기후변화의 따른 각 소유역의 기저부분의 영향을 고려한 연구가 진행되어야 할 것이다.

Acknowledgement

본 연구는 한국환경산업기술원 GAIA Project (No. RE201402074) “표토자원전력 연구단” 과제와 강원대학교 학술연구조성비로 연구하였으며(No. 120131850)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Abbaspour, K. C. (2008). *SWAT-CUP2: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*, Department of Systems Analysis, Integrated Assessment and Modelling (SIAM), Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Duebendorf, Switzerland.
- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., and Srinivasan, R. (2007). Modeling Hydrology and Water Quality in the Pre-Alpine/ Alpine thur Watershed Using SWAT, *Journal of Hydrology*, 333, pp. 413-430.
- Anderson, M. G. and Burt, T. P. (1980). Interpretation of recession flow, *Journal of Hydrology*, 46(1), pp. 89-101.
- Ahn, S. R., Park, G. A., Jang, C. H., and Kim, S. J. (2013). Assessment of Climate Change Impact on Evapotranspiration and Soil Moisture in a Mixed Forest Catchment Using Spatially Calibrated SWAT Model, *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(6), pp. 569-583. [Korean Literature]
- Arnold, J. G. and Allen, P. M. (1999). Automated Methods for Estimating Baseflow and Groundwater Recharge from Streamflow Records, *Journal of American Water Resource Association*, 35(2), pp. 411-424.
- Arnold, J. G., Allen, P. M., Muttiyah, R., and Bernhardt, G. (1995). Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques, *Journal of Ground Water*, 33(6), pp. 1010-1018.
- Arnold, J. G., Muttiyah, R. S., Srinivasan, R., and Allen, P. M. (2000). Regional Estimation of Base Flow and Groundwater Recharge in the Upper Mississippi River Basin, *Journal of Hydrology*, 227, pp. 21-40.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiyah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area Hydrologic Modeling and Assessment Part I : Model Development, *Journal of American Water Resource Association*, 34(1), pp. 73-89.

- Asia Pacific Economic Cooperation Climate Center (APEC). (2013). *APEC Research Report*, APEC Climate Center, pp. 1-85.
- Beasley, D. B., Huggins, L. F., and Monke, E. J. (1980). ANSWERS: a Model for Watershed Planning, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 23, pp. 938-944.
- Bicknell, B. R., Imhoff, J. C., Kittle, J. L., Jobes, T. H., and Donigan, A. S. (2001). *Hydrologic Simulation Program - FORTRAN (HSPF). User's Manual for Version 12.0*, U.S. EPA, Athens, GA, 30605.
- Chapman, T. G. and Maxwell, A. I. (1996). Baseflow Separation - Comparison of Numerical Methods with Tracer Experiments, *Institute Engineers Australia National Conference*, 96(5), pp. 539-545.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- Ji, U., Kim, T. G., Lee, E. J., Ryoo, K. S., Hwang, M. H., and Jang, E. K. (2014). Analysis of Sediment Discharge by Long-Term Runoff in Nakdong River Watershed Using SWAT Model, *Journal of Environmental Science International*, 23(4), pp. 723-735. [Korean Literature]
- Joh, H. K., Park, J. Y., Jang, C. H., and Kim S. J. (2012). Comparing Prediction Uncertainty Analysis Techniques of SWAT Simulated Streamflow Applied to Chungju Dam Watershed, *Journal of Korea Water Resource Association*, 45(9), pp. 861-874. [Korean Literature]
- Jung, Y. H., Lim, K. J., and Kim, H. S. (2014). Estimation of Baseflow Considering Recession Characteristics of Hydrograph, *Journal of Wetlands Research*, 16(2), pp. 161-171. [Korean Literature]
- Kim, N. W., Lee, J. W., Chung, I. M., and Lee, M. H. (2013). Combined Effects of Ground Water Abstraction and Irrigation Reservoir on Streamflow, *Journal of Korea Water Resources Association*, 46(7), pp. 719-733. [Korean Literature]
- Kim, N. W., Moon, C. I., and Seung, W. Y. (2005). Method of Estimating Groundwater Recharge with Spatial-Temporal Variability, *Journal of Korea Water Resource Association*, 38(7), pp. 517-526. [Korean Literature]
- Kim, N. W., Moon, C. I., Seung, W. Y., Lee, J. W., and Lee, B. J. (2006). The Estimation of Groundwater Recharge with Spatial-Temporal Variability at the Musimcheon Catchment, *Journal of Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, 11(5), pp. 9-19. [Korean Literature]
- Lee, J. S., Kim, S. J., Kim, D. G., Kang, N. R., and Kim, H. S. (2011). Estimation of Hydraulic Coefficients in an Ungaged Basin Using SWAT Model, *Journal of Korea Wetlands Society*, 13(2), pp. 319-327. [Korean Literature]
- Lee, S. H. and Lee, J. M. (2007). A Modification of SWMM for a Groundwater Pumping Simulation, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(5), pp. 628-635. [Korean Literature]
- Lim, H. J., Kwon, H. J., Bae, D. H., and Kim, S. J. (2006). Analysis of Hydrological Impact Using Climate Change Scenarios and the CA-Markov Technique on Soyang Gang-Dam Watershed, *Journal of Korea Water Resource Association*, 39(5), pp. 453-466. [Korean Literature]
- Lim, K. J., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J., Kim, K., Muthukrishnan, S., and Tripathy, D. (2005). Automated Web GIS Based Hydrograph Analysis Tool, WHAT1, *Journal of the American Water Resources Association*, 41(6), pp. 1407-1416.
- Lim, K. J., Park, Y. S., Kim, J. G., Shin, Y. C., Kim, N. W., Kim, S. J., Jeon, J. H., and Engel, Bernard, A. (2010). Development of Genetic Algorithm-Based Optimization Module in WHAT System for Hydrograph Analysis and Model Application, *Computers Geosciences*, 36, pp. 936-944.
- Park, J. A., Kim, S. B., Kim, M. S., Kwon, K. H., and Choi, N. C. (2010). Development of Automatic Event Detection Algorithm for Groundwater Level Rise, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 26(6), pp. 954-962. [Korean Literature]
- Park, N. S., Koh, B. R., and Lim, Y. D. (2013). Impacts of Fresh and Saline Groundwater Development in Sungsan Watershed, Jeju Island, *Journal of Water Resources Association*, 46(7), pp. 783-794. [Korean Literature]
- Rutledge, A. (1998). Computer Programs for Describing the Recession of Ground-Water Discharge and for Estimating Mean Ground-Water Recharge and Discharge from Streamflow Records: Update, *US Geological Survey Water-Resources Investigations Report*, pp. 98-4148.
- Ruy, J. C., Choi, J. W., Kang, H. W., Kum, D. H., Shin, D. S., Lee, K. H., Jeong, G. C., and Lim, K. J. (2012). Evaluation of Groundwater Recharge rate for Land Uses at Mandae Stream Watershed Using SWAT HRU Mapping Module, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(5), pp. 743-753. [Korean Literature]
- Saleh, A., Arnold, J., Gassman, P. W. A., Hauck, L., Rosenthal, W., Williams, J., and McFarland, A. (2000). Application of SWAT for the Upper North Bosque River Watershed, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 43, pp. 1077-1087.
- United States Army Corps of Engineers (USACE). (2005). Hydrologic Engineering Corps Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) Version 3.0.0. Build 1147, <http://www.hec.usace.army.mil>.
- Yang, J. S. and Chi, D. K. (2011). Correlation Analysis Between Groundwater Level and Baseflow in the Geum River Watershed, Calculated Using the WHAT System, *Journal of Engineering Geology*, 21(2), pp. 107-116.