

미래 기후변화에 따른 급경사지 유역에서의 지하수 함양, 기저유출 및 토양유실 평가

이지민 · 정영훈* · 박윤식** · 강현우 · 임경재 · 김형수***

국립강원대학교 지역건설과

* 국립강원대학교 환경연구소

** 퍼듀대학교 농공학과

*** 인하대학교 토목공학과

Assessment of Future Climate Change Impact on Groundwater recharge, Baseflow and Sediment in Steep Sloping Watershed

Lee, Ji Min · Jung, Younghun* · Park, Younshik**

Kang, Hyunwoo · Lim, Kyoung Jae · Kim, Hungsoo***

Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University, Korea

** Environmental Research Center, Kangwon National University, Korea*

*** Department of Agricultural and Biological Engineering, Purdue University*

**** Department of Civil Engineering, Inha university, Korea*

요 약

기후변화로 인해 폭우 및 재해들이 일어나고 있다. 특히 강우강도가 커짐에 따라 토사유출도 심해지고 있다. 이에 따라 효율적인 수자원 및 수질 관리를 위해 지하수 함양량과 기저유출, 그리고 토사유출 현황을 평가 하는 것이 필요하다. 이에 본 연구에서는 대표적인 급경사지 유역인 양구 해안면 유역에 미래기후변화 시나리오를 적용하여 지하수 함양량, 기저유출량, 유사량을 전망하였으며, 또한 유역의 경사도를 완만하게 줄임으로서 지하수 함양량, 기저유출량, 유사량의 변화를 분석하였다. 모의 기간을 2013~2040년, 2041~2070년, 2071~2100년으로 나누었으며, 급경사지 유역보다 유역의 경사도를 완만하게 줄인 경우가 지하수 함양량이 평균 50% 증가되었으며, 기저유출량도 약 42% 증가되었다. 유사량은 급경사지 유역보다 경사도를 완만하게 줄였을 경우가 72% 유사량이 줄어드는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 경사도를 완만하게 적용하면 유역 내 지하수 함양량 및 기저유출량이 증가하고, 유사량을 저감 시킬 수 있는 것으로 분석되어 향후 탁수에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

핵심용어 : SWAT, 유사량, 기저유출, 지하수함양량, 기후변화

Abstract

Climate change has caused detrimental phenomena such as heavy rainfall which could aggravate soil erosion. Accordingly, it is needed to evaluate the groundwater recharge, baseflow, and soil erosion for the efficient management of water resources and quality. In this study, future climate change scenarios were applied to the Hae-an-myeon watershed which is a steep sloping watershed in South Korea to analyze groundwater recharge, baseflow, sediment. Also, the variation of groundwater recharge, baseflow, sediment was analyzed according to the change of slope (5 %). Simulated periods were divided into three terms (2013 ~ 2040 years, 2041 ~ 2070 years, 2071 ~ 2100 years). As a result of this study, average groundwater recharge and baseflow increased by 50 %, 42 %, and sediment decreased by 72 %, respectively. In these regards, the suggested method will positively contribute to hydro-ecosystem and reduction of muddy water at a steep sloping watershed.

Keywords : SWAT, Sediment, Baseflow, Groundwater recharge, Climate Change

+ Corresponding Author: jung.younghun@gmail.com

1. 서론

최근 기후가 급변하면서 전 세계적으로 국지성 집중호우나 폭설, 폭우, 가뭄 등의 재해들이 많이 일어나고 있다 (Jang and Ahn, 2011). 유엔 산하 정부 간 패널 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007)의 4차 보고서에 의하면 기상이변으로 인하여 향후 강수량 및 홍수 발생빈도 등이 증가하여 자연재해가 빈번히 발생할 것으로 예측되었다 (IPCC, 2007). 우리나라는 연평균 강수의 70%가 6월부터 9월에 집중되는 몬순기후에 속하기 때문에 홍수 및 산사태 등의 자연재해로 인해 많은 인명 및 경제적 피해가 발생되고 있다. 또한, 국토 면적의 70% 이상이 산지로 형성되어 있기 때문에 개간을 통해 만들어진 급경사지 농경지가 많다. 이러한 농경지에서는 강우강도의 증가로 지표유출량이 증가하고 이로 인해 토양유실이 심해지고 있으며 이로 인한 수질 악화 및 수생태계 파괴 등 다양한 환경문제가 발생하고 있다 (Lee et al., 2011; Kim et al., 2007).

집중호우, 강우강도의 증가하면서 직접유출은 증가하고 지하수 함양량은 줄어들고 있는 추세이다. 직접유출에 의해 유실된 토양이 하천에 퇴적되고, 감소된 지하수 함양으로 인해 기저유출의 비율이 감소하면서 건기시 하천의 건천화와 우기시 하천으로 유입된 퇴적토가 수생태계에 악영향을 미치고 있다 (Lee et al., 2011). 따라서 기후변화를 고려하여 안정적인 수생태계를 유지하고 수자원을 확보하기 위해서는 무엇보다도 유량 확보가 중요하다 (Lee et al., 2010). 특히 건기에도 안정적인 유량 확보를 위해서는 지하수 함양량을 증대시켜 하천유지용수량을 확보하는 것이 중요하다. 지하수 함양량 증대는 직접유출의 감소로 이어지고, 이는 다시 토양유실의 감소로 이어지기 때문에 수생태계의 환경문제 개선에도 큰 도움이 될 것으로 예상된다. 기후변화에 대응전략과 효율적인 수자원 관리 계획을 수립하기 위해서는 지하수 함양량과 기저유출 특성의 시간적/공간적 변화 특성을 파악하고 분석하는 것이 중요하다.

지하수 함양량 및 기저유출, 그리고 토사유출 특성을 파악하기 위해서는 현장/유역에서의 직접적인 장기 모니터링이 필요하다. 그러나, 인적/경제적 한계점 때문에 컴퓨터기반의 모형들이 개발되었고 활용되고 있으며, 최근 기후변화 시나리오와 모형을 연계하여 장기적인 관점에서의 기후변화에 따른 수문 특성 변화 및 토양유실 발생 및 거동 등에 관한 많은 연구가 진행되고 있다.

지하수 함양량 및 토양유실/유사량을 산정하는 모형에는 MOHISE (Serge Brouyre, 2004), MODFLOW (Modular Three Dimensional Finite Difference Ground Water Flow), HELP (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance), SWAT (Soil and Water Assessment Tool; Arnold et al., 1998), SATEEC (Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control; Lim et al., 2003) 모형 등이 있으며 최근 기후변화에 따른 토양유실과 지하수 함양량에 대한 많은 연구가 수행되었다. (e.g. Croteau et al., 2010; Kingston and Taylor, 2010; Klik and Eitzinger, 2010; Li Liu et al., 2011; Fung et al., 2013; Kumar, 2013))

하천으로 기저유출 형태로 유입되는 양을 산정하기 위해서는 하천 유량을 직접유출량과 기저유출량으로 구분할 필요가 있다. 하천에서 측정된 유출량을 분리하는 방법에는 많은 연구에 의해 다양한 수문곡선 분리 방법이 제시되고 있으나, 장기간의 유량에 대해서 객관적인 수문분석을 할 수 있는 방법으로는 미국 USGS(US Geological Survey, 2008)에서 개발하여 배포하는 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) 등이 있다. 이 중 WHAT 시스템의 Eckhardt 필터는 수문 분석시 대수층별로 특성을 반영할 수 있는 BFImax 변수 값을 이용하여 직접유출과 기저유출을 분리할 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 연구의 목적은 선행연구를 토대로 필지 단위 함양량과 토양유실량을 산정할 수 있는 SWAT 모형과 WHAT 시스템을 이용하여 1) 급경사지 유역에서의 유출 및 유사량 보정을 수행하고 2) 미래기후 시나리오를 적용하여 미래지하수 함양량, 토양유실량, 그리고 기저유출량을 산정하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구지역

본 연구에서는 강원도 양구군 해안면 유역(Figure. 1)을 연구대상지역으로 선정하였다. 유역면적은 63.08 km²로 이 중 산림이 차지하는 비율은 54.70 %, 농경지 30.52 %, 초지 9.85 %, 주거 및 상업지역은 4.88 %이며 나머지 0.05 %는 내륙수역이다. 해안면 유역은 가칠봉 (1,242m), 대우산(1,179m), 대암산(1,304m) 등 1,000m 이상의 고지로 둘러 싸여 있어 양구군내 다른 지역과 지형적으로 격리되어 있다. 또한 해안면

유역은 한강수계의 소양강의 지류이나 하천의 발달이 매우 미약한 편이다. 해안면 유역내 하천들은 주로 직접유출에 의해 구성되며, 주요 하천인 만대천에 합류된다. 해안면 유역내 하천의 경사는 평균경사가 11° 이나 상부는 20° 하부는 5° 이며, 전형적인 고랭지 농업이 주로 이루어지고 있다 (Yoo et al., 2008). 고랭지 농업 생산과정에서 과도한 비료 사용과 객토는 강우시 급경사의 농경지에서 심각한 토양 유실과

함께 영양물질이 수체로 유입되는 원인이 된다. 이러한 이유로 소양댐 유역내 해안면 유역이 흙탕물 및 비점오염물질의 주요 발생 지역으로 인식되고 있다 (Lee et al., 2013). 해안면 유역의 지형적 특성으로 지하수 함양과 기저유출의 비율이 감소하면서 건기시 하천의 건천화와 우기시 퇴적토가 수생태계에 악영향을 미치고 있어 본 연구의 대상 유역으로 선정하였다.

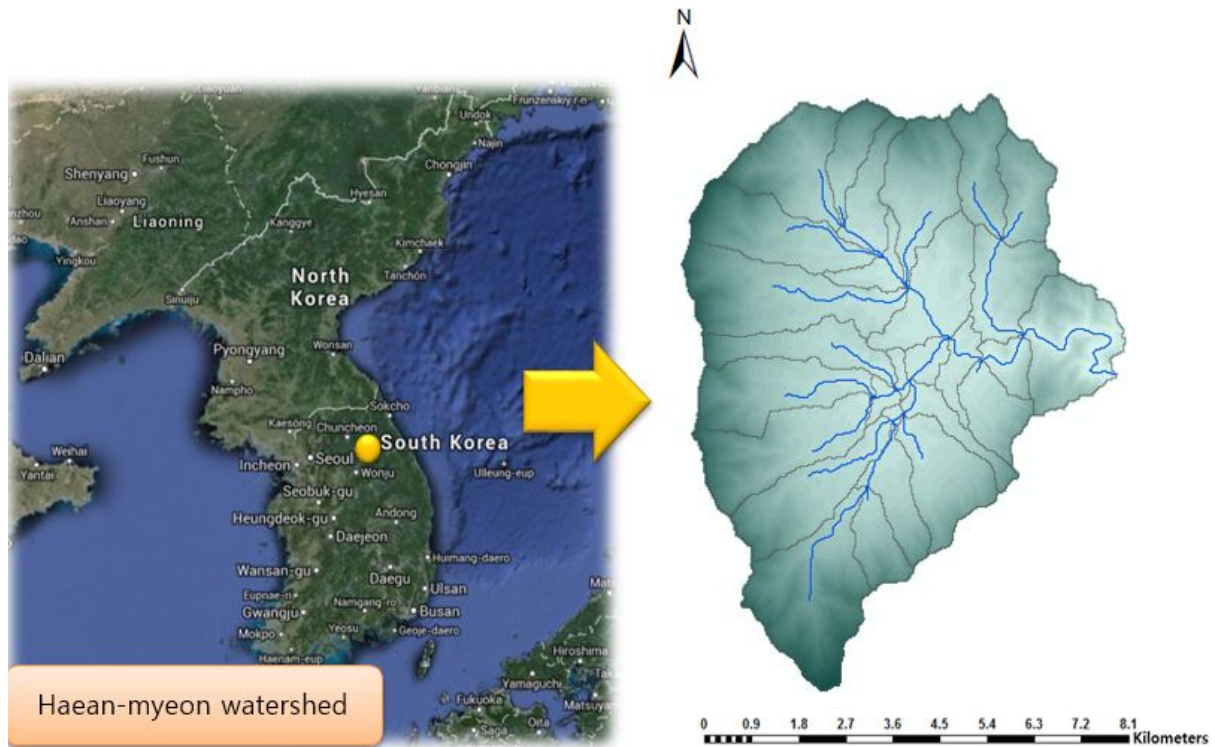


Figure 1. Location of the Hae-an-myeon watershed, Gangwon province

2.2 SWAT모형 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소 (USDA / ARS) 에 의해 개발된 유역단위모형이다 (Arnold et al., 1998). SWAT 모형은 유역내의 장기 강우-유출, 유사의 이동 및 과정을 예측 모의하는데 사용 될 수 있다. 특히, 미 계측 유역에서의 유출, 유사, 영양염류 등의 모의도 가능하여 경작형태나 기후 · 식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 수치화 할 수 있는 특징을 지니고 있다. SWAT 모형을 이용하기 위해서는 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대 습도)와 공간적으로 다르게 분포하는 토지이용현황, 토양속성, 지형자료 그리고 영농자료 등이 필요하다

(Arnold et al., 1998).

SWAT 모형은 HRU(Hydrological Response Unit)의 기본단위로 하여 유역 내 수문 (표면유출, 중간유출, 기저유출, 지하수 함양량 등) 현상을 모의하고, 유역 출구에서의 유출량을 평가한다. 또한 각 HRU별 강우-유출에 의한 토양유실 및 유사량을 모의한다. HRU는 토지이용도, 토양도, 경사도의 중첩을 통해 생성된다. 이러한 연산과정에서 소유역의 모든 HRU의 경사도와 경사장이 동일하게 산정되어 토양유실량 및 유출특성분석에서 불확실성이 발생할 수 있다. 이에 본 연구에서는 소유역내 정확한 수문/유사거동을 평가하기 위해서 소유역내 HRU의 지형 특성을 고려하여 SWAT모형 모의를 수행하는 것이 필요하다.

2.3 기상자료

SWAT 모형은 일 수평면 일사량 (MJ/m^2), 일 강수 (mm), 일 평균상대습도 (%), 일 평균풍속 (m/sec), 일 최고·최저기온 ($^{\circ}C$)을 기상자료로 이용한다. 본 연구에서는 TERRECO (2010)에서 조사한 해안면 유역의 총 11개 지점의 2007년부터 2010년 8월까지 관측된 일별 기상자료를 이용하였다.

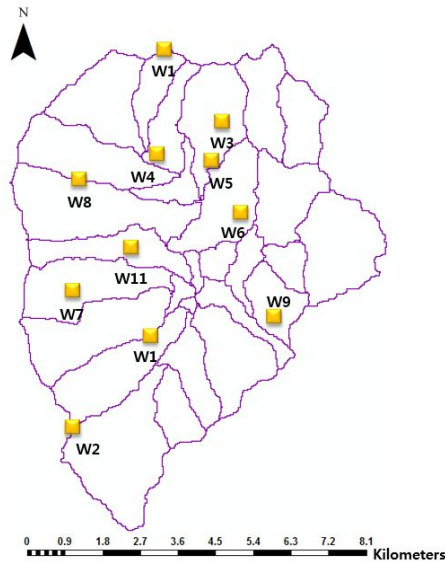
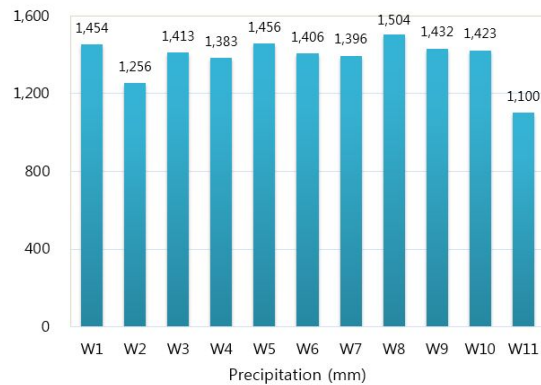


Figure 2. Spatial location of weather stations in the Hae-an-myeon watershed

Figure. 2 는 해안면 유역의 총 11개의 기상지점 위치를 나타낸다 (W1 ~ W11). SWAT 모형의 기상 자료 중 유출 및 지하수 함양량에 가장 많은 영향을 미치는 강수량 자료는 11개 관측소마다 많이 다른 차이를 보였다. 이 중 W8 지점의 2010년 연 강수량은 1,504 mm로 가장 많은 것으로 관측되었으며, W11 지점의 연 강수량이 가장 적은 1,100mm로 관측되었다.



2.4 DEM(Digital Elevation Model), 토지이용도, 토양도, 오염원 현황

SWAT 모형의 입력 자료인 DEM (Digital Elevation Model)은 국립지리원에서 제공하는 수치지도 (1:5,000)를 이용하여 구축하였으며, 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 개략토양도 (1:50,000)를 사용하였다. 해안면 유역의 토양은 주로 Re (Silt-Sand), Rock (Silt-Sand), Ra (Silt-Sand), Mu (Clay-Silt), Ma (Silt-Sand), An (Clay-Silt)로 구성되어 있다 (Figure. 3). SWAT모형의 여러 입력자료 중 토지이용도가 정확하지 않으면 모의치가 실측치를 제대로 반영하지 못하여 과대 또는 과소평가 될 수 있으며(Heo et al., 2008), 농경지에서 발생하는 지하수와 함께 이동하는 오염물질들은 작물별 영농방법에 따라 많은 차이를 나타낸다 (Kim et al., 1999). 이에 본 연구에서는 해안면 유역 내 유출량/함양량 및 토양유실량 현황을 정확하게 예측하기 위하여 TERRECO (2010)에서 조사한 해안면 유역의 실측 작물지도를 이용하여 토지이용도 (Figure. 4)를 구축하였다. 이러

한 필지별 작물의 경작 방법, 경운, 시비 등의 영농정보를 SWAT 모형의 입력자료로 활용하였다. 또한 정확한 유역 유출 및 토양유실량 평가를 위하여 양구군 (Yanggu-gun)에서 제공하는 해안면 유역 내 환경기초시설에서 배출하는 방류량 자료를 이용하여 유량 및 유사량을 보정하였다.

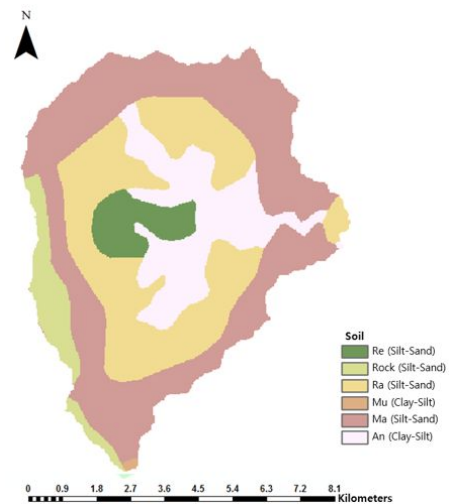


Figure 3. Major soil types

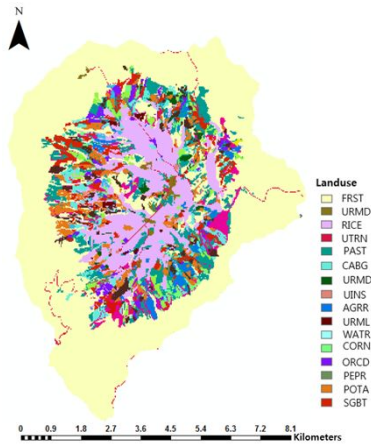


Figure 4. Landuse

2.5 영농 입력자료

앞에 기술한 바와 같이 본 연구에서는 작 필지별 작물 정보를 모형의 입력 자료로 활용하였다. 총 7 가지 주요 작물에 대한 영농 정보 (과종, 시비, 경작 방법 등)을 모형의 입력 자료로 활용하였는데, 이는 농촌진흥청 (RDA; Rural Development Administration) 에서 제공하는 작물별 관리 매뉴얼을 참고하여 영농 방법 DB를 구축하였다 (Table 1). 이러한 각 작물별 영농정보를 모형의 입력 자료로 활용함으로써 지역적 특성 고려한 영농활동에 맞게 SWAT 모의를 수행하였다.

Table 1. Scenarios of crop cultivation periods in SWAT crop management

Crop	Plant/begin growing season	Fertilizer applications	Pesticide applications	Tillage	Irrigation	Harvest and Kill
Rice	May. 20	Jan. 5 Aug. 1 (Auto fertilizer)	Jun. 1	Jan. 5 Mar. 1 Nov. 1	Mar. 1 May. 17 (Auto irrigation)	Oct. 15
Corn	May. 1	-	May. 5	Jun. 1	Jun. 1	Aug. 15
Soybean	May. 1	-	May. 5	Jun. 1	Aug. 15	Nov. 1
Radish	Mar. 1	May. 7 (Auto fertilizer)	Mar. 7	Mar. 10	Mar. 10	May. 5
Potato	Mar. 15 Aug. 10	Feb. 2 Jul. 11	Apr. 7 Aug. 20 Sep. 18	Feb. 1 Apr. 7 Jul. 10 Aug. 25	-	Jul. 7 Oct. 20
Cabbage	Mar. 1 Jul. 10	Mar. 7 Aug. 5	Mar. 7 Aug. 5	-	Mar. 7 (Auto irrigation)	May. 5 Oct. 20
Pepper	May. 1	May. 5	May. 5	Jun. 1	Aug. 15	Nov. 1

2.6 경사도/ 경사장 구축

SWAT모형은 전반적으로 경사가 완만한 지역인 미국 지형을 바탕으로 개발되어 적용되었다. 그러나 이모형에 사용된 많은 수문 및 토양유실, 그리고 비점관련 모듈은 국내 지형 특성을 반영하기에는 한계가 있다. 우리나라와 같이 경사가 급한 곳이 많은 유역에 SWAT 모형을 적용할 때, 지형인자 추출 오류가 발생할 수 있기 때문이다. 또한 SWAT 모형은 소유역의 평균경사와 HRU의 경사장 관계 곡선식을 이용하여 HRU의 평균 경사장을 산정하는데, 이 과정에서 경사도 25% 이상인 급경사지역에 있는 소유역 경사장의 값을 일괄적으로 0.05m로 작게 산정하는 문제가 있다 (Arnold and Srinivasan, 1994). 이러한 HRU의 지형인자 추출 한계로 인하여 각 수문 컴포넌트별 오류가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 정확한 지하수 함양량 및 토양유실량 모의를 위해 2010년 해안면 유역의 실측 경사도와 실측경사장 자료 TERRECO (2010)를 이용하여 (Figure 5, 6), 해당 소유역 경사도와 경사장에 HRU별로 입력함으로서 전형적인 급경사 농업지대인 해안면 유역의 유출량/함양량 및 토양 유실량을 산정하는데 있어서 지형의 왜곡으로 인한 예측 오류를 방지하고자 하였다.

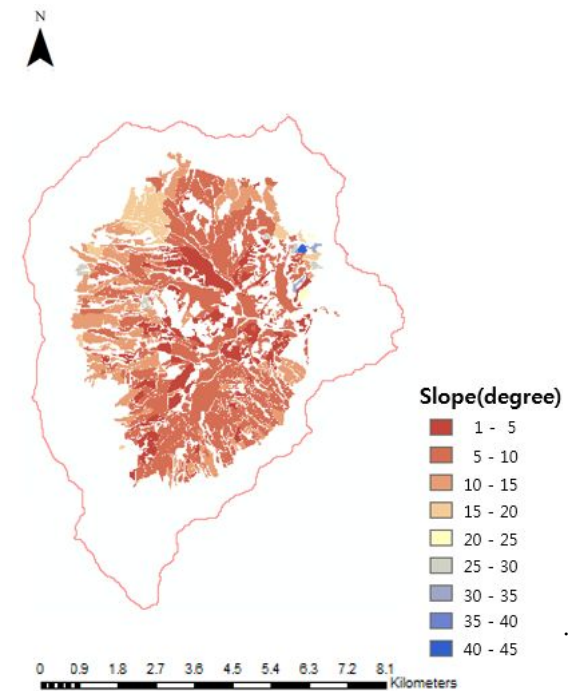


Figure 5. Slope at the Haean-myeon watershed

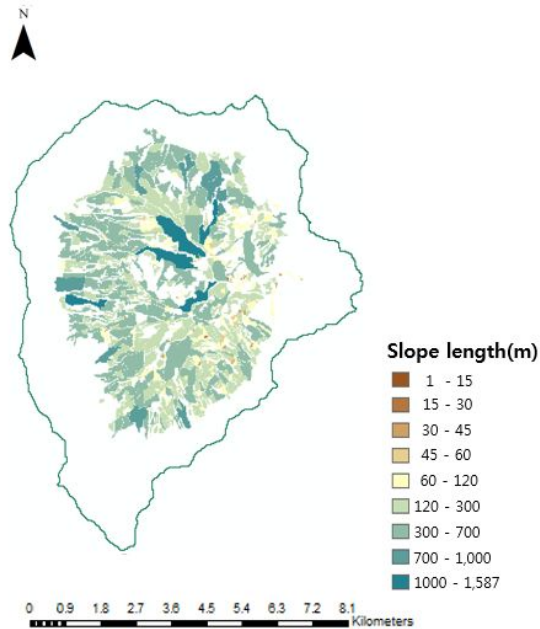


Figure 6. Slope length at the Haeon-myeon watershed

2.7 SWAT 모형 유출량 및 유사량 보정

본 연구에서는 유출량과 관련된 SWAT의 변수를 조정 한 후, 유사와 관련된 변수 순으로 유량 및 유사량에 대하여 SWAT 모형을 보정하였다. 이 과정에서 유사에 관련된 변수 중 일부는 유출량에 영향을 미칠 수 있기 때문에 유출량 관련 변수 보정 후 유사관련 변수를 보정 하였다. SWAT 모형 보정 시 사용된 변수는 Surlag, LAT_Time, USLE_C, ALPHA_BF, SLSOIL 이며, 5개의 매개변수가 유출량과 유사량에 가장 민감하게 반응하는 것으로 나타났다 (Lee et al., 2013). 유출량은 2010년 1월부터 2010년 8월 까지 총 강우-유출이 발생한 25일에 대해 유량 보정을 실시하였으며, 유사량은 2010년 1월부터 2010년 7월까지 총 20일에 대한 유사량 보정을 하였다. SWAT 모형 보정시 모형이 관측자료의 특성을 잘 반영하는지를 평가하기 위하여 결정계수 (R^2)와 유효 지수 (NSE)를 이용하였다. NSE 산정은 식 (1)에 의하여 계산될 수 있다 (Nash and Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (1)$$

여기서, O_i 는 각 강우시 실측된 값이고, P_i 는 모델에서 예측된 각 강우별 별 모의 값이며, \bar{O}_i 는 모든 강우시 실측값의 평균이다. NSE의 값이 1 에 가까울수록 모델의 예측치가 실측치를 잘 예측한 것

을 의미한다. Ramanarayana et al. (1997)은 R^2 가 0.5 이상이고 NSE가 0.4 이상일 때 임계점을 만족한 것으로 제안하였다.

2.8 지하수 함양량/ 기저유출량 및 유사량 산정

본 연구에서는 유량 보정된 SWAT 모형 예측치를 이용하여 지하수 함양량을 분석하였다. 또한 함양량 중 기저유출 형태로 하천으로 유입되는 양을 분석하기 위하여, 유량 보정된 SWAT 모형 예측치를 WHAT 시스템을 이용하여 기저유출량을 분석하였으며, 유사량을 분석하기 위해서 유역면적당 유사량을 평가하였다.

선행 연구인 Lee et al. (2013)의 연구 결과에서는 해안면 유역을 대상으로 건천화 문제를 해결하기 위한 방법으로 급경사 농경지의 경사를 완만하게 조정하여 함양량 및 기저유출량을 증가시킬 수 있다는 결론을 내렸다. Scenario 1은 실측 경사도를 이용하여 모의한 결과와 경작지의 경사도를 5%로 완만하게 조절하였을 때 유출량/함양량 및 유사량에 미치는 영향을 파악하였는데, 본 연구에서는 Lee et al. (2013)의 연구결과를 기반으로 미래기후 시나리오를 적용하여 분석해 보았다.

2.9 미래기후 적용한 경사도 변화에 따른 지하수함양량 / 기저유출량 / 유사량 분석

급경사지 유역에서의 경사도를 완만하게 변화시키는 것이 장기적인 관점에서 함양량 및 기저유출량, 그리고 토양유실량에 어떠한 영향을 미치는지 평가하는 것이 필요하다. 이를 위하여 기상청에서 제공하는 2013년부터 2100년까지의 미래기후 시나리오 (본 연구에서는 SRES 시나리오 B1, A1B, A2 중 A1B 시나리오를 사용)를 이용하여 분석하였다. 기후변화 시나리오를 연구대상 유역에 적용하기 위해서는 미래기후 시나리오에 대하여 실측 기상자료를 이용한 편의보정이 선행되어야 한다.

미래기후변화 시나리오는 전지구적인 모델이고, 결과 자료들이 불확실성을 내포하고 있어 한반도 지형에 적용하기 위해서는 편의 보정을 해야 한다. 본 연구에서는 Kum et al.(2013)이 제시한 Change Factor + Quantile Mapping (CF + QM) bias correction method을 이용하여 기후변화 시나리오의 편의를 보정하였다. Change Factor + Quantile Mapping 기법은 우리나라와 같이 월별 강우 특성이 뚜렷한 지역에 적용하기 적합하다. 이는 CF+ QM 방법이 Change Factor기

법을 이용하여 월별 편의보정을 실시하여 월별 강수 발생 특성을 반영하고, 다시 한 번 편의보정 기간 전체에 대해 Quantile Mapping기법을 적용하여 확률적 특성이 고려되도록 설계되었기 때문에, 기존의 두 기법을 각각 적용한 결과보다 통계적 관점에서 더 좋은 편의 보정 결과를 나타내는 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기존의 편의보정 방식 보다 정확한 CF + QM기법을 적용하여, 해안면 유역의 미래기후 변화를 예측하였다.

편의보정 된 기상자료는 SWAT 모형의 입력 자료로 이용되었으며 경사도 변화에 따른 지하수 함양량, 기저유출량 및 유사량 분석하였다. 모의 기간은 2013년부터 ~ 2100년까지 88년을 선정하였으며, 세 기간으로 2025s (2013 ~ 2040년), 2055s (2041 ~ 2070년), 2085s (2071 ~ 2100년) 나누어 분석하였다. 편의 보정된 미래기후 자료를 이용하여 실측한 경사도를 이용하여 SWAT모형을 적용한 결과와 급경사지의 경사도를 5%로 완만하게 조성하였을 경우 함양량, 기저유출량, 유사량을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 SWAT 모형 유량 및 유사량 보정 결과

본 연구에서 SWAT모형을 이용하여 유출량과 유사량에 민감한 보정변수를 조정하여 유출량과 유사량을 산정하였다(Table 2). 2010년 1월부터 2010년 8월까지 총 25일간 일별로 해안면 물골교에서 조사된 실측 유출량에 대하여 보정하였다. 보정 결과는 $NSE = 0.71$, $R^2 = 0.80$ 로 SWAT이 유출량을 만족스럽게 예측하는 것으로 보인다. 특히 유출량에 대한 SWAT 보정 결과 (Figure 7)에서 보이듯이 건기 시 유량을 잘 모

의하는 것으로 나타났다. 유량에 대한 보정 후 보정된 매개변수를 이용하여 2010년 1월부터 2010년 7월까지 총 20일간 일별로 해안면 물골교에서 조사된 실측 유사량 자료에 대하여 유사관련 매개변수를 보정하였다. 유사량에 대한 모형 보정시 실측자료를 정규화 된 값으로 변환 하였으며, 유의 수준 0.05 (신뢰도 95%함)를 기준으로 정규성 분포를 따르지 않는 자료는 분석에서 제외하였다. 이에 따라 2010년 5월18일 실측 유사량 자료를 제외한 후 보정하였다. 유사량에 대한 보정결과도 $NSE = 0.58$, $R^2 = 0.59$ 로 Ramanarayana et al. (1997)가 제시한 임계점을 만족하는 결과가 나왔다 (Figure 8). 본 연구의 보정결과에서 보이는 바와 같이 Ramanarayanan et al. (1997)이 제시한 기준에 따라 만족할 만한 결과가 나왔으므로, SWAT 모형을 이용하여 해안면 유역의 유출량과 유사량을 모의 할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Five parameters used in calibration for flow, SS estimation

Parameter	Description	Variation Method	Value
USLE_C	USLE Cropping and Management (C) factor	Multiply by Value	2.00
SURLAG	Surface runoff lag time	Replace by value	0.06
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	Replace by value	1.00
LAT_TIME	Lateral flow travel time(days)	Replace by value	1.00
SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow(m)	Replace by value	0.20

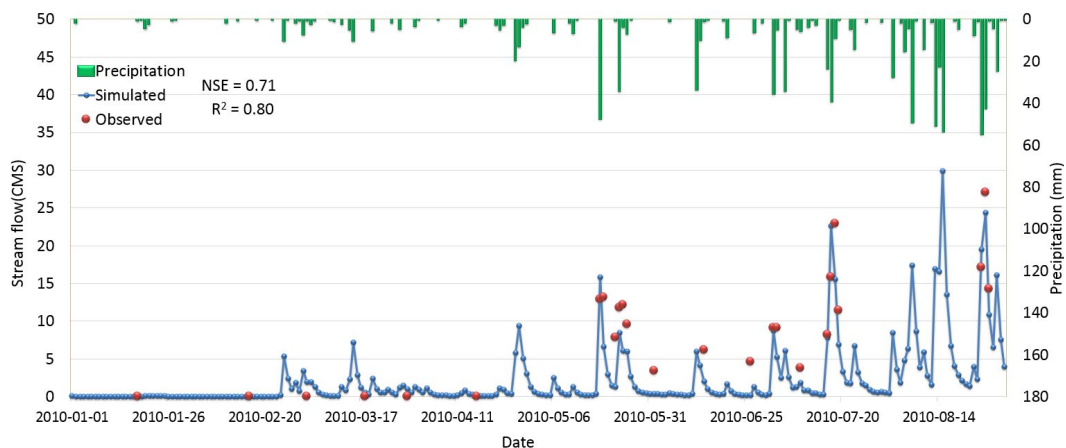


Figure 8. SWAT Calibration for SS comparison of Simulated and Observed

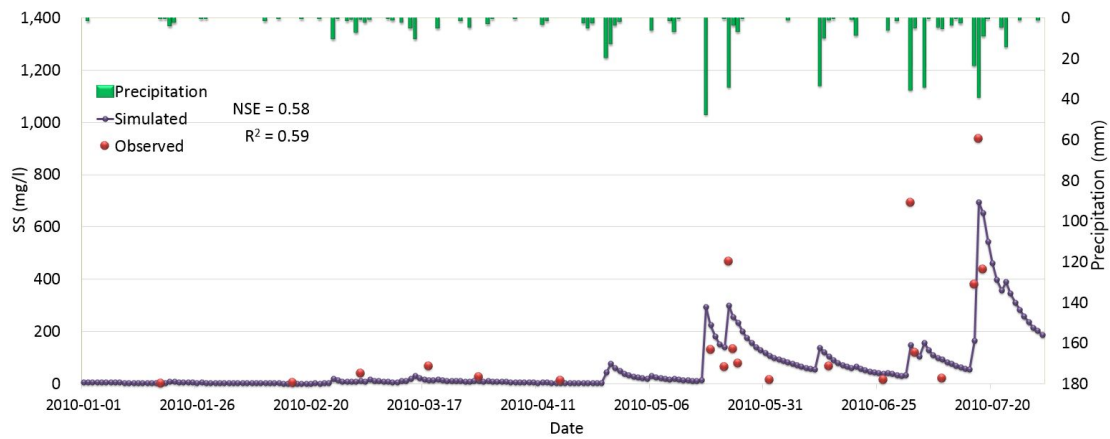


Figure 8. SWAT Calibration for SS comparison of Simulated and Observed

3.2 미래기후를 적용한 지하수 함양량 결과

본 연구에서는 유량이 보정된 SWAT모형에 A1B 시나리오를 적용하였다. A1B 시나리오 편의보정 한 결과를 세 기간 2025s (2013 ~ 2040년), 2055s (2041 ~ 2070년), 2085s (2071 ~ 2100년)로 구분하여 모형의 입력자료를 구축하여 해안면 유역에 적용하였다. 기후변화 분석기간은 2013년부터 2100년까지 88년을 대상으로 선정하였다. 총 강수량에 대한 지하수 함양량을 보면 2025s (2013 ~ 2040년)는 20.2%이며, 2055s (2041 ~ 2070년)는 22.2%, 2085s (2071 ~ 2100년)는 23.1%로 결과가 나왔다. 이러한 경향은 세 기간마다 연강수량의 분포는 다르지만 총 강수량에 대한 지하수 함양량 비율을 보면 세 기간 모두 20% 이상인 것으로 분석되었다 (Table 3).

Table 3. The groundwater recharge rate of precipitation

	2025s (2013 ~ 2040)	2055s (2041 ~ 2070)	2085s (2071 ~ 2100)
Precipitation (mm)	1149.8	1371.9	1283.4
The ratio of Groundwater to precipitation recharge (%)	20.2	22.2	23.1

3.3 미래기후를 적용한 경사도 변화에 따른 지하수 함양량 / 기저유출량 / 유사량 결과

본 연구에서는 급경사지 유역에서 지하수 함양량과 기저유출량 증가시키고 유사량을 줄이기 위한 방안으로 Lee et al. (2013)의 연구를 미래기후에 적용하여 지하수함양량, 기저유출량, 유사량을 전망해보았다. 모의 기간을 2025s (2013 ~ 2040년), 2055s (2041 ~ 2070년), 2085s (2071 ~ 2100년) 나누어 미래기후 시나리오를 적용한 지하수함양량, 기저유출량, 유사량을 분석한 결과는 Table 4와 같다. Figure. 9는 2025s 기간의 시나리오를 적용한 분석결과를 보여준다. 실측 경사도를 이용하여 분석한 함양량 결과 (232.25mm)와 경사도를 완만하게 줄인 경우 해안면 유역에서의 지하수 함양량 (443.91mm)은 약 90% 증가하는 것으로 분석되었다 (Figure. 9). 또한 기저유출량은 0.85 m³/s에서 1.49 m³/s로 약 75%가 증가되어(Figure. 10) 지하수 함양량이 증가 할수록 기저유출량도 증가하는 것으로 나타났다. Figure. 11 는 경사도 조정으로 인한 우기기간인 2025s 7월과 건기 기간인 2025s 10월의 기저유출량 변화를 보여준다. 7월의 경우 해안면 유역의 유출량은 1.17 m³/s에서 1.52 m³/s로 증가하고, 10월의 경우 0.66 m³/s에서 1.18 m³/s로 증가하는 것으로 분석되었다. 유사량 또한 실측 경사도를 이용하여 분석한 결과(205.9 kg/km²)보다 경사도를 완만하게 줄였을 경우 평균 유사량은 54.8 kg/km²로 약 73% 유사량이 줄어드는 것으로 나타났다. (Figure. 12). Table 4에서 2050s 실측 경사도를 이용하여 분석한 함양량 결과 (304.56mm)와 비교했을 때 경사도를 완만하게 줄인 경우 해안면 유역에서의 지하수 함양량

(392.65mm)은 약 29% 증가하는 것으로 분석되었다. 또한 기저유출량은 0.98 m³/s에서 1.20 m³/s로 약 22%가 증가되었다. 유사량 또한 실측 경사도를 이용하여 분석한 결과(241.6 kg/km²)보다 경사도를 완만하게 줄였을 경우 평균 유사량 69.4 kg/km²로 약 71% 유사량이 줄어들었다. 2085s 실측 경사도를 이용하여 분석한 함양량 결과 (296.46mm)와 비교했을 때 경사도를 완만하게 줄인 경우 해안면 유역에서의 지하수 함양량(390.37mm)은 약 32% 증가하였다. 또한 기저유출량은 0.80 m³/s에서 1.05 m³/s로 약 31%가 증가되었

다. 유사량 또한 실측 경사도를 이용하여 분석한 결과(178.4 kg/km²)보다 경사도를 완만하게 줄였을 경우 평균 유사량 46.7 kg/km²로 약 73% 유사량이 줄었다.

미래기후 시나리오 적용한 분석결과에서 보이는 바와 같이 급경사지 유역인 해안면을 경사도5%로 완만하게 조정함으로써 지하수 함양량이 증가함에 따라 기저유출량도 증가하며, 토양유실량은 저감시킬 수 있는 것으로 나타나 장기적으로 전략적인 유역 관리를 해야 할 것으로 사료된다.

Table 4. Results using the measured slope and slope 5% for future climate

	2025s (2013 ~ 2040)		2055s (2041 ~ 2070)		2085s (2071 ~ 2100)	
	Measured slope	Slope 5%	Measured slope	Slope 5%	Measured slope	Slope 5%
Groundwater recharge (mm)	232.25	443.91	304.56	392.65	296.46	390.37
Base flow (CMS)	0.85	1.49	0.98	1.20	0.80	1.05
Sediment (kg/km ²)	205.9	54.8	241.6	69.4	178.4	46.7

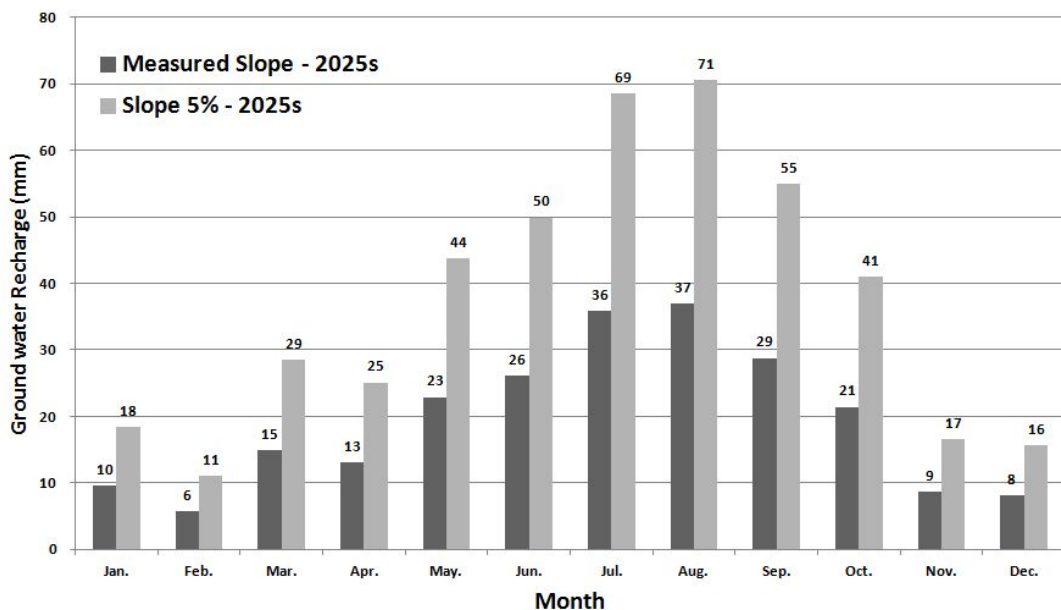


Figure 9. Comparison of the groundwater recharge in measured slope and slope 5% in 2025

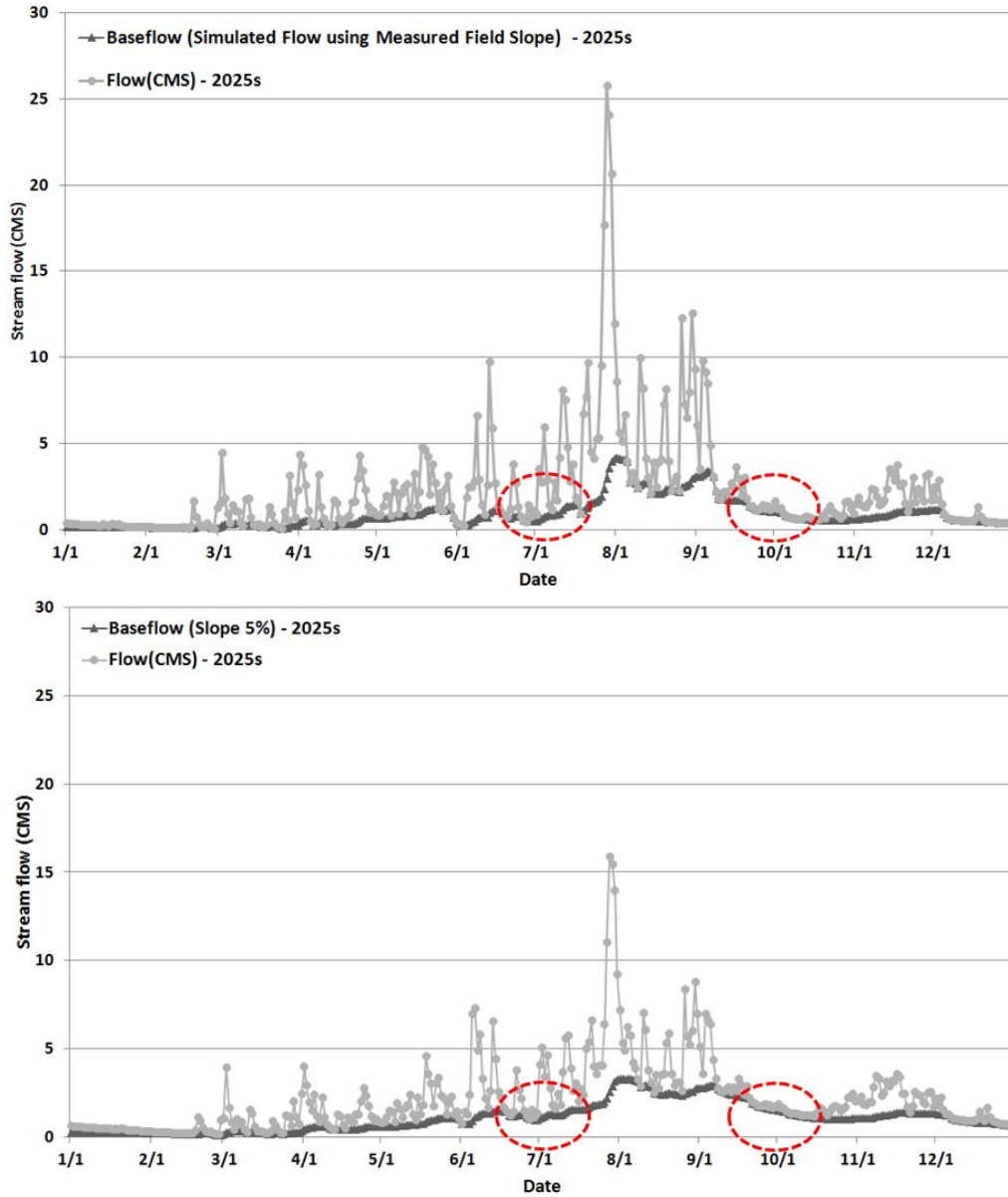


Figure 10. Comparison of the streamflow in measured slope and slope 5% in 2025s

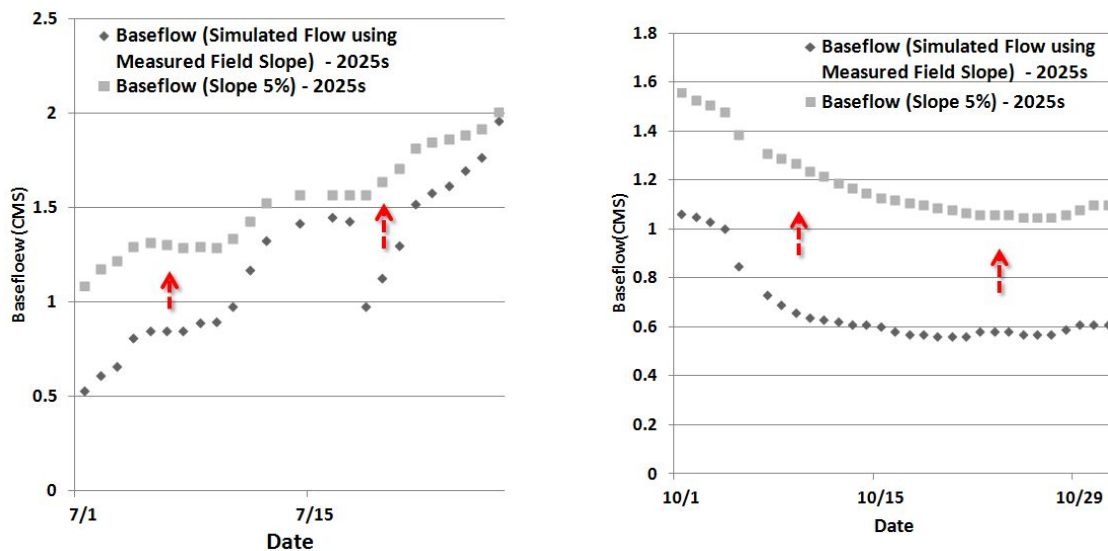


Figure 11. Comparison of the base flow in measured slope and slope 5% in 2025s

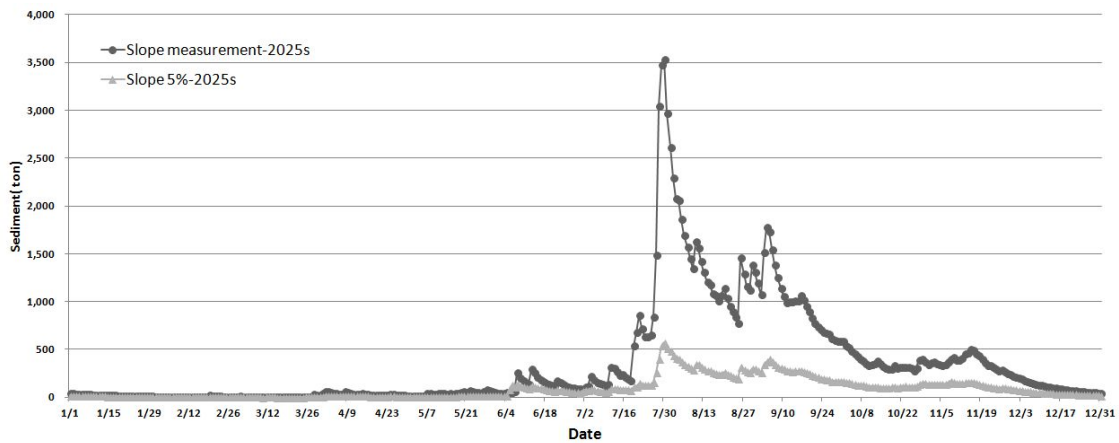


Figure. 12. Comparison of the sediment in measured slope and slope 5% in 2025s

4. 결론

본 연구에서는 해안면 유역을 대상으로 SWAT 모형과 A1B 시나리오를 이용하여 미래 기후에 따른 지하수 함양량, 기저유출량, 유사량을 전망하였다.

연구결과 기존 SWAT모형을 이용한 유출 및 유사 평가시, SWAT모형의 구조적 특성 및 제한점으로 인하여 유역내 HRU의 지형을 정확히 반영하지 못하였다. 특히 급경사 농업지대에서 지표유출과 기저유출 및 유사거동에 의한 하천유입량 등을 정확한 평가를 수행할 수 없었다. 따라서, 본 연구에서 실측 경사도와 경사장을 통해 HRU별로 입력함으로써 보다 정확한 유출 및 유사 평가 산정이 가능해 질 것이라 사료된다. 또한 해안면 유역의 실측 작물지도를 이용하여 토지이용도를 구축한 후, 필지별 작물 영농정보 입력(시비/ 경작방법 등)을 하였기 때문에, 보다 정확한 모의를 하여 지하수 함양량 분석을 할 수 있다고 판단된다. 실측 유량에 대한 SWAT 모형의 보정결과는 $NSE = 0.71$, $R^2 = 0.80$ 이며, 유사량에 대한 보정결과는 $NSE = 0.58$, $R^2 = 0.59$ 로 Ramanarayana et al. (1997)가 제시한 임계점을 만족하는 결과가 나왔다.

이를 통해 해안면 유역의 미래기후를 적용하여 함양량 및 기저유출량을 증가 시키고 유사량을 줄이기 위한 방안으로 기후변화에 따른 급경사지 농경지의 경사를 완만하게 조정하는 대책을 제시하여 그 효과를 평가한 결과 경사지의 경사도를 5%로 완만하게 변경하면 지하수 함양량은 평균 50% 증가하고, 기저유출량도 평균 42% 증가하며, 경작지 발생된 유사량도 평균 72% 저감시킬 수 있는 것으로 분석되어 탁수 및 하천생태계에도 매우 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

본 연구는 기후변화에 따른 급경사지역의 지하수 함양량과 기저유출량 및 유사량의 상관관계를 파악할 수 있는 중요한 정보를 제공하며, 향후 전반적인 물 관리 및 물안보 체제 구축을 위한 기초 자료로 이용될 수 있다. 단기 유출량 변화에 따라 지하수 함양량 및 기저유출량의 관리도 중요하지만 장기적인 인프라를 구축하여 효율적인 물 관리 체계로 전환하여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국환경산업기술원 GAIA Project (No: 2012000540017) “식생조절 방안/공학적 저감 공법/토지개발사업 토양침식 저감 공법 개발”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

Reference

- Anderson MG and Burt, TP (1980). Interpretation of recession flow, *J. of Hydrology*, 46(1), pp. 89-101.
- Arnold, JG and Srinivasan, R (1994). Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Model with GIS, *Water Resources Bulletin, American Water Resources Association*, 30(3), pp. 456-462.
- Arnold, JG, Srinivasan, R, Muttiah, RS and Williams, JR (1998). Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development, *J. of American Water Resources Association*, 34(1), pp.

- 73-89.
- Brouyre, S, Carabin, G and Dassargues, A (2004). Climate change impacts on groundwater resources: modeled deficits in a chalky aquifer, Geer basin, Belgium, *J. of Hydrology*, 12(2) pp. 123-134.
- Croteau, A, Nastev, M and Lefebvre, R (2010). Groundwater recharge assessment in the Chateaugay River watershed Canadian, *J. of Water Resources*, 35(4), pp. 451-468.
- Fung, F, Watts, G, Lopez, A, Orr, HG, New, M and Extence, C (2013). Using large climate ensembles to plan for the hydrological impact of climate change in the freshwater environment, *Water resources management*, 27(4) pp. 1063-1084.
- Heo, SG, Kim, NW, Park, Y, Kim, SJ, Kim, J, Ahn, JH, Kim, K and Lim, KJ (2008). Evaluation of Effects on SWAT Simulated Hydrology and Sediment Behaviors of SWAT Watershed Delineation using SWAT ArcView GIS Extension Patch, *J. of Korean Society on Water Environment*, 24(2), pp. 147-155.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; Summary for Policymakers*, Cambridge University Press, pp. 104.
- Jang, JH and Ahn, JH (2012). Assessing Future Change Impact on Hydrologic and Water Quality Components in Nakdong River Basin, *J. of Korea Water Resources Association*, 45(11), pp. 1121-1130.
- Kim, HW, Sin, YJ, Choi, JH, Kang, HW, Ryu, JC and Lim, KJ (2011). Estimation of CN-based Infiltration and Baseflow for Effective Watershed Management, *J. of Korea Society on Water Environment*, 27(4), pp. 405-412.
- Kim, JG, Lim, KJ, Park, YS, Heo, SG, Park, JH, Ahn, JH, Kim, KS and Choi, JD (2007). The Effect of Slope-based Curve Number Adjustment on Direct Runoff Estimation by L-THIA, *J. of Korea Society on Water Environment*, 23(6), pp. 897-905.
- Kim, JH, Lee, JS, Kim, BY, Hong, SG and Ahn, SK (1999). Analysis of GroundWater used for Agriculture in kyonggi Province, *Korean J. of Environmental Agriculture*, 18(2), pp. 148-154.
- Kingston, DG and Taylor, RG (2010). Sources of uncertainty in climate change impacts on river discharge and groundwater in a headwater catchment of the Upper Nile Basin, Uganda, *Hydrology & Earth System Sciences*, 14(7), pp. 1297-1308.
- Klik, A and Eitzinger, J (2010). Impact of climate change on soil erosion and the efficiency of soil conservation practices in Austria, *J. of Agricultural Science*, 148(5), pp. 529-541.
- Kum, DH, Jung, YH, Shin, YC, Jang, CH, Kim, SJ, Kim, HB, Kong, DS and Lim, KJ (2013). Development of Web GIS-based bias correction system of future climate change Scenarios by improving limitation of existing bias correction methods (in review).
- Kumar, CP. (2013) "Recent studies on impact of climate change on groundwater resources". *Int. J. of Physical and Social Sciences*, Vol. 3, No. 11, pp. 189-221.
- Lee, JW, Kum, DH, Kim, BC, Kim, YS, Jeong, GC, Kim, KS, Choi, JD and Lim, KJ (2013). Study on Improvement of Calibration/Validation of SWAT for Spatio-Temporal Analysis of Land Uses and Rainfall Patterns, *J. of Korean Society on Water Environment*, 29(3), pp. 365-376.
- Lee, JW, Eom, JS, Kim, BC, Jang, WS, Ryu, JC, Kang, HW, Kim, KS and Lim, KJ (2011). Water Quality Prediction at Mandae Watershed using SWAT and Water Quality Improvement with Vegetated Filter Strip, *J. of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(1), pp. 37-45.
- Lee, MJ, Lee, JH, Jeon, SW and Houg, HJ (2010). Review of Policy Direction and Coupled Model Development between Groundwater Recharge Quantity and Climate Change, *J. of Korea Environment Policy and Administration Society*, 9(2), pp. 157-184.
- Lee, SH and Bae, SK (2011). The Effect of

- Precipitation Change to the Groundwater Recharge, *J. of Korean Wetlands Society*, 13(3), pp. 377-384.
- Lee, JM, Lee, GJ, Kim, BC, Hwang, SJ, Jung, YH, Kim, HB, Shin, YC, Kum, DH and Lim, KJ (2013). Changes in recharge/ baseflow and soil erosion for steeply sloping watersheds (in review).
- Li Liu, Timbal, B, Mo, J and Fairweather, H (2011). A GIS-based climate change adaptation strategy tool, *Int. J. of Climate Change Strategies and Management*, 3(2), pp. 140-155.
- Lim, KJ, Engel, BA, Tang, Z, Choi, J, Kim, K, Muthukrishnan, S and Tripathy, D (2005). Automated Web GIS-based Hydrograph Analysis Tool WHAT, *J. of the American Water Recourse Association*, 41(6), pp. 1407-1416.
- Lim, KJ, Choi, JD, Kim, KS, Sagong, M and Engel, BA (2003). Development of Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) in Small Scale Watershed, *J. of Korean Society of Agricultural Engineers*, 45(5), pp. 85-96.
- Lim, KJ, Park, YS, Kim, J, Shin, YC, Kim, NW, Kim, SJ, Jeon, JH and Engel, BA (2010). Development of genetic algorithm-based optimization module in WHAT system for hydrograph analysis and module application, *Computers & Geosciences*, 36(7), pp. 936-944.
- Nash, JE and Sutcliffe, JE (1970). River Flow Forecasting through conceptual models, Part I-A discussion of principles, *J. of Hydrology*, 10(3), pp. 282-290.
- Ramanarayanan, TS, Williams, JR, Dugas, WA, Hauck, LM and McFarland, AMS (1997). Using APEX to identify alternative practices for animal waste management, *ASAE International Meeting, Minneapolis*, pp. 97-2209.
- Ryu, JC, Choi, JW, Kang, HW, Kum, DH, Shin, DS, Lee, KH, Jeong GC and Lim, KJ (2010). Evaluation of groundwater recharge rate for land uses at Mandae Stream watershed using SWAT HRU Mapping module, *J. of Korea Society on Water Environment*, 28(5), pp. 743-753.
- Yang, JS and Chi, DK (2011). Correlation Analysis between Groundwater Level and Baseflow in the Geum River Watershed, Calculated using the WHAT SYSTEM, *J. of Engineering Geology*, 21(2), pp. 107-116.
- Yoo, DS, Kim, KS, Jang, WS, Jun, MS, Yang, JE, Kim, SC, Ahn, JH and Lim, KJ (2008). Evaluation of Sediment Yield using Area-weighted measured Slope and Slope Length at HeaAn Myeon Watershed, *J. of Korean Society on Water Environment*, 24(5), pp. 569-580.

- 논문접수일 : 2014년 03월 25일
- 심사의뢰일 : 2014년 03월 25일
- 심사완료일 : 2014년 04월 14일