



SWAT모형을 이용한 RCP 기후변화 시나리오에 따른 고랭지농업유역의 최적관리기법 평가

Assessment of Climate Change Impact on Best Management Practices of Highland Agricultural Watershed under RCP Scenarios using SWAT

장선숙* · 김성준**,[†]

Jang, Sun-Sook · Kim, Seong-Joon

Abstract

The purpose of this study was to evaluate the reduction effect of non point source (NPS) pollution in Haeon highland agricultural catchment (62.8 km²) for 13 BMP scenarios under RCP (Representative Concentration Pathway) 4.5 and 8.5 scenarios. Under the present climate condition, the BMP (best management practices) reduction efficiency of SS (suspended solid), T-N (total nitrogen), and T-P (total phosphorus) showed +25.7%, +4.2%, and +16.1% for VFS (vegetative filter strip), +0.1%, +15.6%, and +5.7% for FC (fertilizer control), and +6.3%, -2.9%, and +3.9% for RSM (rice straw mulching) respectively. In general, effective was the best for SS and T-P reductions, and the FC was the best for T-N reduction. The negative effect of T-N on RSM was induced by increase in infiltration and solute transport to baseflow. Under the future climate change scenarios, the SS, T-N, and T-P reduction efficiency showed the range of +1.9~+11.6%, -1.9~+0.2%, and +5.3~+11.9% respectively. The 3 BMPs (VFS, FC, and RSM) application in the future showed negative and little differences (-0.5~+1.6%) for SS and T-N reduction efficiencies while T-P reduction efficiency showed +0.3~+7.6% comparing with the baseline period. To achieve an increase in the reduction efficiency of future SS and T-N by +2~+10%, the combined application of more than two BMPs is necessary.

Keywords: SWAT; RCP scenarios; climate change; highland agriculture; BMPs; NPS pollution

1. 서 론

한국 농업은 자연생태계와 조화를 이룬 환경 친화적 농법이었지만 90년대부터 농업 생산성 증가를 위한 토지이용변화에 따른 토양유실, 하천생태계의 파괴, 호소의 부영양화, 산지 훼손 등의 역기능을 초래하고 있다. 특히 고랭지 농업은 지형, 기후적 요인, 영농관리 방법 등으로 인하여 하천 오염에 심각한 영향을 주고 있다 (Park, 2006). 고랭지 지역은 경사가 심하고 표고가 400 m 이상으로 높은 곳에 위치하고 있으며 강수량이 여름 (6월~9월)에 집중되는 몬순기후에 속한다. 고랭지 작물은 생육기간이 60~70일 정도인 콩, 무, 배추, 감자 등 단경기 작물을 재배하고 7~10월에 수확하게 된다. 이 시기는 장마철과 집중호우로 강우시 토양유실이 발생하여 과다한 토

사가 하천으로 유입되며, 비료와 객토 사용 등 고랭지 농업유역의 탁수 및 수질오염 문제가 가중되어 발생한다. 고랭지농업유역에서 발생하는 수문 및 수질은 지구온난화에 의한 기후 패턴에도 많은 영향을 받으며, 기후변화로 인한 기온과 강수량의 크기에 따라 유출뿐만 아니라 토양수분과 증발산량에 영향을 미치게 되어 수문 및 수질의 변화가 예상된다.

고랭지 농업 유역에서 발생하는 유사 및 비점오염원을 효과적으로 저감 시킬 수 있는 방법으로 최적관리기법이 있다 (Zhen et al. 2004). 최적관리기법은 비구조적인 방법과 구조적인 방법으로 구분된다. 비구조적인 방법으로는 비료사용량, 볏짚피복, 무경운 등 영농 관리를 말하며 구조적인 방법으로는 식생여과대, 초생수로, 침사지 등 오염 저감 시설물의 설치를 말한다. 다양한 최적관리기법 중 고랭지 농업유역에서 적용 가능한 방안을 도출할 필요가 있으며, 최적관리기법 적용 시 비점오염 저감 효율을 정량화 할 필요가 있다. 그러나 농경지의 작물, 토성, 지역 환경 등 적용 대상이나 범위에 따라 각각 실험 할 수 없고, 정량적인 부분을 규명하기 어렵기 때문에 수학적 모형에 의존해야 한다 (Arabi et al. 2007). SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 모형은 경작지 대상으로 작물재배방법 및 비료살포 등 영농 조건을 고려하는 기능이 포함되어 있고 수문·수질 모의가 가능한 모형이다.

* Institutes of Green Bio Science and Technology, Seoul National University

** Professor, Department of Civil and Environmental System Engineering, Konkuk University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-444-0186 Fax: +82-2-444-0186

E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

Received: March 31, 2016

Revised: July 5, 2018

Accepted: July 5, 2018

모형을 이용한 최적관리기법에 따른 비점오염원 저감 분석의 국내 연구동향을 살펴보면, Park et al. (2008)은 식생여과대 폭만을 고려하는 SWAT모형의 식생여과대 유사저감 효과 모듈을 보완하였고, Park et al. (2010)은 경안천 상류의 산림유역과 도시유역에 대하여 비점오염원 저감 방안을 제시하고자 BMPs(수변완충지대, 식생여과대, 토양유실방지책)에 따른 비점오염 제거 효율을 분석하였다. Lee et al. (2010)은 QuickBird 고해상도 위성 영상을 사용하여 세분화된 토지이용도 중 농작물에 각각 비료를 살포하여 BMPs에 따른 비점오염원 저감을 평가하였으며, Lee et al. (2011)은 양구 해안면 만대천 유역을 대상으로 식생여과대 적용에 따른 T-P에 대한 수질개선 효과를 분석하였다. Jung et al. (2013)은 SWAT과 HSPF 모형을 사용하여 BMPs(벚꽃피복)에 의한 시단위 비점오염원 저감효과를 비교분석하였고, Park et al. (2014)은 골지천 유역을 대상으로 BMPs(식생여과대) 적용에 따른 수질개선효과를 분석하였으며, Jang et al. (2015)은 경안천 상류유역을 대상으로 BMPs(무경운)에 의한 시단위 비점오염원 저감효과를 분석하였다.

국외에서는, Narasimhan et al. (2007)은 침식으로 인한 하천에서 유사 및 영양물질의 발생을 파악하였고 BMPs에 따른 비점오염원 저감에 대하여 모의 하였으며, Chu et al. (2005)는 메릴랜드 유역 3.5 km²을 대상으로 BMPs (경운, 무경운)를 적용하여 실제적인 효과를 증명하였다. Parajuli et al. (2008)은 미국 Kansas에 위치한 Wakarusa 유역 950 km²을 대상으로 BMPs(식생여과대)에 따른 유사 저감효과를 분석하였다. Liu et al. (2013)은 중국 Xingshan에 위치한 Xiangxi 강 유역 3,099 km²을 대상으로 BMPs(무경운, 등고선경작)을 적용하여 저감효과를 평가하였으며, T-N과 T-P의 저감율은 각각 8~9%, 5~7%로 분석되었다.

한편, 기후변화에 따른 수문 및 수질 평가와 최적관리기법에 따른 비점오염원 저감 분석에 대한 연구는 많이 수행되었으나, 기후변화에 따른 최적관리기법을 평가한 연구는 국내 외적으로 많이 부족한 실정이다. 기후변화에 따른 최적관리기법을 평가한 연구동향을 살펴보면, Chiang et al. (2012)은 기후변화와 토지이용변화에 따른 BMPs (방목, 식생여과대, 영양)를 평가하였으며, Van Liew et al. (2012)는 SRES A2, A1B, B1 기후변화 시나리오와 BMPs (무경운, 식생여과대, 계단식농업)에 따른 비점오염원 저감효과를 분석하였다.

이처럼 농업유역에서 발생하는 비점오염원을 저감하기 위해 최적관리기법이 제시되어 왔다 (Gitau et al. 2004). 그러나 일반 농업유역에 비해 고랭지 농업유역에서 발생하는 비점오염원은 지형, 기후 및 농업 관리 방법 (과다한 객토 및 비료)에 큰 영향이 있고, 기후변화에 따른 수문변화는 수질에 영향을

미치기 때문에 기후변화조건하에서 고랭지 농업 유역 특성을 고려한 최적관리기법을 제시할 필요가 있다. Jang et al. (2017)은 SWAT모형을 이용하여 고랭지농업유역에서의 기후변화에 따른 수문 및 수질을 평가하였으며, 이를 이용하여 본 연구에서는 기후변화에 따른 비점오염원 저감을 위한 최적관리기법을 평가하고자 한다.

II. 자료 및 방법

1. 대상유역

본 연구의 대상유역은 강원도 양구군 해안면에 위치한 해안유역을 선정하였다 (Fig. 1). 해안유역은 대표적인 고랭지농업유역이며, 고랭지 작물의 수요가 증가함에 따라 개간을 통해 고랭지 작물 재배면적이 지속적으로 확장되고 있다. 강우가 집중되는 여름철에는 무분별한 객토 사용 증가로 인해 토양유실이 심각하게 발생되어 소양호로 상당량의 유사가 매년 유입되고 있다. 해안유역의 유역면적은 62.8 km²이며, 유역평균표고는 1,276 m, 유역평균경사는 34.9%이다. 산림 면적은 35.7 km²로 유역의 56.9%이며, 농업유역의 면적은 17.9 km²로 28.5%이다. 농업작물은 고랭지작물이 6.5 km², 일반작물이 11.0 km²에 해당된다. 30년 평균 강우량은 1,298.7 mm 이며, 기온은 9.5 °C이다.

SWAT 모형의 지형자료 중 DEM (Digital Elevation Model)은 NGIS (National Geographic Information System)은 1/5,000 수치지도로부터 검수과정을 거쳐 격자크기 30m로 제작하였다. 토양도, 토지이용도는 Terreco (Complex Terrain and Ecological Heterogeneity) 프로젝트에서 제공받았으며, Terreco는 한국과 독일 간의 산지복잡지형에서의 기후, 수문, 토양 과정의 상호연관성을 연구하는 프로젝트이다 (Kang et al. 2010). 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1/25,000 정밀토양도를 기반으로 Terreco 사업이 2009년 현장 조사에서 도출된 자료를 토대로 미국 NRCS (The U.S. Natural Resource Conservation Service formerly the Soil Conservation Service) 토양분류 기준 (Soil Survey Staff, 1996)에 따른 수문학적 토양그룹 (Hydrologic Soil Group) A, B, C, D와 토성 (Soil texture)을 분류하였다. 토양성분은 sandy loam 60%, silty sand 27%, sand 10%로 구성되어있으며, Shope et al. (2014)에서 해안유역 토양도의 자세한 정보를 볼 수 있다. 토지이용도는 Terreco 사업에서 2009년에 현장측량을 통해 토지이용항목을 산림, 주거, 농경지 등 17개로 세분화하여 분류한 자료를 이용하였다 (Fig. 2(a)). Fig. 2(b)는 농경지를 고랭지작물과, 밭작물로 구분하였다. 해안유역에서 농경지의 면적은 전체면적의 20.6%에 해당

하며, 고랭지 작물의 면적 비율은 감자 2.6%, 배추 1.1%, 콩 2.3%, 무 1.9%이다. Seo et al. (2014)에서 해안유역 토지이용도에 대한 자세한 정보를 볼 수 있다.

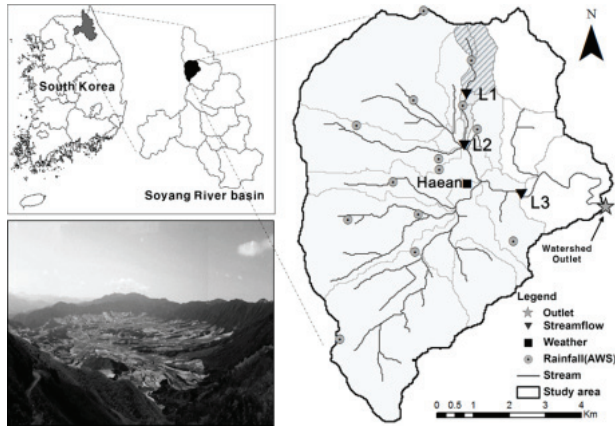


Fig. 1 Location of the Haeon watershed and observation stations

고랭지 밭은 연작으로 인한 지력 저하와 표토 유실 등으로 악화된 토질 보전을 위해 주기적으로 객토와 과도한 비료가 실시된다. 객토된 토양은 토양구조가 흐트러진 상태이며, 보비력과 보수력이 낮기 때문에 강수에 따른 유출로 인하여 쉽게 유실된다. 토양유실로 인한 오염물질은 수계나 지하수로 유입되어 탁수 및 수질오염의 주 원인이 된다. Park (2006)에 따르면 소양강 유역 고랭지 밭의 객토 종류는 화강암풍화토이며, 용적밀도는 1.3 g/cm^3 , 객토 높이는 30 cm이다.

고랭지농업의 비료량은 일반 농업의 비료량보다 과다하게 사용되기 때문에 수질에 큰 영향을 미친다. 보다 신뢰성 있는 수질 검·보정을 위해 양구군 해안면 현지 농업인을 대상으

로 비료량을 조사하여 SWAT 모형의 입력 자료로 활용하였다. 조사 항목으로는 비료 종류, 비료 양, 비료 살포 기간, 작물 생육단계별기간, 수확기간이며 고랭지작물인 감자, 배추, 콩, 무에 대해 작물별로 조사하였다. Table 1은 농업인을 대상으로 조사한 비료 자료이다.

Table 1 The investigated data of fertilizer for highland crops

Crop	Fertilizer (kg/ha)		Fertilizer Date	Planted Date	Harvest Date
	N	P			
Potato	330	180	Apr. 27	Apr. 29	Aug. 29
Cabbage	360	91	May. 11	May. 15	Jul. 15
Soybean	345	30	May. 25	May. 29	Oct. 20
Radish	490	120	Apr. 27	Jun. 1	Sep. 5

2. 기후변화 시나리오

IPCC 5차보고서에서 온실가스와 에어로솔 등의 영향뿐만 아니라 인간 활동이 대기에 미치는 요인을 다룬 온실가스의 대표농도 경로 (RCP)에 따른 기후변화 시나리오 자료를 사용하였다. RCP 시나리오는 SRES 기후변화 시나리오의 노후화 및 해상도 문제를 보완하고 정확도 향상 및 다양한 분야에서 활용할 수 있는 새로운 시나리오의 필요성에 의해 개발되었으며, 복사강제력 (radiative forcing)에 따라 4개의 시나리오 (8.5, 6.0, 4.5, 2.6)로 구분된다.

모든 전지구기후모델 (GCM, Global Climate Model)의 자료는 Earth System Grid Federation (ESGF, <http://pcmdi9.llnl.gov/esgfwebfe/>)을 통해 제공되고 있으며, ESGF에서 수집된 33개 GCM 자료 (강수량, 최고기온, 최저기온, 평균풍속, 상대습도, 일사량)와 기상청에서 HadGEM2-AO 전지구기후

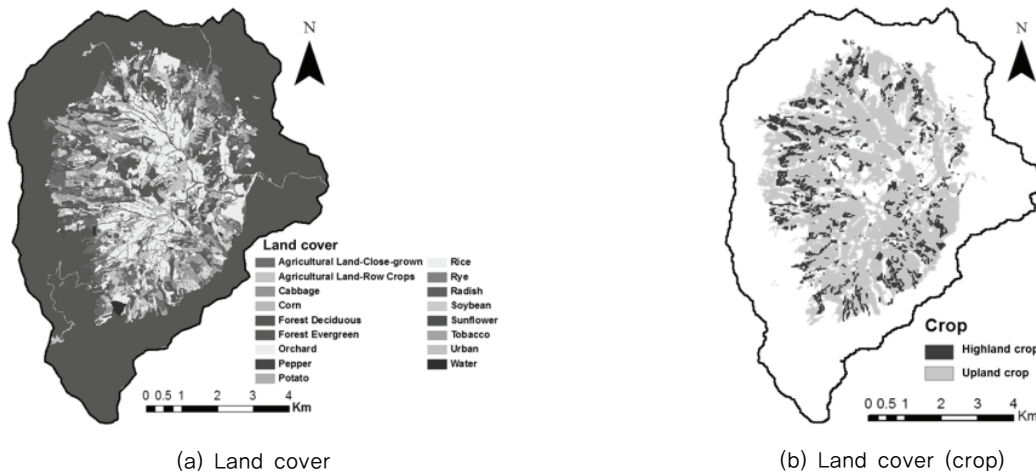


Fig. 2 Detailed land cover of the Haeon watershed

모델 결과를 지역기후모델 (Regional Climate Model, RCM)인 HadGEM3-RA 모형을 이용하여 역학적 상세화 과정을 거쳐 12.5 km 격자크기로 제공하고 있는 국가 기후변화 시나리오 1개를 포함하여 총 34개의 기후변화 자료를 사용하였다 (Cho, 2013).

기후모형의 결과물을 연구에 사용할 때에는 신뢰성을 높이기 위하여 기후모형 결과를 현재 관측된 자료와 비교하여 확인하는 과정이 필요하다 (Carter et al. 1999). 따라서 본 연구에서는 과거 (1981~2005년, Observed) 기상자료와 Historical (1981~2005년), RCP4.5와 8.5 시나리오 자료 (2006~2010년)를 대상으로 유역규모의 기후변화 시나리오를 작성하기 위해 공간적 상세화 과정과 편의보정을 동시에 할 수 있도록 분위 사상법 (Quantile Mapping)을 적용하여 GCM 격자내에 존재하는 모든 기상청 관측소 (76개소)를 대상으로 보정된 자료를 제공받았다 (Cho, 2013). RCP 기후변화 시나리오의 편이보정 및 상세화 과정은 Cho (2013)에 자세히 언급되어 있다.

상세화 및 편이보정 결과를 이용하여 Historical의 기간은 1981~2005년이며, 미래 분석기간은 2040s (2021~2060년), 2080s (2061~2100년) 두 기간으로 설정하여 분석하였다. 연별 강수량 변화는 RCP4.5의 2040s와 2080s는 각각 -3.7%, +8.3%이며, RCP8.5의 2040s와 2080s는 각각 -4.4%, +1.8%의 변화를 보였다.

3. 최적관리기법 시나리오

고령지농업유역에서 발생하는 비점오염원의 저감효율을 평가하기 위해 최적관리기법을 이용하였다. 고령지농업유역에서 비점오염물질 발생을 억제하기 위하여 관리를 통한 억제(비료, 등고선 재배 등) 식생을 통한 억제(작물피복, 식생여과대, 수변 완충지역 등), 구조적 억제(계단식 경작, 우회수로 등)방법을 병행하여야하며, 본 연구에서 적용한 최적관리기법은 식생여과대, 비료제어, 벧짚피복이다. 식생여과대는 강우에 의한 침식우려지역에 대해서 토양이 안정되도록 하고, 지표유출이 식생여과대를 통과할 때 유속을 감소시키는 작용을 하며 경작지에서 유실된 토양을 여과, 흡착, 침전시켜 비점오염 물질을 제거한다. 비료제어는 농업관리를 통한 유출내 비점오염원 물질 부하 저감 방법으로 가장 기본적인 방법이다. 유역내 토지에 대한 비료 살포를 최소화함으로써 발생원에서의 오염물질을 감소시키는 것이다. 살포되는 비료량을 감소시키면 작물의 성장과 수확량에 영향을 미치는 단점이 있다. 벧짚피복은 물꼬에 벧짚을 덮는 방법이다. 지면을 덮는 벧짚피복은 강우가 발생하였을 때 지면에 떨어지는 강우의 충격력을 완화하고, 토립자의 이탈을 막아주며 토양으로 침투되는 침투능을 유지시킨다. 또한 지표유출의 유속을 감소

시켜 유사 운반능력을 낮추며, 세류 발생을 억제하여 토양유실 및 유사 발생을 억제한다 (Jang, 2016).

SWAT모형에서 식생여과대는 HRU에서 정의되며, 저감효율 분석은 유사 저감효율을 기반으로 하며 저감효율 산정 방법은 식 (1)과 같다.

$$T_{rapef} = 0.367 \times (Width_{filtstrip})^{0.2967} \quad (1)$$

여기서 T_{rapef} : 유사저감효율, $Width_{filtstrip}$: 초생대 폭(m)

벧짚피복에 따른 비점오염원 저감 효과를 검증하기 위해서 시험포장에 벧짚매트를 설치하여 비점오염원 저감 효과를 검증하였다. 밭의 면적은 1,276.6 m²이며, 경사도는 3.2%로 객토와 정지작업을 수행하여 조성한 시험포이다. 시험포장 밭에서 벧짚피복 전 콩을 재배하면서 모니터링 한 자료 (2008~2009년)와 벧짚피복 후 모니터링 한 자료 (2010~2011년)를 비교하여 비점오염원 저감효과를 조사하였다. 그 결과 벧짚피복 전보다 벧짚피복 후에 지표유출 저감이 평균 10% 저감되었다. 포장시험 결과를 기반으로 벧짚피복을 모의하기 위해 지표유출이 6%, 12%, 17% 저감되는 기준을 매개변수 CN2를 이용하여 분석하였다 (Jung et al. 2013, NIER. 2010).

최적관리기법에 따른 비점오염원 저감효율을 분석하기 위해 고령지작물인 감자, 배추, 콩, 무를 대상으로 토지이용도를 이용하여 SWAT 모형에 적용하였다. 식생여과대 (VFS)는 식생여과대 폭 매개변수 (FILTERW.mgt)를 이용하였으며, 비료제어 (FC)는 .mgt에서 비료 N과 P의 입력자료를 변화하여 적용하였다. 벧짚피복은 포장시험의 실험 결과를 토대로 지표유출을 저감시키는 매개변수 (CN2.mgt)를 이용하였다. CN2는 평균수분 상태일때의 수문학적 곡선번호로서 CN2의 값이 감소할수록 유량이 감소하는 특성을 갖는다. CN2의 값이 2, 4, 6 감소함에 따라 지표유출이 6, 12, 17% 저감하였다.

Table 2는 본 연구에서 적용한 13개의 BMP 시나리오의 정보를 나타낸다. 시나리오 1~3은 식생여과대 폭에 따라 적용하였으며 1 m (VFS1), 3 m (VFS3), 5 m (VFS5)이다. 시나리오 4~6은 비료의 양을 저감시켜 적용하였으며 비료 저감에 따라 10% (FC10), 20% (FC20), 30% (FC30)를 나타낸다. 시나리오 7~9는 벧짚피복을 적용하였으며, 지표유출 저감에 따라 6% (RSM6), 12% (RSM12), 17% (RSM17)이다. 시나리오 10~13은 세 개의 최적관리기법을 조합하였다. 시나리오 10은 VFS3+FC20, 시나리오 11은 FC20+RSM12, 시나리오 12는 VFS3+RSM12, 시나리오 13은 VFS3+FC20+RSM12이다.

Table 2 Description of the 13 BMP scenarios

BMP scenarios	Description	Where and how implemented in SWAT	Function
VFS1	1 m filter strip width	FILTERW: 1 (.mgt)	Trapping sediments and nutrients
VFS3	3 m filter strip width	FILTERW: 3 (.mgt)	
VFS5	5 m filter strip width	FILTERW: 5 (.mgt)	
FC10	10% reducing of N and P inputs	N and P: -10% (.mgt)	Reducing N and P inputs
FC20	20% reducing of N and P inputs	N and P: -20% (.mgt)	
FC30	30% reducing of N and P inputs	N and P: -30% (.mgt)	
RSM6	6% reducing surface runoff	CN: -2 (.mgt)	Reducing surface runoff
RSM12	12% reducing surface runoff	CN: -4 (.mgt)	
RSM17	17% reducing surface runoff	CN: -6 (.mgt)	
Combined	VFS3+FC20 FC20+RSM12 VFS3+RSM12 VFS3+FC20+RSM12	-	-

VFS: vegetation filter strip, FC: fertilizer control, RSM: rice straw mulching
 FILTERW: filter strip width, CN: SCS-CN

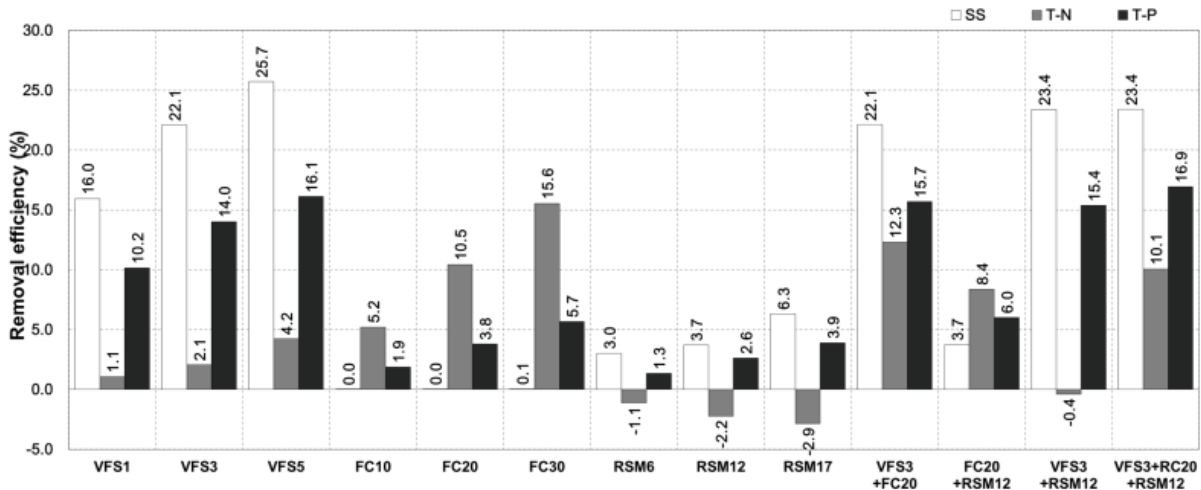


Fig. 3 Observed (2009~2011) results for the NPS pollution removal efficiency by 13 BMP scenarios

III. 결과 및 고찰

1. 최적관리기법에 따른 비점오염원 저감효율

Fig. 3은 과거 실측 (Observed, 2009~2011) 기간에 대해서 13개의 BMP 시나리오에 따른 비점오염원 저감효율이다. VFS는 SS, T-N, T-P가 각각 16.0~25.7%, 1.1~4.2%, 10.2~16.1%의 저감효율을 보였고, 식생여과대의 폭이 증가할수록 저감효율이 높았으며 SS, T-P, T-N 순으로 높았다.

FC(비료량 조절)는 SS, T-N, T-P의 저감효율이 각각 0.0~0.1%, 5.2~15.6%, 1.9~5.7%이며, 비료의 양을 줄일수록 T-N과 T-P의 저감효율이 증가하였다. 반면 SS는 비료량만의 조

절이므로 저감없이 일정한 것으로 분석되었다.

RSM(볏짚피복)은 SS, T-N, T-P의 저감효율이 각각 3.0~6.3%, -2.9~-1.1%, 1.3~3.9%이다. 지표유출이 저감될수록 SS와 T-P의 저감효율은 증가하였으나, T-N은 저감이 되지 않고 증가한다. 이는 지표유출이 감소되는 양 만큼 질소성분들이 토양으로 용해되어 이동하는 양이 증가하여, 지표하 및 지하수 유출을 통한 이동량의 증가로 저감효과가 나타나지 않는 것으로 판단된다.

VFS3+FC20의 SS, T-N, T-P는 각각 22.1%, 12.3%, 15.7% 저감효율을 보였으며, FC20+RSM12에서 SS, T-N, T-P는 각각 3.6%, 8.4%, 6.0% 저감효율이 나타났다. VFS3+RSM12의

SS, T-N, T-P 저감효율은 각각 23.3%, -0.4%, 15.4%이며, VFS3+FC20+RSM12에서 SS, T-N, T-P는 각각 23.3%, 10.1%, 17.0%로 높은 저감효율이 나타나는 것으로 분석되었다. 단일로 BMP를 적용했을 때 보다 2개 이상 조합하였을 때 SS, T-N, T-P 모두 높은 저감효율을 보였으며, 벧짚피복만 시행했을 때의 T-N이 증가되는 것을 상쇄시키는 효과가 나타났다.

2. 미래기후변화에 따른 최적관리기법 영향평가

기후변화 조건하에서 비점오염원 저감을 위해 최적관리기법 영향평가는 수문 및 수질 분석과 동일하게 Historical, RCP4.5 (2040s, 2080s), RCP8.5 (2040s, 2080s)로 분석하였다. Fig. 4와 Fig. 5는 각각 2040s, 2080s에 대하여 최적관리기법에 따른 비점오염원 평균 저감효율이며, Table 3은 RCP 기후변화 시나리오와 BMP 시나리오에 따른 비점오염원 평균 저감효율과 과거와 미래의 저감효율 차이를 비교하였다.

먼저 SS를 살펴보면, VFS 저감효율의 경우 과거보다 미래가 -0.7~-0.1% 차이가 나타났으며, VFS5의 RCP8.5 2040s에서 -0.7% 차이로 가장 큰 차이를 보였다. 또한 식생여과대 폭이 넓어질수록 과거보다 미래의 저감효율이 0.1~0.2% 작게 나타났다. FC의 저감효율의 경우 과거와 미래의 저감효율은 RCP8.5 2040s와 RCP4.5 2080s에서 -0.1~+0.2% 차이를 제외하고 변화가 없었다. RSM 저감효율은 -1.6~+0.2%의 차이로 대부분 미래의 저감효율이 과거보다 적었다. RSM17의 RCP4.5 2080s에서 -1.6% 차이로 가장 큰 차이를 보였으며 지표유출이 저감될수록 저감효율이 -0.3~-0.5%작게 나타났다. VFS3+FC20의 경우 과거 저감효율보다 미래의 저감효율이 -0.5~-0.1%차이를 보였고, FC20+RSM12의 경우 먼 미래(2080s)에서 -1.2~-0.2% 차이를 제외하고 변화가 없었다. RSM12+VFS3은 -1.0~-0.2% 차이를 보였으며, VFS3+FC20+RSM12는 -1.0~-0.6% 차이로 나타났다. BMP 조합시나리오 경우 RCP4.5 2080s와 RCP8.5 2040s에서 각각 -0.6~+0.0%,

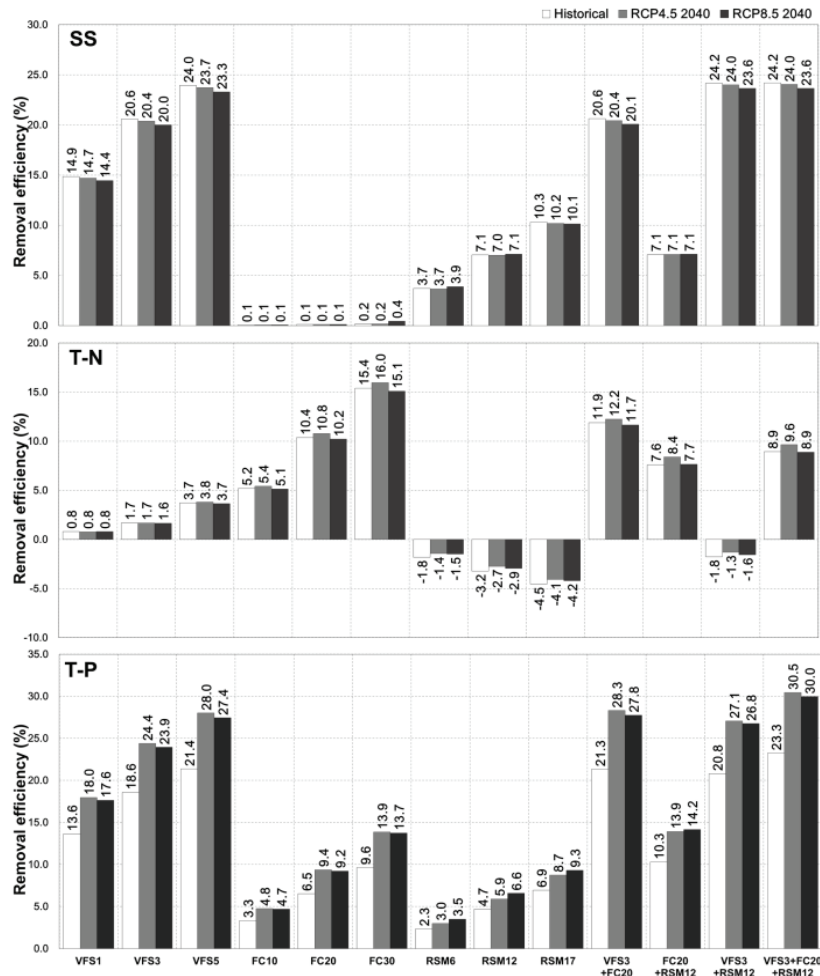


Fig. 4 The NPS pollution average removal efficiency by 13 BMP scenarios (2040s)

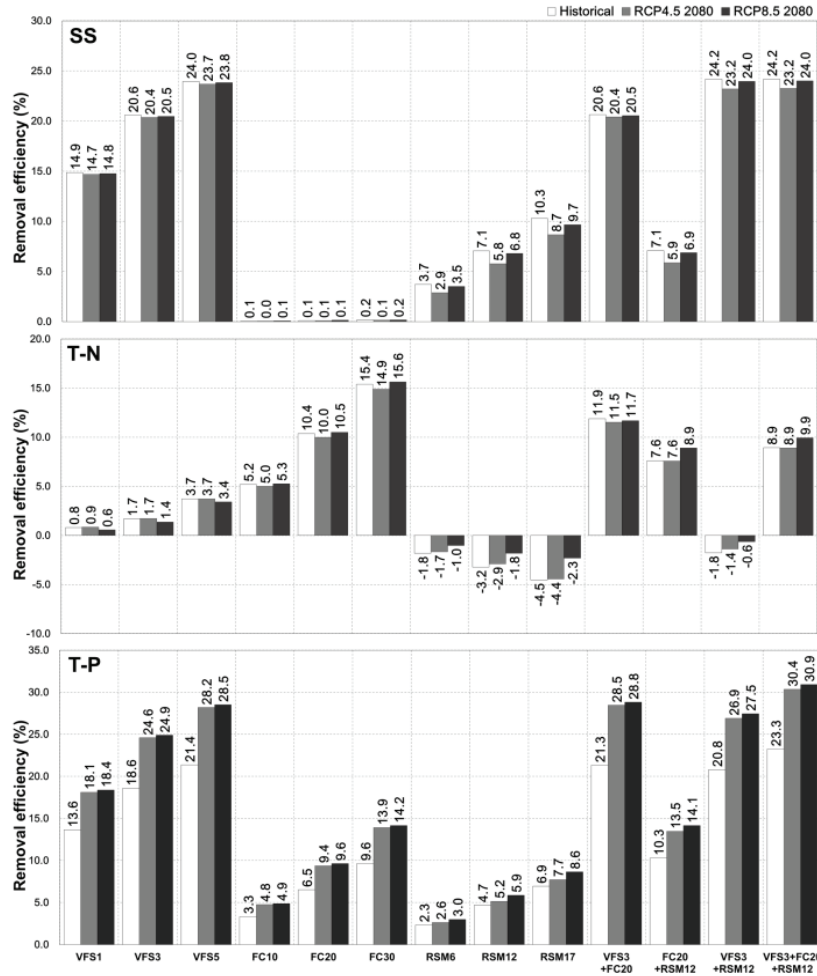


Fig. 5 The NPS pollution average removal efficiency by 13 BMP scenarios (2080s)

-1.2~-0.2%로 가장 큰 차이를 보였다.

T-N의 과거와 미래의 저감효율을 살펴보면, VFS의 경우 RCP8.5 2080s에서 -0.3~-0.2%의 차이를 제외하고 -0.1~+0.1%의 차이로 과거와 미래의 저감효율이 비슷하게 나타났다. FC의 경우 RCP4.5 2040s와 RCP8.5 2080s는 각각 +0.2~+0.6% 차이로 증가하였으며, RCP8.5 2040s와 RCP4.5 2080s는 각각 -0.3~-0.1%, -0.5~-0.2% 차이로 감소하였다. RSM의 경우 +0.1~+2.2%의 차이로 과거보다 미래의 저감효율이 증가하였으며, RCP8.5 2080s에서 +0.8~+2.2%의 차이로 가장 큰 차이를 보였으며 지표유출이 감소할수록 저감효율 차이도 증가하였다. VFS3+FC20의 경우 RCP4.5 2040s에서 과거보다 저감효율이 +0.3% 증가하는 것을 제외하고 -0.4~-0.2%의 차이로 감소하였다. FC20+RSM12의 경우 +0.0~+1.3% 차이로 대부분 증가하였으며, RCP8.5 2080s는 각각 +1.3% 차이로 가장 큰 차이를 보였다. RSM12+VFS3은 +0.2~+1.2% 차이로 증가하였으며, VFS3+FC20+RSM12는 +0.0~+1.0% 차이로

증가하는 것으로 나타났다.

마지막으로 T-P의 과거와 미래의 저감효율을 살펴보면, 모든 최적관리기법 시나리오와 기후변화 시나리오에서 미래의 저감효율이 과거보다 증가하였다. VFS의 경우 4.0~7.1% 증가, FC는 1.4~4.6% 증가, RSM은 0.7~2.4% 증가하였다. VFS3+FC20의 경우 6.5~7.5%, FC20+RSM12는 +3.2~+3.9%, RSM12+VFS3은 +6.1~+6.7%, VFS3+FC20+RSM12는 +6.7~+7.6% 차이로 증가하는 것으로 나타났다.

미래기후변화 조건하에서 비점오염원 저감을 위한 최적관리기법 평가를 종합해보면, 가까운 미래 (2040s)에서는 CO₂ 배출 농도가 상대적으로 작은 RCP4.5 시나리오에서 저감효율이 높았으며, 먼 미래 (2080s)에서는 CO₂ 배출 농도가 높은 RCP8.5 시나리오에서 저감효율이 높게 나타났다. 기온과 강수량의 증가로 미래 비점오염원 유출량이 변함에 따라 비점오염원 저감 효율에 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

Table 3 Summary of removal efficiency in NPS pollution loads by 13 BMP scenarios
(values in parenthesis indicates the removal efficiency difference based on historical)

BMPs	HIS	Removal efficiency (%)								
		2040s				2080s				
		RCP4.5		RCP8.5		RCP4.5		RCP8.5		
SS	VFS1	14.9	14.7	(-0.2)	14.4	(-0.5)	14.7	(-0.2)	14.8	(-0.1)
	VFS3	20.6	20.4	(-0.2)	20.0	(-0.6)	20.4	(-0.2)	20.5	(-0.1)
	VFS5	24.0	23.7	(-0.3)	23.3	(-0.7)	23.7	(-0.3)	23.8	(-0.2)
	FC10	0.1	0.1	(+0.0)	0.1	(+0.0)	0.0	(-0.1)	0.1	(+0.0)
	FC20	0.1	0.1	(+0.0)	0.1	(+0.0)	0.1	(+0.0)	0.1	(+0.0)
	FC30	0.2	0.2	(+0.0)	0.4	(+0.2)	0.1	(-0.1)	0.2	(+0.0)
	RSM6	3.7	3.7	(+0.0)	3.9	(+0.2)	2.9	(-0.8)	3.5	(-0.2)
	RSM12	7.1	7.0	(-0.1)	7.1	(+0.0)	5.8	(-1.3)	6.8	(-0.3)
	RSM17	10.3	10.2	(-0.1)	10.1	(-0.2)	8.7	(-1.6)	9.7	(-0.6)
	VFS3+FC20	20.6	20.4	(-0.2)	20.1	(-0.5)	20.4	(-0.2)	20.5	(-0.1)
	FC20+RSM12	7.1	7.1	(+0.0)	7.1	(+0.0)	5.9	(-1.2)	6.9	(-0.2)
	RSM12+VFS3	24.2	24.0	(-0.2)	23.6	(-0.6)	23.2	(-1.0)	24.0	(-0.2)
	VFS3+FC20+RSM12	24.2	24.0	(-0.2)	23.6	(-0.6)	23.2	(-1.0)	24.0	(-0.2)
T-N	VFS1	0.8	0.8	(+0.0)	0.8	(+0.0)	0.9	(+0.1)	0.6	(-0.2)
	VFS3	1.7	1.7	(+0.0)	1.6	(-0.1)	1.7	(+0.0)	1.4	(-0.3)
	VFS5	3.7	3.8	(+0.1)	3.7	(+0.0)	3.7	(+0.0)	3.4	(-0.3)
	FC10	5.2	5.4	(+0.2)	5.1	(-0.1)	5.0	(-0.2)	5.3	(+0.1)
	FC20	10.4	10.8	(+0.4)	10.2	(-0.2)	10.0	(-0.4)	10.5	(+0.1)
	FC30	15.4	16.0	(+0.6)	15.1	(-0.3)	14.9	(-0.5)	15.6	(+0.2)
	RSM6	-1.8	-1.4	(+0.4)	-1.5	(+0.3)	-1.7	(+0.1)	-1.0	(+0.8)
	RSM12	-3.2	-2.7	(+0.5)	-2.9	(+0.3)	-2.9	(+0.3)	-1.8	(+1.4)
	RSM17	-4.5	-4.1	(+0.4)	-4.2	(+0.3)	-4.4	(+0.1)	-2.3	(+2.2)
	VFS3+FC20	11.9	12.2	(+0.3)	11.7	(-0.2)	11.5	(-0.4)	11.7	(-0.2)
	FC20+RSM12	7.6	8.4	(+0.8)	7.7	(+0.1)	7.6	(+0.0)	8.9	(+1.3)
	RSM12+VFS3	-1.8	-1.3	(+0.5)	-1.6	(+0.2)	-1.4	(+0.4)	-0.6	(+1.2)
	VFS3+FC20+RSM12	8.9	9.6	(+0.7)	8.9	(+0.0)	8.9	(+0.0)	9.9	(+1.0)
T-P	VFS1	13.6	18.0	(+4.4)	17.6	(+4.0)	18.1	(+4.5)	18.4	(+4.8)
	VFS3	18.6	24.4	(+5.8)	23.9	(+5.3)	24.6	(+6.0)	24.9	(+6.3)
	VFS5	21.4	28.0	(+6.6)	27.4	(+6.0)	28.2	(+6.8)	28.5	(+7.1)
	FC10	3.3	4.8	(+1.5)	4.7	(+1.4)	4.8	(+1.5)	4.9	(+1.6)
	FC20	6.5	9.4	(+2.9)	9.2	(+2.7)	9.4	(+2.9)	9.6	(+3.1)
	FC30	9.6	13.9	(+4.3)	13.7	(+4.1)	13.9	(+4.3)	14.2	(+4.6)
	RSM6	2.3	3.0	(+0.7)	3.5	(+1.2)	2.6	(+0.3)	3.0	(+0.7)
	RSM12	4.7	5.9	(+1.2)	6.6	(+1.9)	5.2	(+0.5)	5.9	(+1.2)
	RSM17	6.9	8.7	(+1.8)	9.3	(+2.4)	7.7	(+0.8)	8.6	(+1.7)
	VFS3+FC20	21.3	28.3	(+7.0)	27.8	(+6.5)	28.5	(+7.2)	28.8	(+7.5)
	FC20+RSM12	10.3	13.9	(+3.6)	14.2	(+3.9)	13.5	(+3.2)	14.1	(+3.8)
	RSM12+VFS3	20.8	27.1	(+6.3)	26.8	(+6.0)	26.9	(+6.1)	27.5	(+6.7)
	VFS3+FC20+RSM12	23.3	30.5	(+7.2)	30.0	(+6.7)	30.4	(+7.1)	30.9	(+7.6)

HIS: Historical (1981~2005), 2040s: 2021~2060, 2080s: 2061~2100
VFS: vegetation filter strip, FC: fertilizer control, RSM: rice straw mulching

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 해안유역의 고랭지농업유역 특성을 고려하여 기후변화 조건하에서 비점오염원 저감을 위한 최적관리기법 (식생여과대, 비료제어, 벧짚피복)을 평가하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 최적관리기법으로 식생여과대 (VFS), 비료제어 (FC), 벧짚피복 (RSM)을 이용하였으며, 13개의 BMPs 시나리오를 작성하였다.
2. BMPs 시나리오에 따른 현재 (Observed)의 비점오염원 저감효율을 분석한 결과, VFS는 SS와 T-P의 저감효율이 각각 25.7%, 16.1%로 높았으며, 폭이 넓어질수록 저감효율이 증가하였다. FC의 경우 T-N 저감효율이 15.6%로 높았으며, 비료의 양을 줄일수록 저감효율이 증가하였다. RSM의 경우 SS, T-P의 저감효율이 각각 6.3%, 3.9%로 높았으며, 지표유출이 저감될수록 비점오염원의 저감효율이 증가하였다. 조합시나리오 중 VFS3+FC20+RSM12에서 SS, T-N, T-P는 각각 23.3%, 10.1%, 17.0%로 가장 높은 저감효율이 나타났으며, VFS3+FC20의 SS, T-N, T-P는 각각 22.1%, 12.3%, 15.7%으로 비슷한 저감효율이 나타났다. 두 개 이상의 BMPs를 조합하여 적용했을 경우 한 개의 BMPs에서 나타난 수질 요소의 낮은 저감 효율을 높일 수 있었다.
3. 미래 기후변화에 따른 비점오염원 저감효율을 분석한 결과, BMPs 적용에 따른 저감효율 패턴은 Observed와 유사하게 나타났으며, 과거(Historical) 대비 SS와 T-N의 저감효율 차이는 -0.7~+1.6%로 큰 차이가 없었으며, T-P의 경우 +0.3~+7.6%로 저감효율이 증가하였다. 강수량 및 기온의 변화로 인해 농작물 성장에 영향을 미치며 지표에서 유출되는 유출량과, 부유물, 총질소 및 총인의 농도에 영향을 미치며, 특히 T-P가 가장 민감한 것으로 분석되었다.

미래 기후변화에 의해 고랭지 농업유역에서 발생하는 비점오염원을 저감하기 위해서는 최적관리기법 (식생여과대, 비료제어, 벧짚피복)을 이용하여 하천으로 유입되는 오염물질을 제어해야 된다. VFS는 폭이 증가 할수록 경작지 단위 면적이 감소하여 수확량에 영향을 미치고, FC의 양이 줄어들면 작물 성장과 수확량에 영향이 미치기 때문에 단일의 BMPs를 사용하는 것보다 두 개 이상의 BMPs를 사용하여 저감효율을 높일 수 있을 것이다. 저감효율로 따지자면 VFS+FC+RSM, VFS+RC, FC+RSM순으로 비점오염원을 저감시킬 수 있지만, 앞서 언급했듯이 VFS는 경작지 일부를 설치되기 때문에 실현 가능하지 않다. 반면 FC+RSM은 다른 BMP 조합 시나리오보다 비교적 낮은 저감효율을 보였으나 3개의 수질요소에서 저

감효율을 확인할 수 있었으며, 현실적으로 실행 가능하고 효율적으로 비점오염원을 저감 시키는 관리기법이라고 판단된다. 하지만 BMPs 적용으로 발생하는 설치비용과 손해비용에 대한 적절한 보상이 이루어지지 않는다면 높은 저감효과를 가지는 BMPs라 할지라도 시행되기 힘들 것이다. 본 연구의 미래 기후변화에 따른 비점오염원 관리기법의 저감효율은 향후 BMPs의 설치비용과 작물의 수확량 등 경제성 분석에 대한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 연구되었음 (18AWMP-B083066-05).

REFERENCES

1. Arabi M., J. R. Frankenberger, B. A. Engel, J. G. Arnold, 2007. Representation of agricultural conservation practices with SWAT. *Hydrological Processes* 22(16): 3042-3055. doi:10.1002/hyp.6890.
2. Chiang, L. C., I. Chaubey, N. M. Hong, Y. P. Lin, and T. Huang, 2012. Implementation of BMP strategies for adaptation to climate change and land use change in a pasture-dominated watershed. *International journal of environmental research and public health* 9(10): 3654-3684.
3. Chu, T. W., A. Shirmohammadi, H. Montas, L. Abbott, and A. Sadeghi, 2005. Watershed level BMP valuation with SWAT model. *ASAE Annual International Meeting*, ASAE paper No 052098, St Joseph, MI.
4. Gitau, M., T. Veith, W. Gburek, 2004. Farm-level optimization of BMP placement for cost-effective pollution reduction. *Transactions of the ASAE* 47(6), 1923-1931. doi: 10.13031/2013.17805.
5. Jang, S. S., 2016. Assessment of climate change impact on best management practices in highland agricultural district -for haean watershed of Yanggu by SWAT Modeling-. Master's thesis. Konkuk University (in Korean).
6. Jang, S. S., S. R. Ahn, J. D. Choi, and S. J. Kim, 2015. Hourly SWAT watershed modeling for analyzing reduction effect of nonpoint source pollution discharge loads. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(1): 89-97 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2015.57.1.089.
7. Jang, S. S., and S. J. Kim, 2017. Assessment of climate

- change impact on highland agricultural watershed hydrologic cycle and water quality under RCP scenarios using SWAT. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 59(3): 41-50 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2017.59.3.041.
8. Jung, C. G., S. R. Ahn, S. J. Kim, H. J. Yang, H. J. Lee, and G. A. Park, 2013. HSPF and SWAT modelling for identifying runoff reduction effect of nonpoint source pollution by rice straw mulching on upland crops. *Journal of the Korean Society of the Agricultural Engineers* 55(2): 47-57 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2013.55.2.047.
 9. Kang, S. K., and J. Tenhunen, 2010. Complex terrain and ecological heterogeneity (TERRECO): Evaluating ecosystem services in production versus water quantity/ quality in mountainous landscapes. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 12(4): 307-316 (in Korean). doi:10.5532/KJAFM.2010.12.4.307.
 10. Lee, J. W., J. S. Eom, B. C. Kim, W. S. Jang, J. C. Ryu, H. W. Kang, K. S. Kim, and K. J. Lim, 2011. Water quality prediction at mandae watershed using SWAT and water quality improvement with vegetated filter strip. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(1): 37-45 (in Korean). doi:10.5389/KSAE.2011.53.1.037.
 11. Lee, M. S., G. A. Park, M. J. Park, J. Y. Park, J. W. Lee, and S. J. Kim, 2010. Evaluation of non-point source pollution reduction by applying best management practices using a SWAT model and QuickBird high resolution satellite imagery. *Journal of Environmental Sciences* 22(6): 826-833 (in Korean). doi:10.1016/S1001-0742(09)60184-4.
 12. Liu, R., P. Zhang, X. Wang, Y. Chen, and Z. Shen, 2013. Assessment of effects of best management practices on agricultural non-point source pollution in Xiangxi River watershed. *Agricultural water management* 117: 9-18. doi:10.1016/j.agwat.2012.10.018.
 13. Narasimhan, B., P. M. Allen, R. Srinivasan, S. T. Bednarz, J. Arnold, and J. A. Dunbar, 2007. Streambank erosion and best management practice simulation using SWAT. Watershed management to meet water quality standards and TMDLS (Total Maximum Daily Load) Proceedings of the 10-14 March 2007, San Antonio, Texas.
 14. National Institute of Environmental Research (NIER), 2010. A Quantification study on the reduction effect of agricultural non-point source pollution in rural areas (1) (in Korean).
 15. Parajuli, P. B., K. R. Mankin, and P. L. Barnes, 2008. Applicability of targeting vegetative filter strips to abate fecal bacteria and sediment yield using SWAT. *Agricultural water management* 95(10): 1189-1200. doi:10.1016/j.agwat.2008.05.006.
 16. Park, H. K., 2006. Environmental damages and control measures by highland agriculture-atudy on system improvement. master's thesis. Kangwon National University (in Korean).
 17. Park, J. Y., C. G. Jung, I. K. Jung, J. W. Lee, H. J. Shin, and S. J. Kim, 2010. A Study on the reduction of non-point source pollution by applying best management practices using SWAT model. *Korean life environment* 32(2): 59-64 (in Korean).
 18. Park, Y. S., J. G. Kim, N. W. Kim, J. H. Park, W. S. Jang, J. D. Choi, and K. J. Lim, 2008. Improvement of sediment trapping efficiency module in SWAT using VFSMOD-W model. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(4): 473-479 (in Korean).
 19. Park, Y. S., and J. H. Kwon, 2014. Application and effectiveness analysis of SWAT filter strip in golji watershed. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 33(1): 30-36 (in Korean). doi:10.5338/KJEA.2014.33.1.30.
 20. Seo, B., C. Bogner, P. Poppenborg, E. Martin, M. Hoffmeister, M. Jun, T. Koellner, B. Reineking, C. L. Shope, and J. Tenhunen, 2014. Deriving a per-field land use and land cover map in an agricultural mosaic catchment. *Earth System Science Data* 6(2): 339-352 doi:10.5194/essd-6-339-2014.
 21. Shope, C. L., G. R. Maharjan, J. Tenhunen, B. Seo, K. Kim, J. Riley, S. Arnhold, T. Koellner, Y. Ok, and S. Peiffer, 2014. Using the SWAT model to improve process descriptions and define hydrologic partitioning in South Korea. *Hydrology and Earth System Sciences* 18(2): 539-557. doi:10.5194/hess-18-539-2014.
 22. Van Liew, M. W., S. Feng, and T. B. Pathak, 2012. Climate change impacts on streamflow, water quality, and best management practices for the shell and logan creek watersheds in Nebraska. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 5(1): 13-34. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:4(339).
 23. Zhen X. Y., S. L. Yu, J. Y. Lin, 2004. Optimal location and sizing of stormwater basins at watershed scale. *Journal of Water Resources Planning and Management* 130(4): 339-347. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:4(339).