

고랭지 농업의 작물별 객토량 변화에 따른 토양유실 저감 분석

허성구 · 전만식* · 박상현* · 김기성 · 강성근 · 옥용식** · 임경재*†

강원대학교 농업공학부

*강원발전연구원

**강원대학교 자원생물환경학과

Analysis of Soil Erosion Reduction Ratio with Changes in Soil Reconditioning Amount for Highland Agricultural Crops

Sunggu Heo · ManSig Jun* · Sanghun Park* · Ki-sung Kim · SungKeun Kang · YongSik Ok** · Kyoung Jae Lim*†

Division of Agricultural Engineering, Kangwon University

*National Kangwon Development Research Institute

**Department of Biological Environment, Kangwon National University

(Received 19 November 2007, Accepted 26 February 2008)

Abstract

There is increased soil erosion potential at highland agricultural crop fields because of its topographic characteristics and site-specific agricultural management practices performed at these areas. The agricultural upland fields are usually located at the sloping areas, resulting in higher soil loss, pesticides, and nutrients in case of torrential rainfall events or typhoon, such as 2002 Rusa and 2003 MaeMi. At the highland agricultural fields, the soil reconditioning have been performed every year to decrease damage by continuous cropping and pests. Also it has been done to increase crop productivity and soil fertility. The increased amounts of soil used for soil reconditioning are increasing over the years, causing significant impacts on water quality at the receiving water bodies. In this study, the field investigation was done to check soil reconditioning status for potato, carrot, and cabbage at the Doam-dam watershed. With these data obtained from the field investigation, the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model was used to simulate the soil loss reduction with environment-friendly and agronomically enough soil reconditioning. The average soil reconditioning depth for potato was 34.3 cm, 48.3 cm for carrot, and 31.2 cm for cabbage at the Doam-dam watershed. These data were used for SWAT model runs. Before the SWAT simulation, the SWAT ArcView GIS Patch, developed by the Kangwon National University, was applied because of proper simulation of soil erosion and sediment yield at the sloping watershed, such as the Doam-dam watershed. With this patch applied, the Coefficient of Determination (R^2) value was 0.85 and the Nash-Sutcliffe Model Efficiency (EI) was 0.75 for flow calibration. The R^2 value was 0.87 and the EI was 0.85 for flow validation. For sediment simulation, the R^2 value was 0.91 and the EI was 0.70, indicating the SWAT model predicts the soil erosion processes and sediment yield at the Doam-dam watershed. With the calibrated and validated SWAT for the Doam-dam watershed, the soil erosion reduction was investigated for potato, carrot, and cabbage. For potato, around 19.3 cm of soil were over applied to the agricultural field, causing 146% of more soil erosion rate, approximately 33.3 cm, causing 146% of more soil erosion for carrot, and approximately 16.2 cm, causing 44% of more soil erosion. The results obtained in this study showed that excessive soil reconditioning are performed at the highland agricultural fields, causing severe muddy water issues and water quality degradation at the Doam-water watershed. The results can be used to develop soil reconditioning standard policy for various crops at the highland agricultural fields, without causing problems agronomically and environmentally.

keywords : Calibration, Soil and water assessment tool (SWAT), Soil erosion, Soil recondition, Streamflow, SWAT ArcView GIS extension patch, Validation

1. 서론

최근 강원도 하천의 북한강 상류지역인 소양강댐, 의암댐, 청평댐, 그리고 남한강 상류지역인 도암댐은 연일 지속

되는 탁수(흙탕물) 현상으로 인해 사회문제화됨에 따라 정부의 적극적인 대책수립 필요성이 대두되고 있다. 2005년 소양호 저수지는 30 NTU(Nephelometric turbidity unit) 이상의 방류가 년 중 1~2개월 지속되었고 최고 탁도는 79 NTU정도였다. 특히 2006년 소양호 유역의 경우 7월 강수량 832 mm 집중 강우 발생으로 30 NTU 이상의 방류가 7월부터 지속되어 최고 탁도 328 NTU가 발생하여 2007년

* To whom correspondence should be addressed.

kjlim@kangwon.ac.kr

3월까지 약 9개월간 장기 지속되었다(이근상, 2007). 이러한 장기 고 탁수발생으로 댐 하류 생태계변화, 하천이용도 저하, 하류지역 정수처리 비용증가 등의 심각한 문제가 발생하고 있으며 이를 효과적으로 개선하기 위한 대책 토론회 등이 개최되어 탁수발생의 원인 및 대책에 관한 많은 논의가 이루어지고 있다. 특히 고랭지 농경지에서의 탁수 발생 및 비점오염원의 원인으로 과도한 객토, 강우 집중기간 동안 발고량이 나지상태이어서 토양침식을 가중시키며 고랭지 농업의 영농 구조상 기계화 영농을 하기 위하여 발두령을 제거하여 강우를 배제할 수 있는 빗물우회수로와 배수로가 거의 없어 토양유실을 가속화시킨다. 또한 농민이 경작면적을 확장하기 위하여 고랭지 밭과 접한 산지에서 객토용 흙을 채토한 후 이를 밭으로 전용하는 사례 등이 있어 그에 따른 토양유실을 가속화시킨다(강원도, 2005). 그 중 가장 심각한 것이 고랭지 농업의 지형적인 특성상 경사진 지역에 집중되어 있어 강우 및 태풍의 영향 시 타 지역보다 토양유실 발생 가능성이 항시 내포하고 있다. 또한 고랭지 지역의 농경지의 경우 소득 작물에 대한 연작피해 경감, 병해충 방제, 작물의 생산성 극대화, 지력 증진의 이유로 원 지반에 30~50 cm 정도 객토가 이루어지고 있고(전만식과 김범철, 2005), 객토의 양은 농민에 따라서 차이가 커서 전체적인 고랭지 농경지에서의 객토 양을 추정하기에는 사실상 어려운 실정에 있다. 과거에는 엄두도 내지 못했던 객토를 중장비나 농기계의 보급으로 객토가 용이해져 부분별하게 객토가 이루어지고 있는 것만은 사실이다. 또한 객토 토양구조가 흐트러진 상태이기에 강수 발생 시 유출로 인해 상당량이 쉽게 유실되는 경향이 있고, 토양에 흡착된 농약 및 비료 등의 비점오염원들이 수계로 유입 시 수계 내 탁수 및 부영양화의 요인을 발생시킬 수 있으며 기타 토목공사 및 수해로 인한 산사태 발생이 또한 심각한 수(水) 환경문제를 야기시킨다. 이러한 전반적인 탁수 및 수질문제를 해결하기 위한 방안으로 유역에서 발생하는 토양유실량을 정확히 산정하는 것이 필요하다. 하지만 시·공간적으로 변화하는 유역내 토양유실량을 정확하게 추정하며 측정하는 방법은 현실적으로 불가능하여 토양유실에 대한 정확한 측정 및 토양유실에 영향을 미칠 수 있는 제한 인자들을 사전에 현실적으로 파악하여 평가해야 한다(유동선 등, 2007). 지난 40여 년간 우리나라에서 뿐만 아니라 전 세계적으로 Universal Soil Loss Equation(USLE) 모델이 토양유실량 산정에 많이 이용되어 왔으나(김기성 등, 2005), USLE 모델은 장기 토양유실량을 모의할 뿐, 토양유실변화의 시간적 변화를 고려할 수 없는 단점이 있다. 농업 비점원 오염에 의한 수문 순환을 고려한 모델로 공간적인 변이에 따른 모의방법 중 가장 대표적인 Soil and Water Assessment Tool(SWAT) 모델은 대규모 유역에서의 유량 및 비점원 오염을 모의하기 위해 개발된 유역단위 모델로서(Arnold et al., 1993) 준 분포형 매개변수 모델이다. 본 SWAT모델은 장기간에 걸친 기상자료 단위의 모의가 가능하며, 유역내 토양과 토지이용 및 영농 관리 상태에 따라 반응하는 대규모 유역의 수문과 토사유출 및 농업화

학물질 거동에 대한 종합적인 영향을 예측하기 위한 모델이다. 또한 SWAT 모델은 모형의 정확성을 평가하기 위해 모형의 예측 값과 실측값을 이용하여 모형의 보정(Model Calibration) 및 검증(Model Validation) 작업을 통해 모형의 정확성을 평가한다. 이와 같이 Watershed-Scale 모형인 SWAT을 이용하여 허성구 등(2007)은 도암댐 유역내 객토 토양의 특성분석을 통해 SWAT 모형을 적용하여 객토 토양 특성에 따른 토양유실량을 산정하였다. 그 결과 객토 토양특성을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우에 비해 모의 토양유실량이 79% 증가함을 알 수 있었다. 이는 객토가 토양유실에 미치는 영향이 크다는 것을 의미하며, 작물 생산성 향상이라는 명목 아래 부분별하게 이루어지고 있는 객토로 인하여 그 피해의 심각성이 막대함을 알 수 있는 수치이다.

따라서 본 연구의 목적은 객토 토양특성을 고려한 SWAT 모형의 수문 및 유사량 예측 연구 결과를 바탕으로 고랭지 대표작물인 감자, 당근, 배추 작물에 대해 현지 방문 조사를 통한 객토 현황 및 깊이를 분석하여 각 대표 작물별 토양유실량 변화를 예측하였다. 본 연구의 결과는 작물 생산성에 큰 영향을 미치지 않는 친환경적 작물별 객토 기준을 수립하는데 매우 유용할 것이라 판단된다. 향후 경작지-작물별 객토 허가제와 같은 제도를 수립하는데 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 연구방법

2.1. 연구지역 선정

연구 대상지역은 행정구역상 강원도 평창군 대관령면에 속하는 도암댐 유역이다. 대관령면의 면적은 221.6 km², 도암댐 유역면적 145.65 km²으로 대관령면 전체면적의 63.7%를 차지한다. 또한, 도암댐 전체 인구 6,423명으로 북쪽으로는 강릉시 연곡면, 서쪽으로 진부면, 동쪽으로 강릉시 사천면·성산면·왕산면 등과 접한다. 대관령 면적의 76.5%는 산림지역이며 농경지와 초지는 각각 12.0%와 7.3%로 대부분의 면적이 산림지역으로 산세가 험한 전형적인 산림 고원지역이다. 특히, 이 지역에서는 고랭지의 기후적 특성으로 인해 영농활동이 활발히 이루어지고 있다. Fig. 1은 도암댐 유역의 수계를 나타내고 있다.

2.2. SWAT 모형의 적용

2.2.1. SWAT 모형 개요

SWAT 모델은 미국 농무성의 농업연구국(Agricultural Research Service, ARS)에서 개발한 유역단위의 모델이다. 이 모델은 미국 농무성에서 개발하여 이용해 온 CREAMS 모델, GREAMS 모델 및 EPIC 모델과 같은 농업연구국 모델들을 결합하여 만들었다(Arnold and Srinivasan, 1994). 특히 SWAT은 강우-유출모델과 수질모델이 GIS와 연계된 호환모델로서 장기 유량과 수질을 모의할 수 있으며, 미계측 지역에서는 모의도 가능하며, 경작형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 효과도 정량화할 수 있는

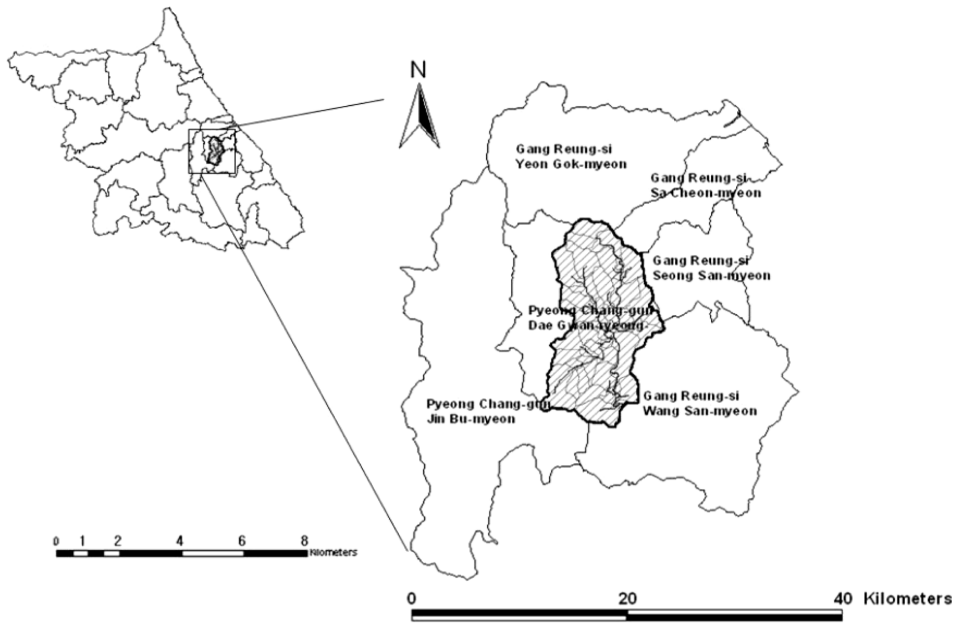


Fig. 1. Location of the doam-dam watershed at Pyeongchang, Gangwon-Do.

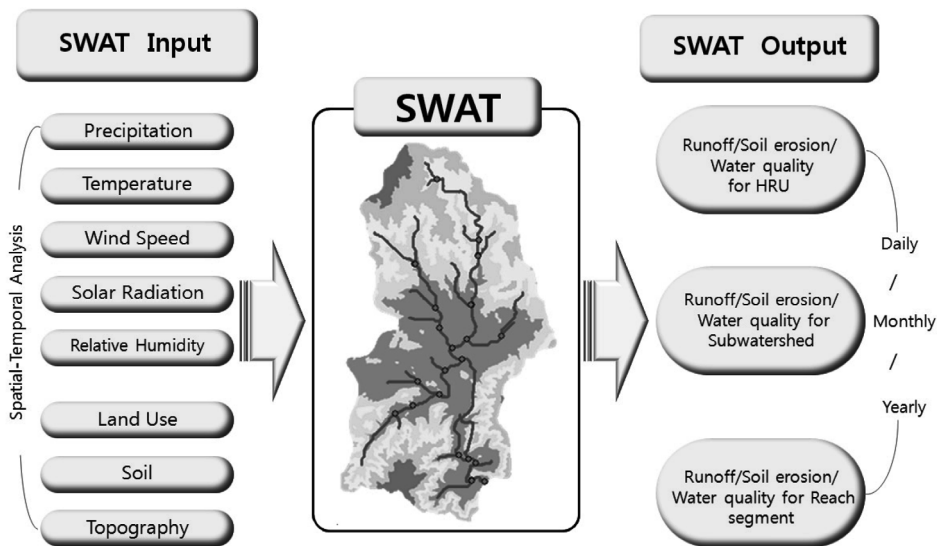


Fig. 2. Overview of the swat model - model input/output parameters.

특징을 지니고 있다. Fig. 2는 SWAT 모델의 입력 자료와 출력자료를 보여준다. SWAT 모델을 이용하여 수문 및 수질을 시·공간적으로 분석하기 위해서 시간적으로 변화하는 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와, 공간적으로 변화하는 토지이용현황, 토양속성, 그리고 지형자료 등이 필요하다. Fig. 3에서 보이는 바와 같이 SWAT 모델은 유역에서의 토지이용에 따라 발생하는 비점오염원과, 유역내 소하천별, 소유역별, 그리고 소유역내 수문학적 반응단위별 유출량, 토양유실을 모의한다(허성구 등, 2006).

2.2.2. 기상자료

SWAT 모형의 운영에 필요한 기상자료는 장기 일 강우(mm), 일 평균풍속(m/sec), 일 평균상대습도(%), 일 최고온도(°C)·일 최저온도(°C), 일 수평면일사량(MJ/m²)이다. 기

상청에서는 일 수평면일사량(MJ/m²) 자료를 제공하지 않기 때문에, 국가수자원관리종합정보(2007)를 이용하여 SWAT에서 필요한 일 수평면일사량(MJ/m²)을 구축하였고, 다른 기상자료는 1974년 1월 1일부터 2007년 6월 28일까지 측정된 대관령 지역의 기상데이터를 이용하였다.

2.2.3. 토지이용도, DEM

본 연구에서의 도암댐 수계내 토지이용현황은 도암댐 유역의 지적도와 고해상도 위성영상 자료를 기반으로 한 토지피복도 자료를 이용하였다. 도암댐 유역의 토지 이용 분류는 산림(FRST)이 76.5%를 차지하며, 농업지역(AGRL)이 12.0%, 시가화(URLD) 2.6%, 초지(PAST) 7.3%, 수역(WATR) 1.7% 각각 차지하고 있다(Fig. 3(a)). SWAT 모형의 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)을 구축하기 위해

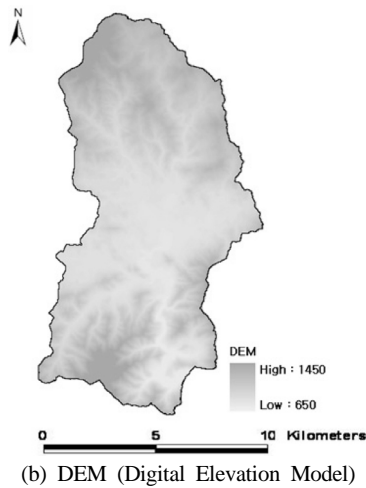
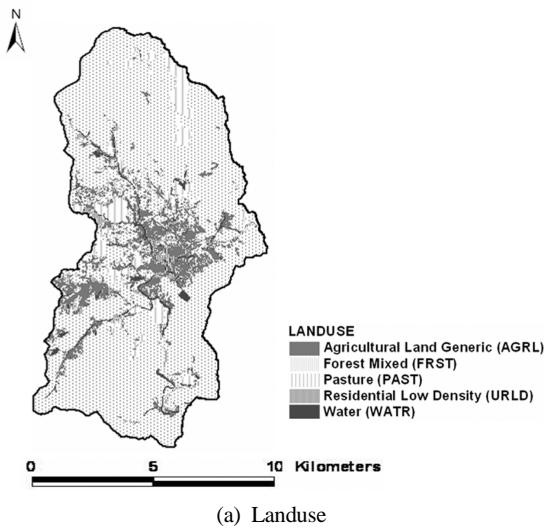


Fig. 3. Land cover/land use, dem at the doam-dam watershed.

환경부에서 발행한 도암댐 유역의 1:5,000 수치지도와 Arc-View GIS 3.2a 프로그램을 이용하였다. DEM의 격자(Cell) 크기 결정에 있어 모의 시간의 효율성과 모의결과의 정확성을 고려하여 격자 크기는 5 m×5 m로 하여 DEM을 구축하였다(Fig. 3(b)).

2.2.4. 객토속성 고려한 토양도

도암댐 수계내 토양속성은 농촌진흥청 농업과학기술원(농촌진흥청 농업과학기술원, NIAST, 2000)에서 제공해 주는 정밀토양도(1:25,000)를 사용하였다. 하지만 도암댐 유역내 고랭지 농경지에서는 매년 연작 피해, 병충해 예방, 작물 생산성 향상 등을 위해 지속적으로 많은 양의 객토가 성행하고 있으며, 하천범람 및 제방붕괴 등으로 토양유실 및 탁수발생을 가중 시키고 있다. 따라서 본 연구에서는 대상유역에 대한 객토 속성을 고려한 토양 데이터베이스를 수정 구축하기 위하여 2006년 9월 13일 강원도 평창군 도암댐 유역 고랭지 농경지의 객토 토양 시료를 채취하여 비중계 실험 및 체가름 분석을 통한 입도 분석을 수행하였다(허성구 등, 2007). 분석 결과 자갈 함량 20%, 모래 함량 61%, 실트 함량 19.4%, 점토 함량 6.1%인 사양토(SL)로

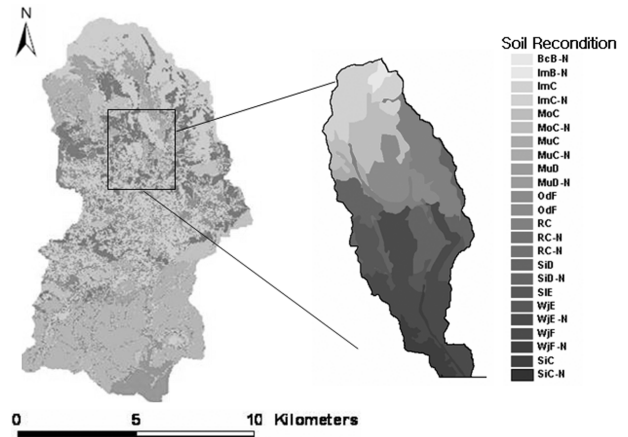


Fig. 4. Soil Distribution map using soil properties of reconditioned soil at agricultural field.

분석 되었다. 구축된 객토 토양도를 토지이용과 중첩하여 객토 속성을 고려한 토양도를 이용하였다(Fig. 4).

2.2.5. SWAT 모형 지형 자료 추출 모듈 패치 적용

SWAT 모형은 DEM을 이용하여 유역의 평균 경사도를 산정하고 평균경사도와 경사장과의 관계를 식을 이용하여 평균 경사장을 계산한다. 그러나 기존의 SWAT 모형은 전반적으로 미국 지형의 경사가 완만한 지역에 적합하게 개발되어 왔기 때문에 우리나라와 같이 산세가 험하고 경사가 급한 지역에 적용하기에는 부적절할 수 있다. 또한 SWAT 모형은 소유역의 평균경사를 통해 소수계의 각 HRU의 경사장을 산정한다. 기존 SWAT 모형은 분할된 소유역의 경사장 산정시 경사도가 25%이상의 급한 지형에서는 0.05 m로 일괄적으로 사용하도록 되어 있다(Arnold and Srinivasan, 1994). 이러한 소유역마다 경사장 산정의 오류는 예측 유사량 모의 결과에 상당히 많은 영향을 미칠 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 경사장과 경사도 관계를 이용하여 개발한 SWAT ArcView GIS Extension Patch(임경재 등, 2007) 기능을 적용하였다(허성구 등, 2008).

2.2.6. SWAT 모형의 유출량 보정 및 검증

SWAT 모형을 이용하여 고랭지 농업의 작물별 객토량 변화에 따른 토양유실량을 모의하기 위해 앞서, SWAT 모형의 수문 및 토양유실/유사 컴포넌트의 정확성을 평가해야 한다. 모형의 정확성을 검증하기 위해 실측자료는 도암댐 수계의 유량 데이터(한국수력원자력(주), 2006)와 송천 지점의 유사량 데이터(물환경정보시스템, 2006)를 이용하였다. 유사는 물의 이용에 의해 좌우되기 때문에 모형의 보정을 위해 먼저 유출과 관련된 매개변수를 보정하여야 하고, 이후 유사 관련 매개변수를 보정하였다. 유출관련 매개변수 보정 후, 유사 관련 매개변수를 보정할 때에는 앞선 유출 매개변수를 제외한 유사 관련 매개변수에 대해서만 보정을 함으로써 유출 모의 값에 영향을 주지 않도록 하였다. 수문 컴포넌트 중 가장 민감한 변수들 중 유출매개변수 중 기저 유출에 대한 천층 대수층의 임계수분량(GWQN)과 유사매개 변수 중 침식조절인자(USLE_P) 등을 변경시켜 모형의

보정을 실시하였다(Arnold and Allen, 1999; Santhi et al., 2001; Spruill et al., 2000). 매개변수 보정은 SWAT 모형이 보정해야 할 매개변수가 많고 복잡한 모형이기 때문에 시행 착오법에 따라 각 매개변수의 민감도 분석 결과에 따라 단계별 매개변수를 변화시켜가며 보정을 수행하였으며, 보정 및 검증 결과에 대한 모형 적용성 평가를 위해 유량 및 유사에 대해 결정계수(Coefficient of Determination, R^2), Nash and Sutcliffe(1970)에 의해 제안된 모형 효율(Model Efficiency, EI)등을 산정하여 검토하였다.

2.2.7. 고랭지 농경지 현장 조사를 통한 각 작물 별 객토현황

강원도 평창군 도암댐 유역 고랭지 농경지는 잦은 객토가 이루어지고 있다. 특히 고랭지 지역 농경지의 경우 대부분이 높은 소득을 얻기 위한 생산 체계를 가지고 있다. 또한 고랭지 작물 재배의 경우 작물마다 특성이 다르고, 특히 채소류의 경우 일반 작물과는 달리 환경에 예민하기에 재배하기 까다롭다. 그러므로 높은 소득을 얻기 위해 고 투입 농업에 의존하게 되며 몇 가지 제한된 채소의 경우 연작이 이루어지고 있다(박철수, 2002). 고 투입 채소 연작에 의한 과중한 부담은 토양의 피로와 항시 교란 등을 가져오게 된다. 고랭지 농업은 더구나 경사지에서 이루어지고 있기에 토양유실 위험에 노출되어 있고 강우발생 시 원 지반이 소실될 가능성이 상당히 높다. 따라서 이와 같은 이유들로 인해 고랭지 농경지는 소득향상과 더불어 매년연작 피해 경감 및 병충해 예방, 원 지반의 소실 등을 위해 잦은 객토를 하게 되는데 새로운 토양이 30~50 cm 정도 객토가 이루어지고 있다(전만식과 김범철, 2005). 객토의 양은 농민에 따라서 상당히 차이가 크다. 하지만 과거에는 엄두도 내지 못했던 객토를 중장비나 농기계의 보급으로 객토가 용이해져 무분별하게 객토가 이루어지고 있는 것만은 사실이다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 고랭지 지역 농경지를 대상으로 2007년 6월 현장방문을 통해 도암댐 유역 고랭지 대표작물별 객토 현황 조사를 하였다. 하지만 도암댐 유역의 전체 농경지가 17.2 km²에 대한 각 작물별 전체 객토 현황을 파악하기에는 시간과 비용적인 문제가 발생하기에 도암댐 유역 중 현 작물 재배적지인 2곳(횡계2리와 차항1리)을 선정하여 고랭지 대표작물인 감자, 당근, 배추에 대한 작물별 객토 깊이를 현황을 조사하였다. 그 결과 감자 작물의 경우 평균 객토 깊이는 34.3 cm이고, 당근 평균 객토 깊이는 48.3 cm, 배추 평균 객토 깊이는 31.2 cm로 조사 분석되었다(Fig. 5(a)~(f)).

2.2.8. SWAT 모형을 이용한 대표 작물 모의

SWAT 모형은 Hydrological Response Unit (HRU)라는 개념을 이용하여 유역 내 토지이용과 토양속성을 고려하여 수문 및 비점오염원을 모의한다. 본 연구에 있어서 SWAT 모형을 이용한 고랭지 대표 작물인 감자, 당근, 배추에 대한 각 작물별 객토 깊이를 조사 자료를 바탕으로 한 객토 깊이에 따른 작물 별 토양유실량을 예측하였다. 하지만 도암댐 유역 전체 농경지를 대상으로 한 작물 별 객토깊이 변화에 따른 토양유실량을 예측하여야만 하나 시간과 비용

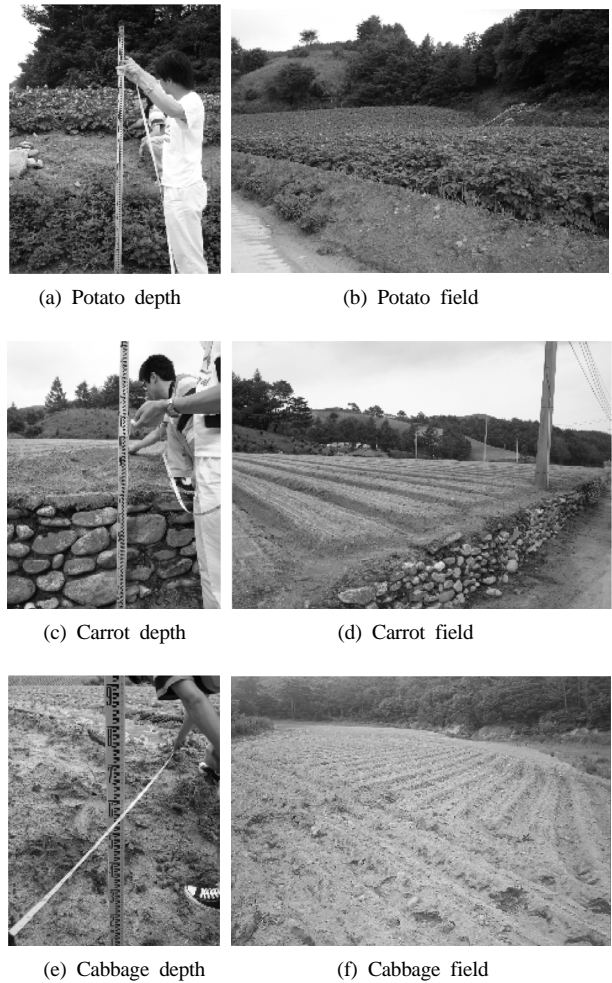


Fig. 5. Average soil depth for potato, carrot, and cabbage at doam-dam watershed.

적인 문제로 인하여 2곳 리에서의 분석된 자료를 바탕으로 각 작물 별 객토 깊이에 따른 작물 별 토양유실량을 예측하였다. 따라서 SWAT 모형의 최소 수문학적 응답단위 (HRU) 생성 전처리 과정 중 Definition of Landuse and Soil Themes에서 기존 도암댐 유역 토지이용 농경지를 고랭지 대표 작물인 감자, 당근, 배추로 재배한다는 가정 하에 각 작물 별 객토 변화에 따른 토양유실량을 모의하였다. Fig. 6(a)~(c)는 도암댐 유역 Raster 형태의 토지이용 중 농경지를 각각의 대표작물인 감자, 당근, 배추로 변환한 도암댐 유역 농경지를 나타내고 있다.

2.2.9. 적정 객토 깊이에 따른 토양유실 저감 효과 모의 분석

본 연구에서는 각 작물별 객토에 따른 토양유실을 모의하기 위해 SWAT 운영 시 토양 상세 정보를 나타내는 Uesrsoil.dbf 파일에서 도암댐 유역 현지 방문 조사를 통한 각 작물 감자(34.3 cm), 배추(31.2 cm), 당근(48.3 cm)별 객토량 조사 결과를 바탕으로 SWAT 토양매개 변수 중 토양표면으로 부터의 토층깊이(SOL_Z), 수문학적 토양군(HY-DGRP), 포화수리전도(SOL_Z) 등을 이용하여 SWAT 각 작물 별 객토에 따른 토양유실량을 분석하였고, 기타 토양의 속성을 나타내는 토양매개변수는 허성구 등(2007)의 도암댐

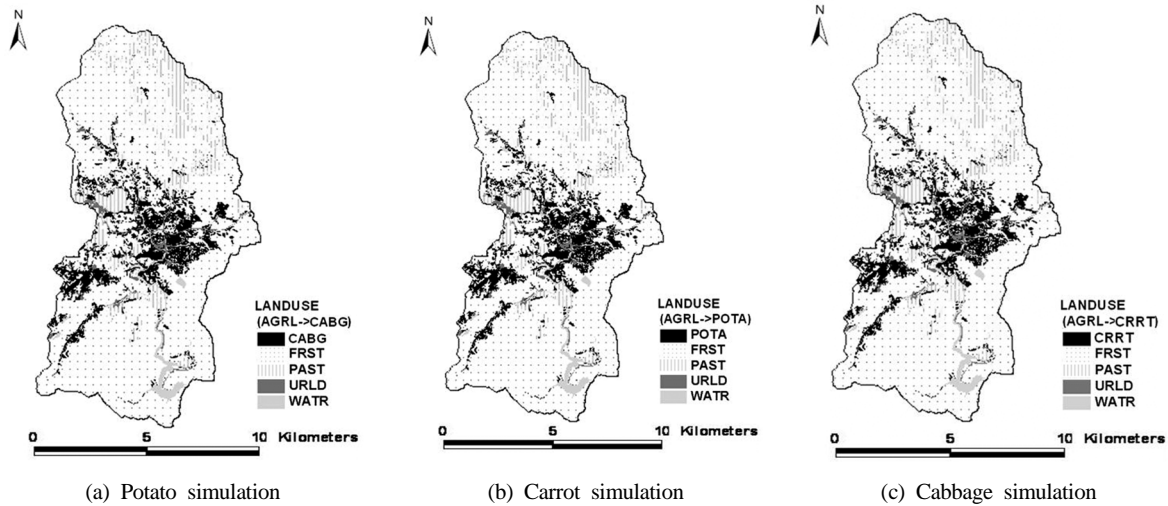


Fig. 6. Swat land use simulated for potato, carrot, and cabbage at doam-dam watershed.

유역 객토 토양도 DB 구축 시 도암댐 유역 객토 토양 시료 채취를 통한 물리적 특성 자료인 도암댐 유역 객토 토양의 습윤용적밀도(SOL_BD), 토양층의 가용토양수분능(SOL_AWC), 자갈(ROCK), 모래(SAND), 실트(SILT)함량과 토양침식인자(USLE_K) 등의 속성을 이용하였다. 따라서 도암댐 유역의 각 작물별 적정한 객토에 따른 토양유실을 모의하기 위해 본 연구 조사를 통한 작물별 객토깊이와 각 작물이 생육할 수 있는 최소한의 근권 깊이인 15 cm를 이용하였다(농촌진흥청 농업과학기술원, 2007). 또한 전만식과 김범철(2005)은 고령지 지역에 매년 농경지를 대상으로 30~50 cm 정도 원지반에 새로운 토양의 객토를 실시하고 있다기에 본 자료를 참고하여 도암댐 유역 농경지의 적정 객토 및 작물별 객토에 따른 SWAT 토양유실 모의를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SWAT 모형의 보정(Model Calibration) 및 검증(Model Validation) 결과

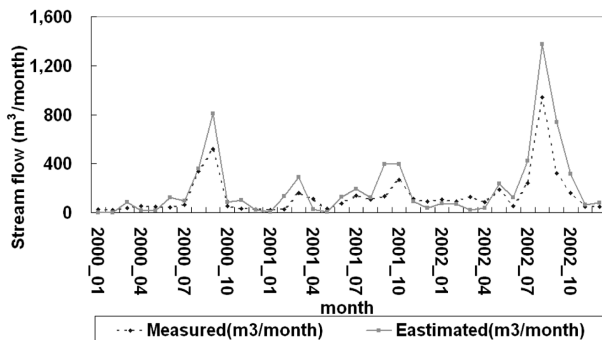
SWAT 고령지 대표 작물별 객토 깊이에 따른 유출량 모의기간은 1999~2004년으로 하였다. 또한 SWAT 모형의

수문 및 비점오염원 모의 시 모형의 안정화 및 신뢰성 있는 결과 도출을 위해 모형의 초기화 과정을 수행하였다. 본 연구에서는 초기화(Warming Up) 과정으로 1999년부터 수행하였다. 2001~2002년도의 실측값과 SWAT 모의 예측값을 이용하여 월(Monthly) 단위별로 유량을 보정한 결과 결정계수(R^2)는 0.85, 모형의 효율지수(EI)는 0.75로 분석되었다(Fig. 7(a), (b)).

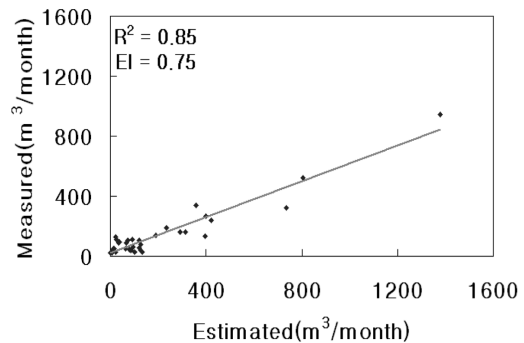
보정된 매개변수를 적용하여 모형의 정확성을 검증하기 위한 기간으로 2003~2004년에 적용해 본 결과 결정계수(R^2)는 0.87, 모형 효율지수(EI)는 0.85로 모의 예측치가 실측치의 경향을 잘 반영하였다(Fig. 8(a), (b)).

Fig. 9(a), (b)는 보정된 매개변수를 이용하여 모의 유사량과 2003년 1월~2003년 12월까지 실측 유사량을 이용하여 월(Monthly) 단위별로 유사량을 보정한 결과 결정계수(R^2)는 0.97, 모형효율지수(EI)는 0.70로 분석되었다.

보정된 매개변수를 적용하여 모형의 정확성을 검증하기 위한 기간으로 2004년 1월~2004년 12월까지 적용해 본 결과 결정계수(R^2)는 0.97, 모형 효율지수(EI)는 0.63로 모의 예측치가 실측치의 경향을 잘 반영하였다(Fig. 10(a), (b)). 따라서 보정된 SWAT 모형은 도암댐 수계 내 유량/유

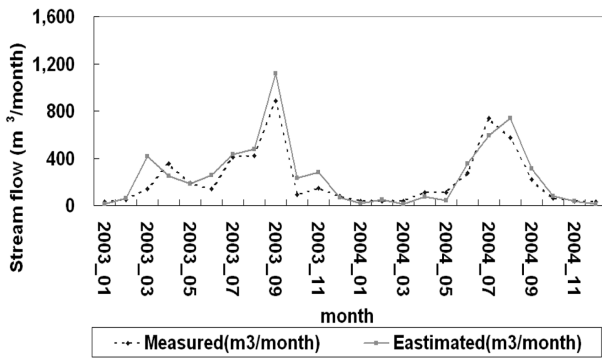


(a) Comparison of measured and estimated stream flow for calibration period

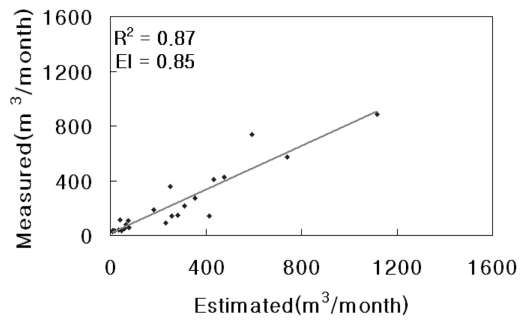


(b) Coefficient of determination (R^2) model efficiency (EI) for calibration period

Fig. 7. Calibration of SWAT hydrologic component (2001~2002).

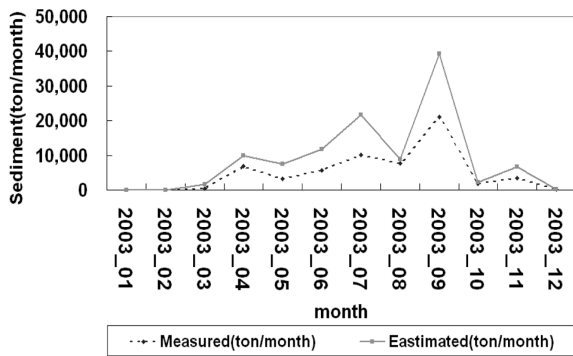


(a) Comparison of measured and estimated stream flow for validation period

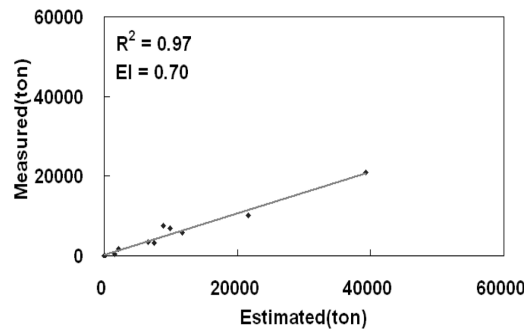


(b) Coefficient of determination (R^2) model efficiency (EI) for validation period

Fig. 8. Validation of SWAT hydrologic component (2003~2004).

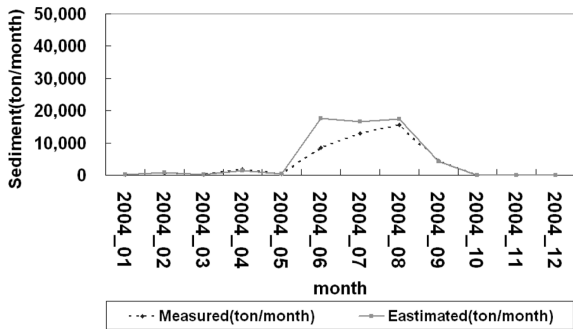


(a) Comparison of measured and estimated sediment yield for calibration period

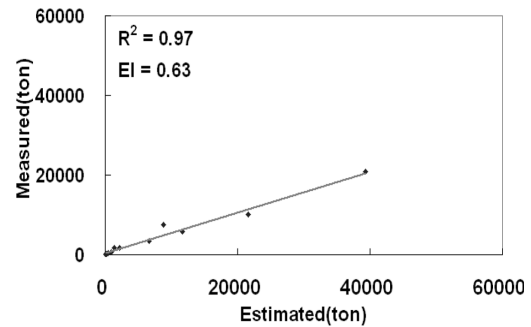


(b) Coefficient of determination (R^2) model efficiency (EI) for calibration period

Fig. 9. Calibration of swat sediment component (2003.1~2003.12).



(a) Comparison of measured and estimated sediment yield for validation period



(b) Coefficient of determination (R^2) model efficiency (EI) for validation period

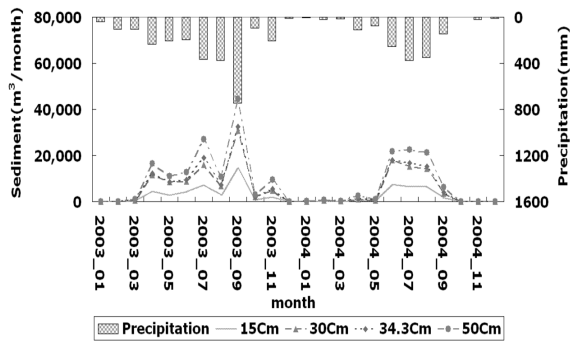
Fig. 10. Validation of swat sediment component (2004.1~2004.12).

사랑 모의에 상당히 적합한 것으로 분석되었다.

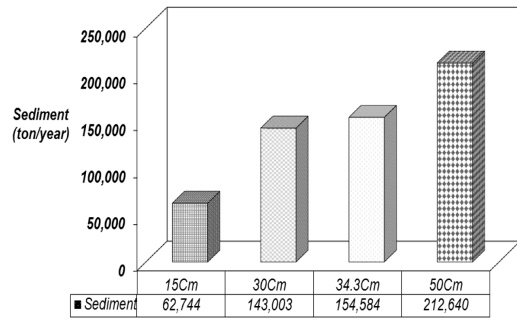
3.2. 대표 작물별 적정객토에 따른 토양유실량 비교

본 연구에서는 SWAT 모형의 수문 및 유사랑 예측 연구를 바탕으로 고랭지 대표작물인 감자, 당근, 배추 작물에 대해 현지 방문 조사를 통한 객토 현황 및 깊이를 분석하여 대표 작물별 객토 깊이에 따른 SWAT 토양유실량 변화를 예측 모의하였다. Fig. 11(a)는 2003~2004년까지 2년간의 객토 깊이변화에 따른 감자 작물의 경우 SWAT 예측 토양유실량을 비교한 것으로 3월 중순 이후 고랭지 지역에

서는 기온 상승에 따른 봄철 융설 및 여름철의 경우 태풍 매미로 인해 객토 깊이 변화에 따라서 토양유실량이 증가함을 알 수 있었다. Fig. 11(b)는 감자 작물의 경우 객토 깊이 변화에 따른 2년간 총 토양유실량을 나타낸 것이다. 그 결과 감자 작물이 생육할 수 있는 최소한의 근권 깊이를 15 cm (농촌진흥청 농업과학기술원, 2007)로 하였을 경우 SWAT 예측 토양유실량은 62,744 ton/year이며, 본 연구를 통한 감자 작물의 객토 깊이 34.3 cm로 하였을 경우 SWAT 예측 토양유실량은 154,584 ton/year로 분석되었다. 즉 고랭지 농경지에서는 감자 작물의 경우를 볼 때 객

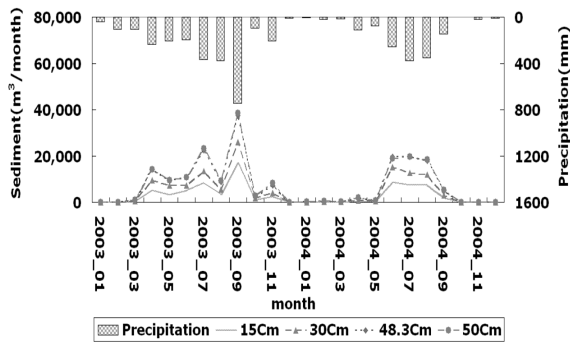


(a) Simulated sediment yield under potato cropping

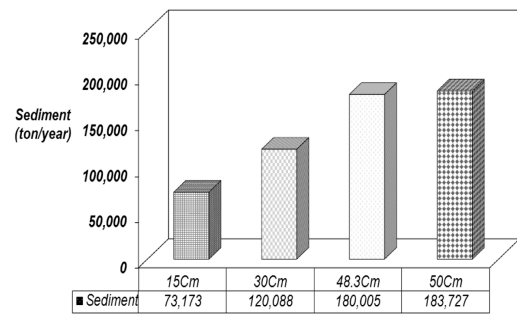


(b) Total sediment yield under potato cropping from 2003~2004

Fig. 11. Comparison of soil erosions due to the average depth changes of soil recondition at potato field.

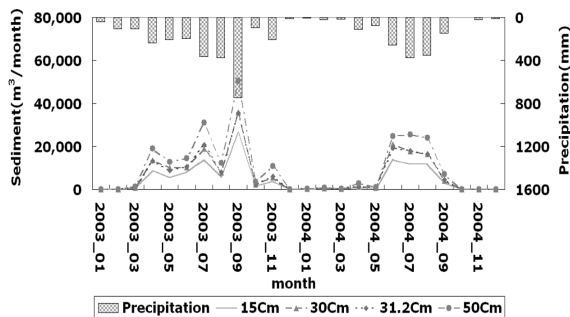


(a) Simulated sediment yield under carrot cropping

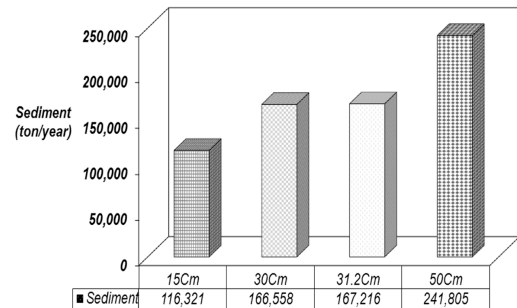


(b) Total sediment yield under carrot cropping from 2003~2004

Fig. 12. Comparison of soil erosions due to the average depth changes of soil recondition at carrot field.



(a) Simulated sediment yield under cabbage cropping



(b) Total sediment yield under cabbage cropping from 2003~2004

Fig. 13. Comparison of soil erosions due to the average depth changes of soil recondition at cabbage field.

토 깊이가 19.3 cm 증가하였을 경우 토양유실 발생량이 91,840 ton/year로 약 146% 정도 더 발생할 수 있다는 것으로 분석되었다.

Fig. 12(a)는 2003~2004년까지 2년간의 객토 깊이변화에 따른 당근 작물의 경우 SWAT 예측 토양유실량을 비교한 것으로 감자 작물의 경우와 마찬가지로 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 12(b)는 당근 작물의 경우 객토 깊이 변화에 따른 2년간 총 토양유실량을 나타낸 것이다. 그 결과 당근 작물이 생육할 수 있는 최소한의 근권 깊이를 15 cm(농촌진흥청 농업과학기술원, 2007)로 하였을 경우 SWAT 예측 토양유실량은 73,173 ton/year이며, 본 연구 조사를 통한 당근 작물의 객토 깊이 48.3 cm로 하였을 경우 SWAT 예측 토양유실량은 180,005 ton/year로 분석되었다. 즉 고랭지 농

경지에서는 당근 작물의 경우를 볼 때 객토 깊이가 33.3 cm 증가하였을 경우 토양유실 발생량이 106,832 ton/year로 약 146% 정도 더 발생할 수 있다는 것을 보여주었다.

Fig. 13(a)는 2003~2004년까지 2년간의 객토 깊이변화에 따른 배추 작물의 경우 SWAT 예측 토양유실량을 비교한 것이다. Fig. 13(b)는 배추 작물의 경우 객토 깊이 변화에 따른 2년간 총 토양유실량을 나타낸 것이다. 그 결과 배추 작물이 생육할 수 있는 최소한의 근권 깊이를 15 cm(농촌진흥청 농업과학기술원, 2007)로 하였을 경우 SWAT 예측 토양유실량은 116,321 ton/year이며, 본 연구 조사를 통한 배추 작물의 객토 깊이 31.2 cm로 하였을 경우 SWAT 예측 토양유실량은 167,216 ton/year로 분석되었다. 즉 고랭지 농경지에서는 배추 작물의 경우를 볼 때 객토 깊이가 16.2

cm 증가하였을 경우 토양유실 발생량이 50,895 ton/year로 약 44% 정도 더 발생할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

고랭지 지역은 지형 및 영농의 특수성으로 인해 타 지역보다 토양유실 발생 가능성이 산재되어 있다. 대부분이 고랭지 농경지 받은 경사진 지역에 위치하고 있어 집중 강우 및 태풍 발생 시 유실된 토양 및 농약/영양물질들이 수계로 유입되어 수질 및 생태계에 악영향을 끼친다. 또한 고랭지 지역 농경지의 경우 소득 작물에 대한 연작피해 경감, 병해충 방제, 작물의 생산성 향상, 지력 증진 등의 이유로 대규모 객토가 행해지고 있어 객토로 인해 더 많은 토양유실이 가중되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 고랭지 대표작물인 감자, 당근, 배추 작물에 대한 현지 방문 조사를 통한 객토 현황 파악 및 각 작물별 객토 깊이를 바탕으로 각 작물 적정 객토량 변화에 따른 토양유실 저감 분석을 SWAT 모형을 활용하여 분석하였다. 우선 고랭지 지역에 대한 현지 방문을 통한 각 작물 별 객토 깊이를 조사하였다. 그 결과 감자의 경우 34.3 cm, 당근 48.3 cm, 배추 31.2 cm로 조사되었다. 현지 조사 결과를 바탕으로 각 작물별 객토 깊이에 따른 토양유실량 변화를 SWAT 모형을 통해 적용하였다. 하지만 SWAT 적용에 앞서 SWAT 모형 자체는 전반적으로 미국 지형의 완만한 지역에 적합하게 개발되어 있어 우리나라와 같이 특히 고랭지 지역과 같은 산세가 험하고 경사가 급한 지역에 적용하기에는 부적절할 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 임경재 등(2007)에서 개발한 경사장과 경사도 관계를 이용한 SWAT ArcView GIS Extension Patch 기능을 적용하여 문제점을 해결하여 SWAT 모형의 정확성을 평가하였다. 그 결과 유량 보정 결과는 결정계수(R^2)는 0.85, 모형의 효율지수(EI)는 0.75로 분석되었고, 보정된 매개변수를 적용하여 검증한 결과 결정계수(R^2)는 0.87, 모형 효율지수(EI)는 0.85로 모의 예측치가 실측치의 경향을 잘 반영 하는 것으로 분석되었다. 유사량 보정 결과 결정계수(R^2)는 0.97, 모형 효율지수(EI)는 0.70로 분석되었고, 보정된 매개변수를 적용하여 검증한 결과 결정계수(R^2)는 0.97, 모형 효율지수(EI)는 0.63로 모의 예측치가 실측치의 경향을 잘 반영하였다. 이는 보정 및 검증을 통한 SWAT 모형이 도암댐 유역 내 유량/유사량 모의에 상당히 적합한 것으로 나타났다. SWAT 수문 및 유사량 정확성 결과를 바탕으로 고랭지 대표 작물인 감자, 당근, 배추 작물에 대한 작물별 객토 깊이에 따른 SWAT 토양유실량 변화를 예측하였다. 그 결과 감자 작물의 경우 감자가 생육할 수 있는 최소한의 근권 깊이와 현지 조사를 통한 감자 작물의 객토 깊이와는 약 19.3 cm 더 많이 객토를 실시하고 있었으며, SWAT 토양유실량 차이는 약 146%정도 더 많이 발생하는 것으로 나타났다. 당근의 경우 최소한의 근권 깊이와는 약 33.3 cm 더 많이 객토를 실시하고 있었으며, SWAT 토양유실량 차이는 약 146%정도 더 많이 발생하는 것으로 나타났다. 마지막으로 배추

의 경우 최소한의 근권 깊이와는 약 16.2 cm 더 많이 객토를 실시하고 있었으며, SWAT 토양유실량 차이는 약 44%정도 더 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구의 결과를 통해 보면 현 고랭지 지역에서는 작물이 최소한으로 생육할 수 있고 재배할 수 있는 토양조건 그 이상으로 현 농경지에서는 무리하게 객토가 성행하고 있는 것을 알 수 있었다. 그로 인해 토양유실 발생 시 하천으로 유입되었을 경우 수질문제 및 생태계 악영향을 더욱 가중시킬 수 있을 것으로 판단된다. 향후 농업에 종사하는 농민들은 작물이 생육할 수 있는 최소한의 조건과 작물의 생산성 영향에 미치지 않은 범위 내에서 가장 효율적인 작물별 객토 깊이를 산정하여 친환경적인 농업활동을 수행해야 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 강원발전연구원의 지원을 받아 수행된 연구비에 의하여 연구되었기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 강원도(2005). 고랭지밭 흙탕물저감 증장기 프로젝트 보고서. 국가수자원관리종합정보(2007). <http://wamis.go.kr>.
- 김기성, 허성구, 정영상, 김지만, 임경재(2005). 홍천군 산지 농업지대의 토양침식취약성 분석. *농촌계획학회지*, 11(2), pp. 51-57.
- 농촌진흥청 농업과학기술원(2000). <http://www.niast.go.kr>.
- 농촌진흥청 농업과학기술원(2007). 표준영농교본.
- 물환경정보시스템(2006). <http://water.nier.go.kr/weis>.
- 박철수(2002). 고랭지 농경지의 유실방지를 위한 토양관리 방법. 박사학위논문, 강원대학교.
- 유동선, 안재훈, 윤정숙 허성구, 박윤식, 김종진, 임경재, 김기성(2007). SATEEC 시스템을 이용한 객토 토양의 토성 고려에 따른 도암댐 유역의 토양유실 및 유사량 분석. *한국물환경학회지*, 23(4), pp. 518-526.
- 이근상(2007). GIS 기반 고랭지밭의 토사유실 영향 분석. *대한토목학회지*, 27(5), pp. 657-662.
- 임경재, 허성구, 박윤식, 김종진, 박준호, 최대현, 강현우(2007). SWAT ArcView GIS Extension Patch개발, 강원대학교 농업공학부 GIS 환경 시스템 연구실, No.0708, <http://www.EnvSys.co.kr/~swat>.
- 전만식, 김범철(2005). 고랭지 농경지로부터의 비점오염물질 유출특성 및 저감방안. *강원대농업과학연구소*.
- 한국수력원자력(주) (2006). <http://www.khnp.co.kr>.
- 허성구, 김기성, 안재훈, 임경재, 최중대(2006). 소유역 구분이 SWAT 예측치에 미치는 영향 평가. *한국관개배수학회지*, 13(2), pp. 55-62.
- 허성구, 김남원, 박윤식, 김종진, 김성준, 안재훈, 김기성, 임경재(2008). SWAT ArcView GIS Extension Patch를 이용한 소유역 분할에 따른 수문 및 유사 거동에 미치는 영향 평가. *한국물환경학회지*, 24(2), pp. 147-155.
- 허성구, 김재영, 유동선, 김기성, 안재훈, 윤정숙, 임경재(2007). 객토 농경지의 토양특성을 고려한 도암댐 유역에서의 수문 및 유사 거동 모의. *한국농공학회지*, 49(2), pp. 49-60.
- Arnold, J. G. and Allen, P. M. (1999). Automated methods

- for estimating baseflow and ground water Recharge from streamflow records. *Journal of the American Water Resources Association*, **35**(2), pp. 411-424.
- Arnold, J. G., Allen, P. M. and Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal Hydrological JHYDA7*, **142**(1), pp. 43-69.
- Arnold, J. G. and Srinivasan, R. (1994). Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Models with GIS. *Water Resources Bulletin. American Water Resources Association*, **30**(3), pp. 453-462.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models Part I -Discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **10**(3), pp. 282-290.
- Santhi, C. J., Arnold, J. G., Williams, W. A., Srinivisan, R. and Hauck, L. M. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *Journal of the American Water Resources Association*, **37**(5), pp. 1169-1188.
- Spruill, C. A., Workman, S. R. and Taraba, J. L. (2000). Simulation of daily and monthly stream discharge from a small watershed using the SWAT model. *Transactions of the ASAE*, **43**(6), pp. 1431-1439.