

Research Paper

분포형 유역모델을 이용한 식생여과대의 오염부하 저감효과 분석

박민혜 · 조홍래 · 구본경

(주)하이드로코어

Evaluation of Pollution Loads Removal Efficiency of Vegetation Buffer Strips Using a Distributed Watershed Model

Min-Hye Park · Hong-Lae Cho · Bohn Kyoung Koo

HydroCore Ltd.

요약 : 본 연구에서는 강원도 평창군 대관령면에 위치한 산지초지와 초지의 말단에 조성한 식생여과대 (Vegetation Buffer Strip, VBS)에 분포형 유역모델 CAMEL을 적용하였다. 그리고 이를 통해 확보한 매개변수를 초지와 식생여과대로 구분한 다수의 시험격자에 적용하여 다양한 인자들에 의한 식생여과대 오염부하 저감효과를 평가하였다. 시험격자를 이용한 시나리오 모의결과, 식생여과대에서 강우의 직접유출량은 식생여과대 폭이 넓어질수록 감소하는 것으로 나타났으며, 전반적으로 경사가 높을수록 오염물질의 저감효율은 낮아지는 것으로 나타났다. 유사한 경우, 식생여과대 폭에 따른 저감효율은 전반적으로 큰 차이를 보이지 않았다. TOC와 TN의 경우, 시험격자의 경사가 10°, 20°일 때, 식생여과대 폭에 따른 저감효율은 큰 차이를 보이지 않았으나, 경사가 30°일 때 식생여과대 폭이 좁을수록 높은 저감효율을 보였다. 반면, TP의 경우, 양토(Loam)에서의 저감효율은 전반적으로 높지만, 사양토(Sandy loam)에서는 경사가 20°, 30°일 때 식생여과대 폭이 넓을수록 높은 저감효율을 보이는 것으로 분석되었다. 이는 TOC와 TN의 모의결과와는 상반되는 결과로 대부분 입자성 물질로 존재하는 인의 경우 지표면에서의 포착현상으로 인해 길이에 따라 비례적으로 저감효율이 높아지는 경향을 보이는 것으로 사료된다. 본 연구에서 구축한 모델은 향후 비점오염물질의 유출을 효과적으로 저감할 수 있는 식생여과대 조성을 위한 기준 등을 제안하는데 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 산지초지, 토성, 경사도, 식생여과대 폭, 시나리오 분석

Abstract : A distributed watershed model CAMEL(Chemicals, Agricultural Management and Erosion Losses) was applied to a part of grazing grassland and vegetation buffer strip(VBS) located in Daegwanryeong, Korea. A set of scenario analyses was carried out for grassland and VBS with various combinations of VBS widths, soil textures and ground surface slopes. The simulation results indicate that annual direct runoff decreases with wider VBS and the removal efficiency of pollutants

generally decrease with steeper slopes. The removal efficiency of sediment is not significantly different with VBS widths. For gentle and medium slopes(10°, 20°), the removal efficiency of TOC and TN is not significantly different with VBS widths. As for a steep slope(30°), however, the removal efficiency of TOC and TN increases with narrower VBS. The removal efficiency of TP is generally high except for medium and steep slope of sandy loam where the removal efficiency of TP increases with wider VBS. This result of TP is contrary to the results of TOC and TN due to the adsorption characteristics of phosphorus associated with fine sediment particles. It is expected that CAMEL can be used for evaluating the effectiveness of VBS to reduce non-point source pollution discharges.

Keywords : montane grassland, soil texture, slope, vegetation buffer strip width, scenario analysis

I. 서론

고가의 조사료 수입량을 감소시키며, 동물복지를 고려한 가축사육과 환경 친화적인 축산물을 생산할 수 있는 방법으로 산지에 목초지를 조성하는 방안이 현실적으로 검토되고 있다. 이와 관련하여 일본에서는 목초지와 야초지를 활용한 공공목장을 운영함으로써 위탁사육서비스를 제공하고, 자급사료기반을 확대해나가고 있으며, 유럽에서는 산림과 축산이 결합된 산림축산시스템 등을 운영하고 있다(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs 2013).

그러나 이러한 산지초지의 활성화에 의해 식생과 지형이 변동될 수 있으며, 이로 인해 발생할 수 있는 다양한 환경변화에 대한 대비가 필요하다. 특히, 목초지에서 유실되는 토양과 비점오염 물질은 하천의 수질에 악영향을 미칠 수 있으며, 이러한 영향을 사전에 방지하기 위해 산지초지 조성 지역에서의 환경변화를 정량적으로 평가하고, 이를 제어할 수 있는 방안에 대한 평가가 요구된다.

비점오염원에서 기인하는 수질오염은 유역에서의 강우유출수 관리를 통해 최소화할 수 있으며, 이러한 비점오염물질 저감 방안 중 식생여과대(Vegetation Buffer Strip, VBS) 조성에 관한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 식생여과대는 조밀한 식생으로 덮인 균등경사의 지표면을 통하여 강우유출수를 이송시키는 시설로, 식생에 의한 여과와 토양으로의 침투 등의 기작을 통해 강우유출수의 오염물질을 제거하는 시설이다(National Institute of Environmental Research 2012). 식생여과대는 단기간에 조성이가

능하고, 저감효과가 높은 것으로 보고되고 있으며(Strohmeier 2002), 영국, 유럽, 미국에서는 식생여과대 관련 내용을 법률로 제정하고 있다(The Water Environment Regulations 2008; NRCS 1999).

식생여과대의 오염물질 저감효과는 식생여과대의 길이, 식생의 종류, 경사 등에 영향을 받는다고 보고되고 있다(Parajuli et al. 2008). 따라서, 식생여과대를 효과적으로 조성하기 위해 다양한 환경적 요인에 의한 저감효과에 대한 평가가 요구된다. 이러한 평가를 위해서는 식생여과대에서의 오염물질 유출량에 대한 정량적인 평가가 필요하며, 이를 위해 유역모델이 다양한 연구에 적용되고 있다. Park et al. (2008)은 Soil and Water Assessment Tool(SWAT) 모델의 유사저감 효과 모듈을 개선하기 위해 VFSMOD-W 모델을 이용하여 식생여과대 폭, 강우에 따른 유출, 식생에 관한 인자가 유사 저감 효과에 미치는 영향을 파악하였으며, Lee et al. (2011)은 만대천 유역을 대상으로 SWAT 모델의 적용성을 평가하고, 만대천 유역 내 농경지에 식생여과대의 폭을 1, 3, 5 m로 조성하였을 경우에 대한 TP 저감효과를 산정한 바 있다. 또한, Park et al. (2015)은 CAMEL (Chemicals, Agricultural Management and Erosion Losses) 모델에 기반하여 식생여과대 기능을 구현할 수 있는 모듈을 개발하였으며, 식생여과대 길이, 조도계수, 토성, 식생종류 등 다양한 인자들에 대한 민감도 분석을 통해 모듈의 검증작업을 실시하였다. Chaubey et al. (2010)은 목초지의 비율이 높은 Lincoln 호 유역의 수질 향상을 위해 SWAT 모델을 적용하여 다양

한 최적관리방안(Best Management Practices; BMP) 시나리오에 대한 효과를 평가하였으며, Sheshukov et al. (2009)은 시험유역에 SWAT 모델을 적용하여 가축 방목에 대한 BMP 효과를 평가한 바 있다.

국내외에서 식생여과대 저감효과를 평가하는 데 SWAT과 같은 준분포형 모델이 널리 활용되고 있다. 준분포형 모델은 대상유역을 소유역 또는 HRUs (Hydrologic Response Units) 등으로 구분한다. 그러나 각 소유역 또는 HRUs는 크기와 모양이 불균일하기 때문에 공간적 최소 계산단위가 유역의 말단에 조성된 식생여과대의 면적보다 클 가능성이 있다. 따라서, 식생여과대 저감효과 등을 평가하기 위해 준분포형 모델을 적용하기에는 공간적 특성을 세분화하여 묘사하는데 한계가 있으며, 대상유역을 일정한 크기 단위로 분할하고 각 단위 사이의 물질이동 과정을 명시적으로 나타낼 수 있는 분포형 유역모델을 적용하는 것이 더 적합할 것으로 사료된다(Park et al., 2015). 본 연구에서는 강원도 평창군 대관령면에 조성되어 있는 산지초지와 초지유역의 말단에 조성한 식생여과대를 대상으로 분포형 유역모델 CAMEL의 적용성을 평가하였다. 그리고 이를 통해 확보한 매개변수를 초지와 식생여과대로 구분한 다수의 시험격자에 적용함으로써 다양한 인자들에 의한 식생여과대 비점오염물질 유출 저감효과를 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상지역 개요 및 강우유출수 모니터링

이 연구의 대상지역은 강원도 평창군 대관령면 황계리 대관령한우시험장 내에 위치한 소규모의 산지 초지유역으로서 유역면적은 약 2.4 ha이다(Figure 1). 대상유역은 한우고급육 생산기술을 지원하고 개발하여 축산농가 소득 향상을 위해 설립된 농촌진흥청 국립축산과학원 소속의 한우시험장에 위치한다. 해당유역은 초지로 조성된 후 60년 이상 유지되고 있으며, 2014년의 경우, 5월 25일부터 10월 말의 기간 동안 한우 90두를 목구별로 5일씩 연간 총 4회를 방목한 것으로 조사되었다. 초지유역의 말단에는 각각 2 m×10 m, 2 m×20 m 크기의 식생여과대를 조성하였다.

초지유역과 식생여과대에서 발생하는 강우유출수의 유량과 수질에 대한 모니터링을 수행하였다. 초지유역의 말단에는 플룸을 설치하고 압력식 수위계와 기압계를 이용하여 수위를 연속 관측함으로써 강우유출수의 유량을 산정하였다. 또한, 식생여과대 유입부와 유출구 4곳에는 각각 위어를 설치하고, 압력식 수위계와 기압계를 이용하여 수위를 연속 관측함으로써 강우유출수의 유량을 산정하였다. 여기에서, 본 연구를 위해 임시로 조성된 식생여과대의 면적을 고

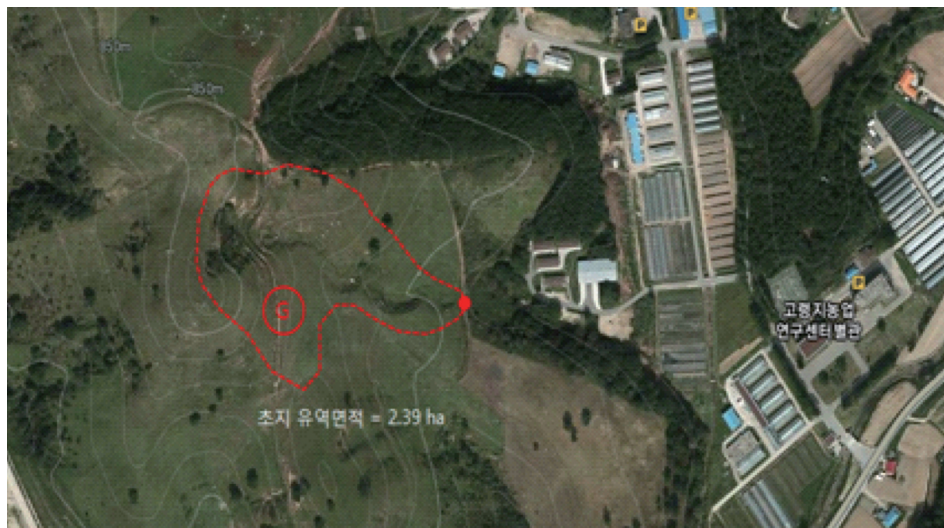


Figure 1. Location of the study area

려하여 초지유역에서 유출된 강우유출수의 일부만 식생여과대에 유입할 수 있도록 식생여과대 유입구에는 오리피스 장치를 설치하였다.

수질 시료 채취는 2015년 8월 24일 - 26일에 발생한 강우사상을 대상으로 실시하였다. 해당 시기 강우사상의 총 강우량은 276.0 mm로서, 20분 - 3시간 간격으로 총 39개의 강우 유출수 시료를 채취하였으며, 각 수질시료에 대해 SS, COD, TN, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, TP, $\text{PO}_4\text{-P}$ 등의 수질 항목을 분석하였다.

2. 연구대상지역에 대한 CAMEL 모델 구축

CAMEL은 분포형 유역모델로서 소규모 유역에 적용하여 지표수, 중간류, 지하수 유동을 통한 물과 오염물질의 이동 및 물질수지를 분석할 수 있도록 개발되었다(Koo et al. 2005). CAMEL은 대상 유역을 임의 크기의 정방형 격자로 분할하고 각 격자에서의 물질 이동과 물질수지를 1 시간 이내의 시간간격으로 계산한다. 각 정방형 격자기동은 수직 방향으로 토양층과 상하부 대수층으로 구분된다(Figure 2). 모델 내에서 직육면체 형태의 개별적 격자기동 구조는 격자(cell)라고 정의되는데, 각각의 격자는 최대 8개의

인접 격자를 가질 수 있으며, 그 중 다수의 상류 격자와 1개의 하류 격자를 갖는다. 각 격자의 중앙에는 직사각형 단면의 하천 또는 우하수관거 등의 물길(channel)이 존재하며 이를 통해 유역 내 최상류 격자로부터 각 격자에서 발생하는 물과 오염물질이 하류 격자로 순차적으로 이동한다.

CAMEL에서 지표수의 유동은 정상류(steady flow)로 해석되며, 지하수의 유동은 2차원 동력학적으로 해석된다. 유역의 수문과정을 모의하기 위해 수관, 토양, 대수층, 하천 등 4 개의 저장소를 이용한다. 대수층은 2개의 층으로 구분되는데, 상부대수층은 지하수의 유동 속도가 큰 풍화대를 표현하고, 하부대수층은 지하수 유동 속도가 낮은 1차 또는 2차 절리층을 표현한다(Koo et al. 2005). 토양 침식, 퇴적 및 이동 과정은 육상과 하천에서 모두 발생한다. 유사(sediment) 공급 효과를 모의하기 위해 육상, 하천 등 3개의 유사 저장소를 정의하며, 이들 각 저장소는 유사 입도에 따라 다시 점토(유효입경 $1\ \mu\text{m}$), 미사(유효입경 $10\ \mu\text{m}$), 세립사(유효입경 $100\ \mu\text{m}$) 및 조립사(유효입경 $1000\ \mu\text{m}$) 등 4개의 저장소로 구분된다(Koo et al. 2005). 탄소, 질소, 인의 변환과 이

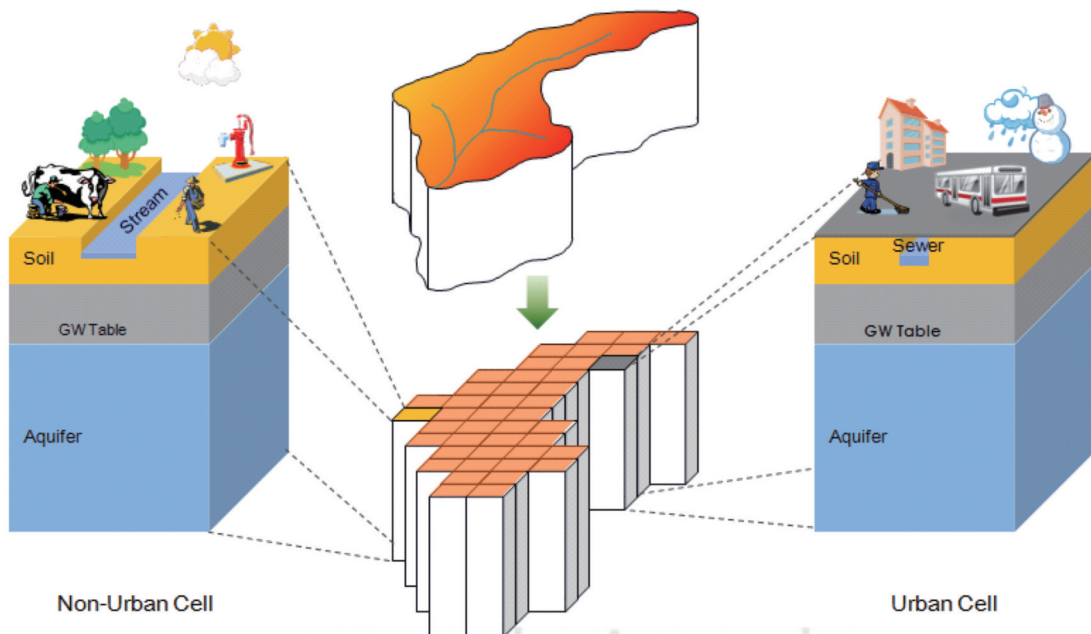


Figure 2. A watershed is represented with a network of grid cells in CAMEL (Koo 2010)

동을 모의하기 위해 Litter, Manure, Humus, Biomass
 의 4개 유기물 저장소를 정의한다. 토양 내 탄소, 질
 소, 인의 순환과정은 1차 운동 방정식으로 표현되며,
 이들 방정식은 4th-order Runge-Kutta 기법을 이
 용하여 해석된다(Koo et al. 2005).

한편, 본 연구에서는 식생여과대에서의 오염물질
 저감효과를 모의하기 위해 수평둔덕 기능을 CAMEL
 에 추가로 설계하여 반영하였다. 보통의 격자에서는
 상류 격자의 물길에서 하류 격자의 물길로 물과 오염
 물질이 이동하게 되지만, 상류에 수평둔덕이 있는 식
 생여과대 격자에서는 상류 격자의 물길에서 유출되

는 물과 오염물질이 식생여과대 격자의 지표면 저장
 所に 직접 유입되는 것으로 가정하여 수평둔덕의 기
 능을 구현하였다.

연구대상지역에 CAMEL 모델을 구축하기 위해 지
 형, 토성, 지질 등 공간자료와 기상자료, 오염원자료
 를 수집, 분석하였다. 초지유역의 공간적 범위를 설
 정하기 위해 10m 해상도의 DEM을 이용하여 유향
 (flow-direction)과 유하누적(flow-accumulation)
 을 생성하고 이를 바탕으로 유역의 경계를 추출하였
 다. 대상유역의 지형, 토성, 지질 등의 공간자료에 대
 한 GIS 분석을 통해 환경자료별 10 m×10 m 크기의

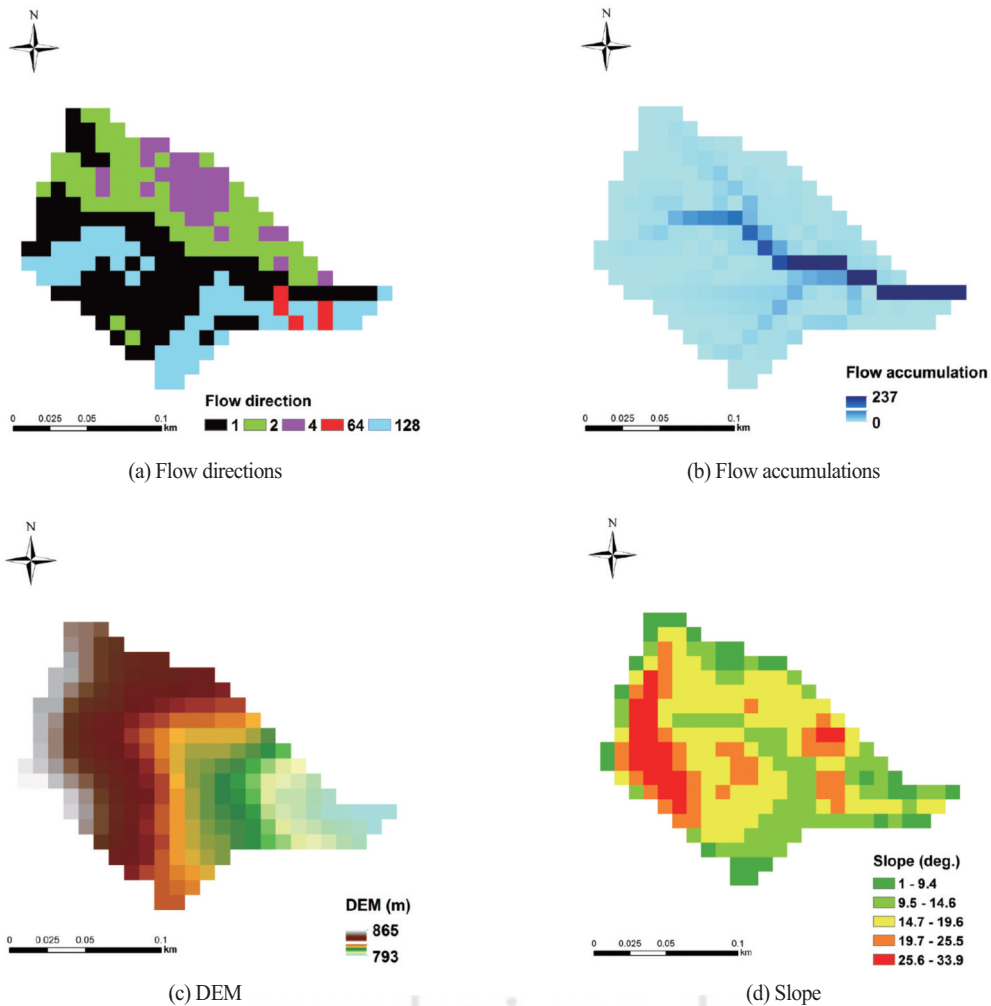


Figure 3. Topographic analysis of the study area

raster 파일을 생성하였으며, 이를 ASCII 형식으로 변환하여 CAMEL 모델의 공간적 입력 자료를 구축하였다(Figure 3). GIS 분석결과, 초지구역의 고도는 약 793 m – 865 m의 범위를 보이며, 경사는 약 1° – 34° 의 범위를 보이는 것으로 분석되었다. 초지구역의 표토는 양토가 약 82.4%, 사양토가 약 17.6% 분포하며, 지질은 대부분 화강암으로 구성되어 있는 것으로 분석되었다.

대상구역의 기상자료를 CAMEL 입력 자료로 구축하기 위해 기상청에서 운영 중인 대관령 기상대에서 관측한 시간별 자료를 수집하여 분석하였다. 기상자료는 강우, 기온, 상대습도, 기압, 풍속, 일사량을 포함한다. 한편, 초지로부터 유출되는 비점오염물질의 부하량을 정량적으로 평가하기 위해 해당구역에 방목된 가축의 배설 영향을 모델에 반영하였다. Technical Guidelines for TMDL Management (2014)에서 제시한 축산분뇨 발생부하원단위를 이용하여 2014년에 해당유역을 대상으로 조사된 가축방목의 두수, 방목시기, 방목 횟수 등을 기준으로 방목가축의 배설에 의한 토양 내 탄소, 질소, 인의 유입량을 산정하고 이를 모델에 입력하였다. Technical Guidelines for TMDL Management(2014)에서는 축산분뇨 발생부하원단위로 한우 1마리가 하루에 배설하는 분뇨의 양을 BOD 528 g, TN 116.8 g, TP 36.1 g으로 제시하고 있다.

3. 식생여과대 시나리오 구성 및 구축

식생여과대에서의 오염물질 저감효과는 구역의 경사, 토성, 식생여과대의 폭 등에 의해 영향을 받으며,

식생여과대 조성 시에는 이러한 환경 특성이 고려되어야 한다. 이 연구에서는 초지와 식생여과대로 구분한 다수의 시험격자를 이용하여 경사와 토성이 서로 다른 환경에서의 식생여과대 폭의 변화에 따른 시나리오를 구성하였다. 시험격자는 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 크기로 구축하였으며, 시나리오 모의를 위한 모델의 매개변수는 대관령면에 위치한 초지와 식생여과대에서 관측된 유량 및 수질 자료를 이용한 CAMEL 보정값을 적용하였다. 시나리오 분석을 위해 가상의 조건을 구성하였는데, 상류에 10개의 초지격자들이 경사면을 따라 일렬로 위치하며, 그 하단에 수평둔덕이 위치하고 바로 하류에 1 – 6개의 식생여과대 격자들이 경사면을 따라 일렬로 위치하는 것으로 모델을 구축하였다(Figure 4).

시험격자의 토양은 전국 산지를 기준으로 가장 많은 비중을 차지하는 사양토(41.3%)와 양토(39.5%) 2가지의 토성을 고려하였으며, 경사도는 10° , 20° , 30° 의 3가지, 식생여과대 폭은 5 m, 10 m, 20 m, 30 m로 조성하는 경우에 대한 4가지 경우를 포함하여 총 24개의 시나리오에 대한 모델을 구축하고 모의를 수행하였다(Table 1). 모델에 반영한 사양토와 양토의 공극, 수리전도도 등을 Table 2에 제시하였다.

한편, 식생여과대의 식생은 방목가축에 의한 섭식압력을 받지 않으므로 초장 30 cm(초지의 3배), 강

Table 1. Scenarios for vegetation buffer strips (VBS)

Conditions	Cases
Soil texture	Sandy loam, Loam
Ground surface slope ($^{\circ}$)	10, 20, 30
VBS width (m)	5, 10, 20, 30

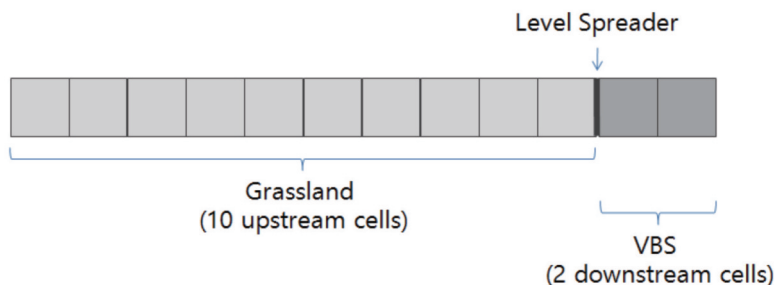


Figure 4. CAMEL model was set up using $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ cells for the VBS scenario analyses (Here the diagram shows the case of VBS width of 10 m)

Table 2. Hydrologic properties of the soil

Soil texture	Total porosity(m ³ /m ³)	Water retained at -33 kPa, (m ³ /m ³)	Water retained at -1500 kPa, (m ³ /m ³)	Residual water content (m ³ /m ³)	Saturated hydraulic conductivity (m/day)
Sandy loam	0.453	0.207	0.095	0.041	0.52
Loam	0.463	0.270	0.117	0.027	0.32

Table 3. Pollutants removal efficiency of the vegetation buffer strips (Estimates from observed data)

		Flow(m ³)	SS(kg)	COD(kg)	TN(kg)	TP(kg)
VBS (width 10 m)	Inlet	17.168	0.885	0.359	0.026	0.030
	Outlet	16.736	0.533	0.322	0.032	0.026
	Removal efficiency(%)	2.5	39.8	10.4	-22.5	14.2
VBS (width 20 m)	Inlet	21.064	0.961	0.433	0.033	0.037
	Outlet	14.293	0.455	0.270	0.027	0.016
	Removal efficiency(%)	32.1	52.7	37.7	17.8	57.4

우차단용량 5 mm(초지의 2.5배), 토양대공극계수 2.0(초지의 2배)로 가정하여 모의하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 모니터링 분석 결과

초지유역에서 2015년 8월 24일 - 26일 발생한 강우사상에 대한 강우량 대비 유출률은 5.0%로 분석되었으며, 이는 일반적인 유역에서의 강우유출률보다 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. 강우유출률은 유역의 토지피복, 토양특성 등의 영향을 받으며, 초지유역의 경우, 조밀한 식생에 의해 강우 유출률이 상대적으로 낮을 것으로 사료된다. 그러나 유역에서 플룸으로 유입하는 강우유출수의 손실 등을 포함한 관측 오류에 의해서도 유출률이 낮게 산정될 수 있으며, 지속적인 모니터링을 통해 유량 자료의 신뢰성 확보가 필요할 것으로 판단된다. 초지유역에서의 강우 시 수질 모니터링에 따른 분석결과를 살펴보면, SS 농도는 1.7 mg/L - 140.0 mg/L의 범위를 보였으며, COD 농도는 16.2 mg/L - 30.4 mg/L의 범위를 보였다. TN 농도는 0.7 mg/L - 5.7 mg/L의 범위를 보였으며, TP 농도는 1.3 mg/L - 3.4 mg/L의 범위를 보였다.

한편, 초지유역의 말단에 조성한 식생여과대에서 강우 시 유량, SS, COD, TN, TP의 유출입량을 산정하고, 이를 통해 식생여과대에서의 오염부하량

저감효율을 분석하였다. 식생여과대에서의 유량 저감효율은 10 m 폭으로 조성된 식생여과대에서 2.5%, 20 m 폭으로 조성된 식생여과대에서는 32.1%로 분석되었다. SS의 저감효율은 10 m 식생여과대에서 39.8%, 20 m 식생여과대에서 52.7%로 분석되었으며, COD의 저감효율은 10 m 식생여과대에서 10.4%, 20 m 식생여과대에서 37.7%로 분석되었다. TN의 저감효율의 경우, 10 m 식생여과대에서 저감효과를 보이지 않았으며, 20 m 식생여과대에서 17.8%로 분석되었으며, TP의 저감효율은 10 m 식생여과대에서 14.2%, 20 m 식생여과대에서 57.4%로 분석되었다(Table 3). 분석결과를 종합해 보면, 식생여과대에서 전반적으로 오염물질의 저감효과가 나타났으며, 저감효과는 10 m 폭으로 조성된 식생여과대보다 20 m 폭으로 조성된 식생여과대에서 상대적으로 우수한 것으로 분석되었다. 다만, 10 m 폭으로 조성한 식생여과대에서의 TN은 저감효과를 보이지 않았다. 초지로 조성된 식생여과대에서 지표유출로 인한 유사, 입자성 인과 질소 등의 저감효과는 높지만, 용존성 영양염의 저감효과는 상대적으로 낮다고 보고되고 있으며(Parkyn 2004), 본 연구에서 실시한 모니터링 분석결과에서도 SS와 TP의 저감효율이 상대적으로 높은 것으로 분석되었다.

2. 모델 보정

초지유역과 식생여과대에서 관측한 유량과 수질

Table 4. General PBIAS (%) performance ratings for recommended statistics for a monthly time step (Moriassi et al. 2007)

Performance rating	Sediment	N, P
Very good	$PBIAS < \pm 15$	$PBIAS < \pm 25$
Good	$\pm 15 < PBIAS < \pm 30$	$\pm 25 < PBIAS < \pm 40$
Satisfactory	$\pm 30 < PBIAS < \pm 55$	$\pm 40 < PBIAS < \pm 70$
Unsatisfactory	$PBIAS > \pm 55$	$PBIAS > \pm 70$

농도 자료를 이용하여 모델 보정을 수행하였다. 모의 기간은 2015년 1월 1일부터 12월 31일까지 1년간으로서, 1시간 단위의 시간간격으로 연속 모의하였으며, 시행착오법을 사용하여 유량, SS, COD, TN, TP 농도의 순서로 모델 보정을 수행하였다. 그러나, 2015년의 강우량은 981.9 mm로서 2005년 - 2015년 평균 강우량 1406.1 mm의 69.8 %에 불과한 수준이어서 강우유출이 거의 발생하지 않아 1년 동안 단 1회의 강우사상에 대해서만 유의미한 유량과 수질을 관측할 수 있었다. 결과적으로, 이로 인한 관측치의 부족은 모델의 신뢰성 확보에 제한조건으로 작용하였다.

보정에 따른 모의결과의 현실 재현성은 결정계수 R^2 와 PBIAS (Percent bias)를 사용하여 정량적으로 평가하였다. R^2 는 모의치가 관측치의 경향을 어느 정도 반영하고 있는지를 나타내며, 하천 유량의 경우 일반적으로 R^2 가 0.5이상일 때 양호(acceptable)한 것으로 평가한다. PBIAS는 모의치가 관측치보다 과대 또는 과소 평가되었는지의 평균 경향성을 판단하며(Gupta et al. 1999), Moriassi et al.(2007)은 월단위 모의결과를 평가하기 위한 유사와 영양염류의 기준을 Table 4와 같이 제시한 바 있다. 일반적으로, 모의결과를 월단위로 평가하면 일단위 또는 시간단위에서의 시간 변동성이 상쇄되기 때문에 동일한 기

준이라면 일단위 또는 시간단위보다 월단위 평가기준을 충족시키기가 상대적으로 용이하다. 즉, 월단위 평가기준을 일단위 또는 시간단위 평가에 적용하면 그 기준을 충족시키기가 상대적으로 어려워진다. 본 연구에서는 1시간 단위의 모의치를 그에 상응하는 관측치와 직접 비교하여 평가한 것이기 때문에 Moriassi et al.(2007)의 월단위 평가기준을 시간단위에 적용함으로써 훨씬 엄격한 기준으로 평가하는 의미가 있다.

초지구역에서 모델 보정에 따른 모의유량과 관측유량 사이의 R^2 값은 0.01로 매우 낮고, 관측유량의 강우유출률이 5.0%로 매우 낮은 것으로 분석되었다(Figure 5(a)). 이는 강우 초기에 유출이 발생했다가 이후에는 합리적으로 반응하지 않았기 때문인데, 강우 초기에 강우유출수와 함께 이동한 유사에 의해 플룸의 수위 관측공이 막혀서 발생한 오류인 것으로 판단된다. 반면, 모의유량의 경우 강우유출률이 65.2%로서 국내의 일반적인 유역에서 나타나는 유출률 범위 내에 있는 것으로 판단되며, 강우량과의 R^2 값이 0.62로 상대적으로 강우의 패턴에 합리적으로 반응하는 것으로 판단된다. 한편, 식생여과대에서의 모델 보정에 따른 모의유량과 관측유량 사이의 R^2 값은 0.43으로 산정되었다. 본 연구에서의 모의결과가 시간 단위임을 고려할 때 모의유량이 관측유량에 대한

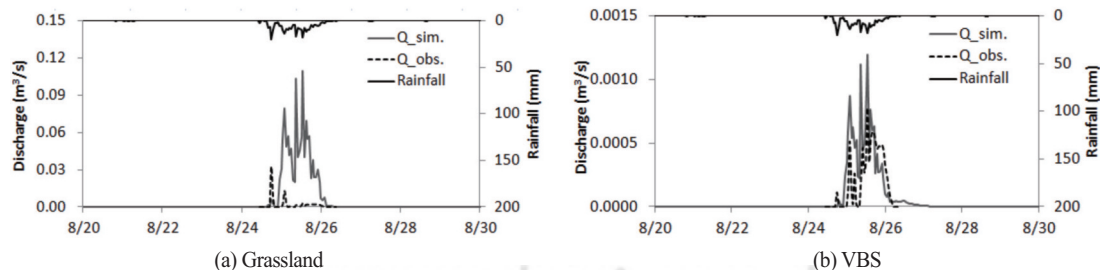


Figure 5. Observed and simulated hydrographs

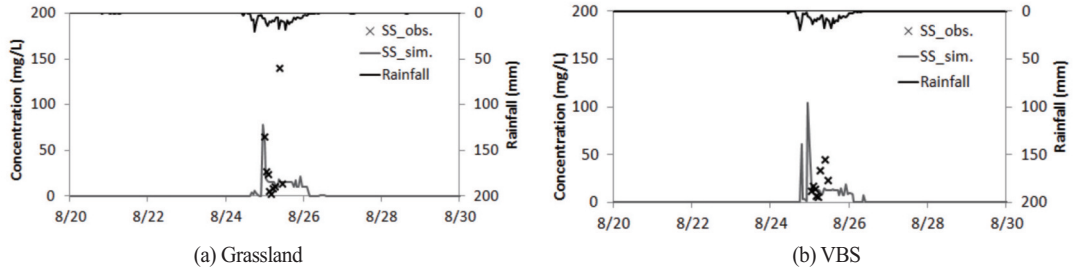


Figure 6. Observed and Simulated SS concentrations

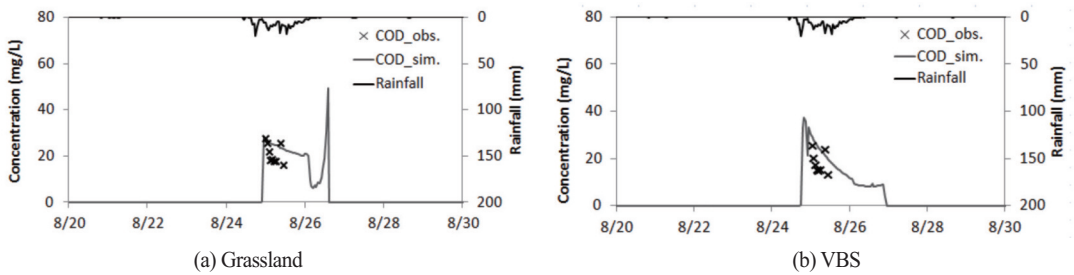


Figure 7. Observed and Simulated TOC concentrations

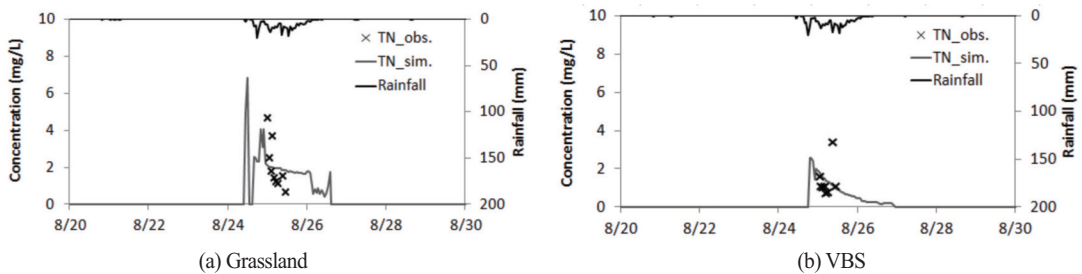


Figure 8. Observed and Simulated TN concentrations

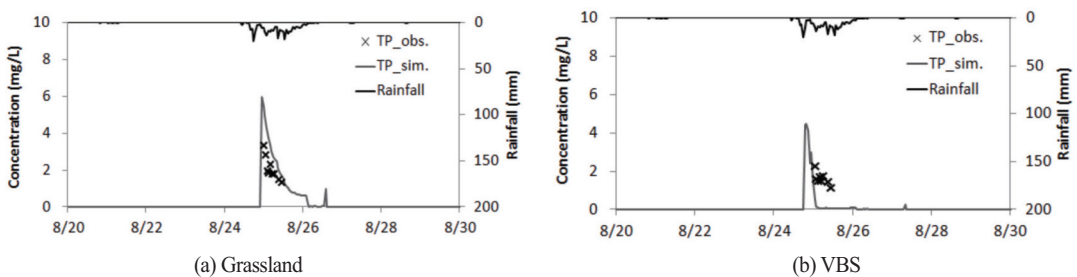


Figure 9. Observed and Simulated TP concentrations

기저유량 및 침투유량의 크기와 시간을 합리적으로 재현하는 것으로 나타났다(Figure 5b). 유량 보정의 주요 매개변수로 토양의 포화수리전도도 K_{sat} , 증발산에 영향을 미치는 작물계수 K_{co} , 하천 유속에 영향

을 미치는 매닝계수 N_m , 대공극 발달계수 M_p 를 선정하여 유량 보정을 수행하였다.

모델 보정 결과, SS, COD, TN, TP 농도의 PBAIS 값은 초지유역에서 각각 36.7%, 18.7%, 5.4%, 66.2%

로 산정되었으며, 식생여과대에서 각각 31.9%, 35.4%, 4.3%, 91.9%로 산정되었다(Figure 6 - Figure 9). Moriassi et al.(2007)가 제시한 월 단위 평가기준에 따르면 식생여과대에서 TP 농도를 제외하고는 전반적으로 매우 양호(Very good)에서 만족(Satisfactory) 기준 범위 내에 값이 존재하는 것으로 나타났다. 릿과 하천에서 유사 이동이 시작되는 단위 수류력(unit stream power) ω , 릿과 하천에서 부유사와 소류사 이동량과 관계되는 쉴드 파라미터 임계값(critical value of Shield's parameter) τ^*_c , 지표면과 하천의 유속에 영향을 미치는 매닝계수 N_m 을 주요 매개변수로 선정하고 모델 보정을 수행하였다. 본 연구는 제한적인 관측치를 이용하여 모델 보정을 수행한 것이므로 향후 지속적인 모니터링 결과를 확보하여 모델의 신뢰성을 확보할 필요가 있는 것으로 사료된다.

3. 식생여과대 시나리오 모의결과

다수의 시험격자를 이용한 시나리오의 모의기간은 2015년으로 설정하였으며, 시나리오별 초지에서 유입하는 유량, SS, TOC, TN, TP 연간 부하량에 대한 식생여과대에서의 저감효율을 평가하였다. 유량 모의결과, 식생여과대에서 강우의 직접유출량은 식생여과대 폭이 넓어질수록 감소하며, 시험격자의 경사도가 높아질수록 증가하는 것으로 나타났다(Figure 10, Figure 15). 강우량 대비 유출률은 사양토에서는 0.006 - 0.145의 범위를, 양토에서는 0.016 - 0.113의 범위를 보이는 것으로 분석되었다.

오염물질의 저감효율은 전반적으로 경사가 높을수록 낮아지는 것으로 나타났다. 식생여과대에서 유사 저감효율은 사양토에서는 75.3% - 98.4%의 범위로 나타났으며, 양토에서는 12.8% - 58.4%의 범위로 나타나 전반적으로 사양토에서의 유사 저감효율이

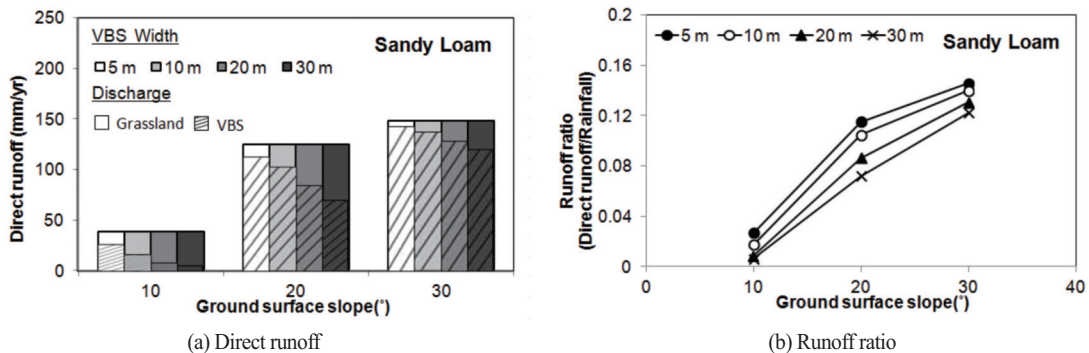


Figure 10. Annual direct runoff and runoff ratio simulated for various slopes and widths of VBS of sandy loam soil

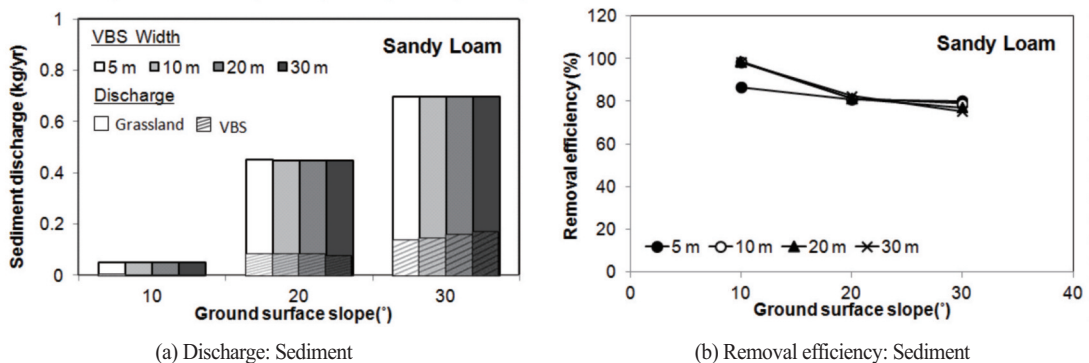


Figure 11. Annual sediment discharge and removal efficiency simulated for various slopes and widths of VBS of sandy loam soil

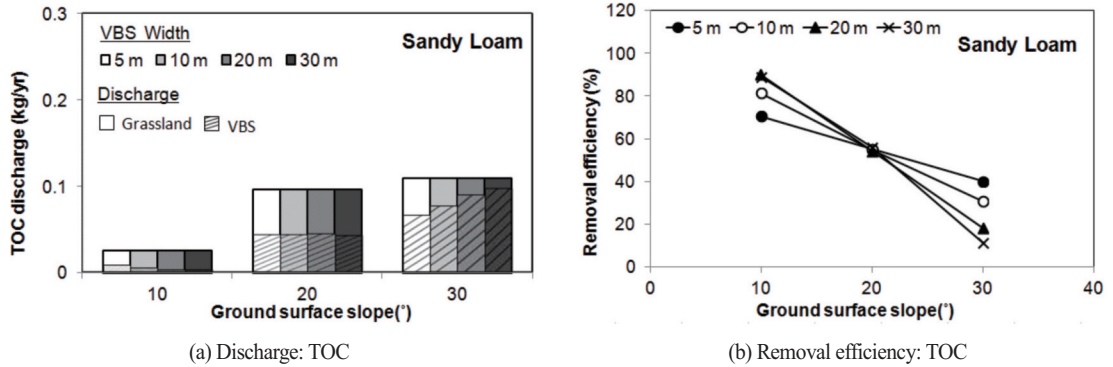


Figure 12. Annual TOC discharge and removal efficiency simulated for various slopes and widths of VBS of sandy loam soil

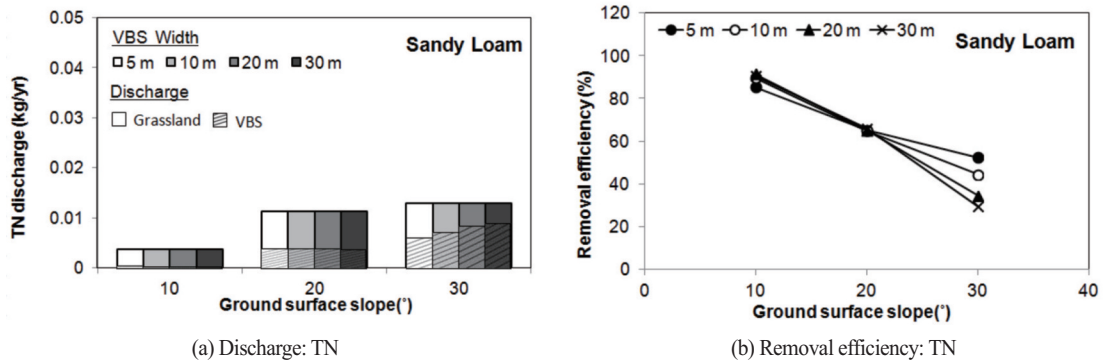


Figure 13. Annual TN discharge and removal efficiency simulated for various slopes and widths of VBS of sandy loam soil

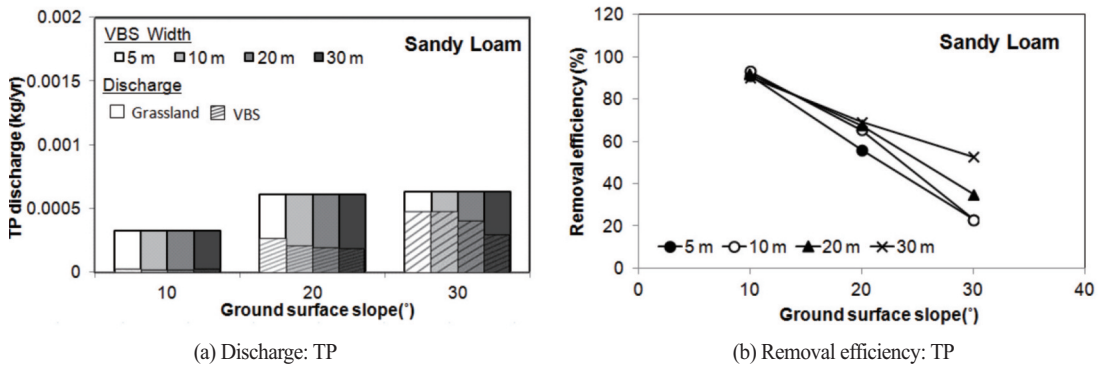


Figure 14. Annual TP discharge and removal efficiency simulated for various slopes and widths of VBS of sandy loam soil

상대적으로 높은 것으로 분석되었다(Figure 11, Figure 16). 식생여과대 폭에 따른 유사의 저감효율은 전반적으로 큰 차이를 보이지 않았으나 경사도에 따른 저감효율은 토양에 따라 서로 다른 양상을 보이는 것으로 분석되었다. 사양토에서는 경사도가 높아

질수록 저감효율이 상대적으로 감소하는 경향을 보이는 반면, 양토에서는 경사도가 높아질수록 저감효율이 상대적으로 증가하는 경향을 보여주었다. 특히, 양토에서 경사도가 낮을 때 유사 저감효율이 상당히 낮게 나타났는데, 이는 강우의 토양침투능력이 상대

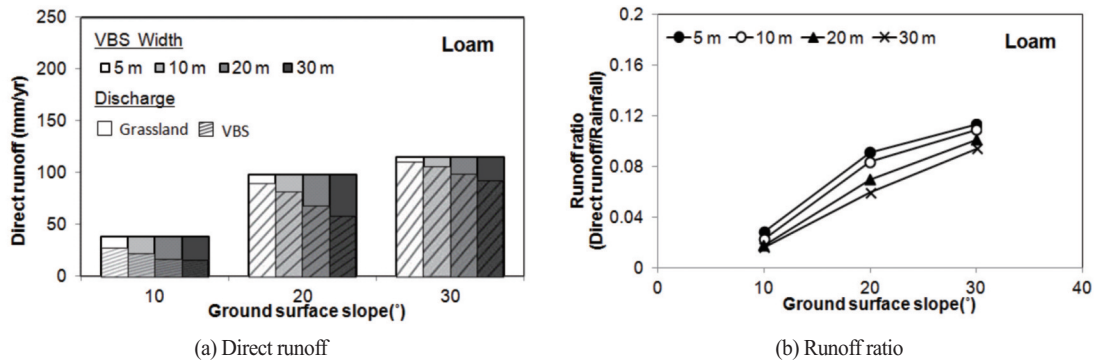


Figure 15. Annual direct runoff and runoff ratio simulated for various slopes and widths of VBS of loam soil

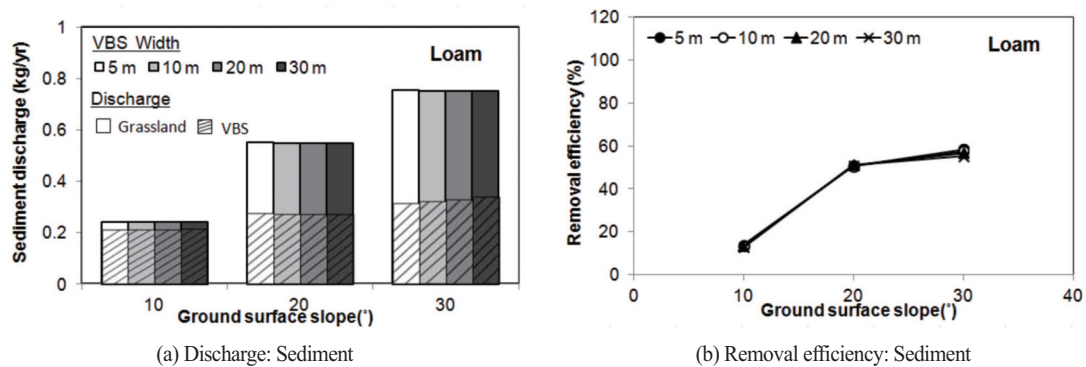


Figure 16. Annual sediment discharge and removal efficiency simulated for various slopes and widths of VBS of loam soil

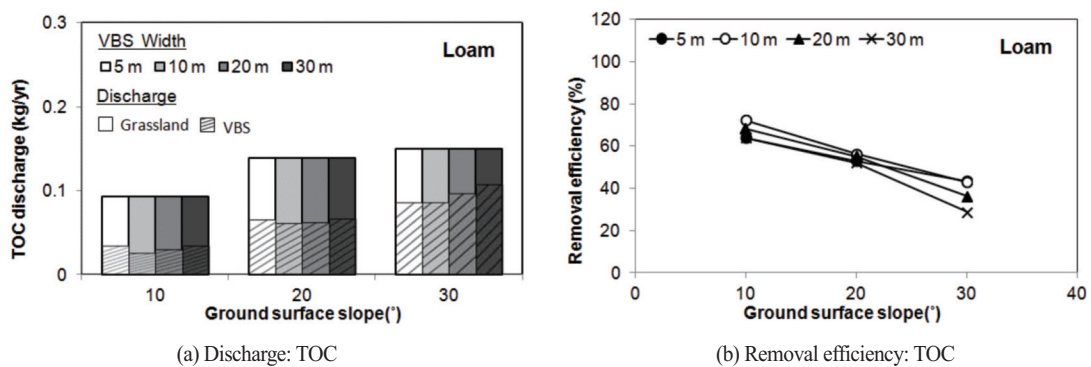


Figure 17. Annual TOC discharge and removal efficiency simulated for various slopes and widths of VBS of loam soil

적으로 낮아 발생한 지표면 유출수의 영향 때문인 것으로 판단된다. 경사가 10°일 경우, 식생여과대에서 사양토와 양토에서 강우의 지표면 유출량(Surface runoff)이 각각 평균 0.9 mm/yr, 12.4 mm/yr로 양토에서 지표면 유출량이 상대적으로 큰 것으로 분석되었다.

식생여과대에서 TOC 저감효율은 사양토에서는 11.3% - 89.9%의 범위로 나타났으며, 양토에서는 28.7% - 72.3%의 범위로 나타났다(Figure 12, Figure 17). TN 저감효율은 사양토에서는 29.4% - 91.4%의 범위로 나타났으며, 양토에서는 53.5% - 84.1%의 범위로 나타났다(Figure 13, Figure 18).

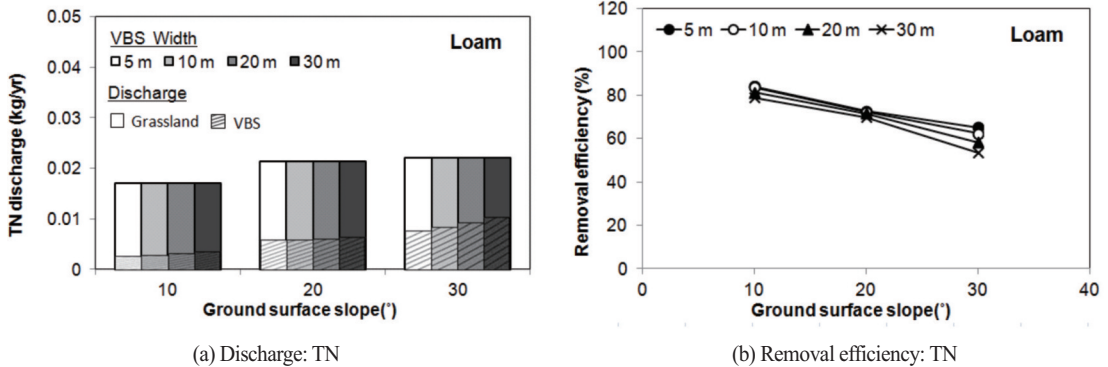


Figure 18. Annual TN discharge and removal efficiency simulated for various slopes and widths of VBS of loam soil

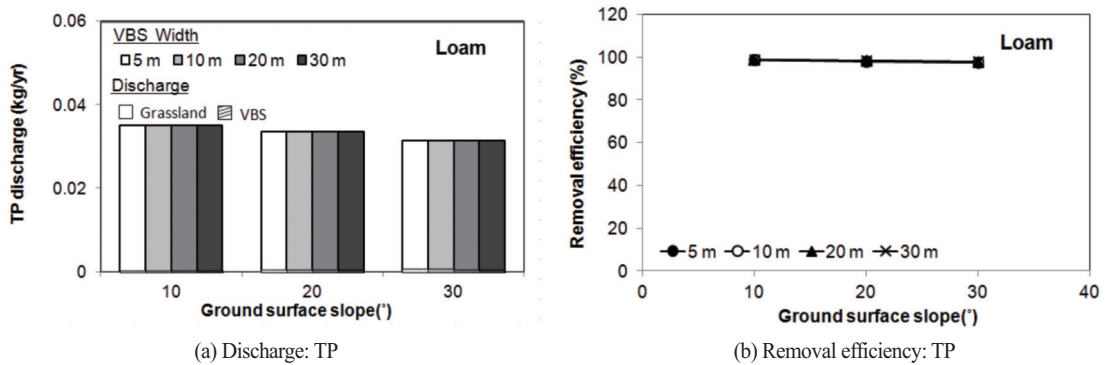


Figure 19. Annual TP discharge and removal efficiency simulated for various slopes and widths of VBS of loam soil

시험격자의 경사가 10°, 20°일 때, 식생여과대 폭에 따른 저감효율은 큰 차이를 보이지 않았으나, 시험격자의 경사가 30°일 경우, 식생여과대 폭에 따른 TOC와 TN의 저감효율의 차이가 명확히 나타났으며, 이때, 식생여과대 폭이 좁을수록 높은 저감효율을 보이는 것으로 분석되었다. 이는 경사도가 높을 때에는 식생여과대 폭이 넓어질수록 식생여과대 자체에서 유출되는 오염물질의 유출량도 상대적으로 많아지기 때문인 것으로 판단된다.

식생여과대에서 TP 저감효율은 사양토에서는 22.9% - 92.9%의 범위로 나타났으며, 양토에서는 97.6% - 98.8%의 범위로 나타났다(Figure 14, Figure 19). TP의 저감효율이 사양토보다 양토에서 높게 나타난 것은 점토에 대한 흡착성이 강한 인의 특성으로 인해 점토질 입자가 많은 양토에서 인의 흡착량이 많은 것으로 모의되었기 때문으로 분석되었

다. 양토에서는 전반적으로 높은 저감효율을 보여주었으며, 사양토에서도 경사가 10°인 경우, 90%의 이상의 높은 저감효율을 보여주었다. 다만, 사양토에서는 시험격자의 경사가 20°, 30°일 경우, 식생여과대 폭이 넓어질수록 높은 저감효율을 보이는 것으로 분석되었다. 이는 TOC와 TN의 모의결과와는 상반되는 결과이며, 대부분 입자성 물질로 존재하는 인의 경우 지표면에서의 포착현상으로 인해 길이에 따라 비례적으로 유출량이 감소하는 경향을 보이는 것으로 사료된다.

IV. 결론

본 연구에서는 강원도 평창군 대관령면에 위치한 산지초지를 대상으로 유역의 말단에 식생여과대를 조성하고, 초지유역과 식생여과대에 분포형 유역모델 CAMEL을 적용하였다. 대상지역에서 강우 시 유

량과 수질모니터링을 수행하였으며, 이들 자료를 이용하여 모델 보정을 수행하였다. 모델 보정의 결과가 전반적으로 유역모델의 평가기준 내에 존재하지만 2015년을 기준으로 1년의 모의기간 중 특정일에 관측된 시간단위의 수질농도의 경향성을 재현하였기에 향후 지속적인 모니터링 결과를 확보하여 모델의 신뢰성을 더욱 증가시켜야 할 것으로 사료된다. 모델 보정을 통해 확보한 매개변수는 초지와 식생여과대로 구분한 다수의 시험격자에 적용하여 경사와 토성이 서로 다른 환경에서의 식생여과대 폭의 변화에 따른 식생여과대 오염부하량 저감효율을 분석하였다. 시험격자의 토양은 사양토(Sandy loam)와 양토(Loam) 2가지의 토성이 분포하는 경우를 구성하였으며, 경사도는 10°, 20°, 30°의 3가지, 식생여과대 폭은 5 m, 10 m, 20 m, 30 m로 조성하는 경우에 대한 4가지 경우를 포함하여 총 24개의 시나리오에 대한 모델을 구축하고 모의를 수행하였다. 시나리오 모의결과, 식생여과대에서 강우의 직접유출량은 식생여과대 폭이 넓어질수록 감소하는 것으로 나타났으며, 전반적으로 경사가 높을수록 오염물질의 저감효율은 낮아지는 것으로 나타났다. 유사한 경우, 식생여과대 폭에 따른 저감효율은 전반적으로 큰 차이를 보이지 않았다. TOC와 TN의 경우, 시험격자의 경사가 10°, 20°일 때, 식생여과대 폭에 따른 저감효율은 큰 차이를 보이지 않았으나, 시험격자의 경사가 30°일 때 식생여과대 폭이 좁을수록 높은 저감효율을 보였다. 반면, TP의 경우, 양토에서의 저감효율은 전반적으로 높지만, 사양토에서는 경사가 20°, 30°일 때 식생여과대 폭이 넓을수록 높은 저감효율을 보이는 것으로 분석되었다. 이는 TOC와 TN의 모의결과와는 상반되는 결과로 대부분 입자성 물질로 존재하는 인의 경우 지표면에서의 포착현상으로 인해 길이에 따라 비례적으로 저감효율이 높아지는 경향을 보이는 것으로 사료된다. 본 연구에서 구축한 모델은 향후 비점오염물질의 유출을 효과적으로 저감할 수 있는 식생여과대 조성을 위한 기준 등을 제안하는 데에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ010013032016)의 지원으로 수행된 연구의 결과물입니다.

References

- Chaubey I, Chiang L, Gitau MW, Mohamed S. 2010. Effectiveness of BMPs in improving water quality in a pasture dominated watershed. *J. Soil Water Conserv.* 65: 424-437.
- Gupta H, Sorooshian S, Yapo P. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143.
- Koo BK. 2010, Introduction to CAMEL, unpublished presentation material.
- Koo BK, Dunn SM, Ferrier RC. 2005. A distributed continuous simulation model to identify critical source areas of phosphorus at the catchment scale: model description. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions.* 2(4): 1359-1404.
- Lee JW, Eom JS, Kim BC, Jang WS, Ryu JC, Kang HW, Kim KS, Lim KJ. 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. [Korean Literature]
- Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2013. The pilot project plan for promoting pasture in hilly areas. [Korean Literature]
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, Bingner RL, Harmel RD, Veith TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic

- quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE. 50(3): 885-900.
- National Institute of Environmental Research. 2012. Guidelines for Non-point Source Management. [Korean Literature]
- National Institute of Environmental Research. 2014. Technical Guidelines for TMDL Management (2014). [Korean Literature]
- NRCS. 1999. The National Conservation Buffer Initiative; National Resource Conservation Service USDA: Washington DC, 53.
- Parajuli PB, Mankin KR, Barnes PL. 2008. Applicability of targeting vegetative filter strips to abate fecal bacteria and sediment yield using SWAT. Agricultural water management. 95: 1189-1200.
- Park MH, Cho HL, Koo BK. 2015. Development of a vegetation buffer strip module for a distributed watershed model CAMEL. Journal of the Korean Society of Environmental Impact Assessment. 24(5): 516-531. [Korean Literature]
- Parkyn S. 2004. Review of riparian buffer zone effectiveness (No. 2004-2005). Ministry of Agriculture and Forestry.
- Park YS, Kim JG, Kim NW, Park JH, Jang WS, Choi JD, Lim KJ. 2008. Improvement of Sediment Trapping Efficiency Module in SWAT using VFSSMOD-W Model. Journal of Korean Society on Water Quality. 24(4): 473-479. [Korean Literature]
- Sheshukov AY, Douglas-Mankin K, Daggupati P. 2009. Evaluating Effectiveness of Unconfined Livestock BMPs using SWAT. Proceedings of the 5th International SWAT Conference, Boulder, CO, Aug 5-7.
- Strohmeier K. 2002. Vegetative filter strips. Owen County Extension Agent for Agriculture and Natural Resources.
- The Water Environment (Diffuse Pollution) (Scotland) Regulations. 2008. http://www.opsi.gov.uk/legislation/scotland/ssi2008/pdf/ssi_20080054_en.pdf (accessed Feb 2009).