

Research Paper

유역모델 CAMEL 기반 식생여과대 모듈의 개발

박민혜 · 조홍래 · 구본경

(주)하이드로코어

Development of a Vegetation Buffer Strip Module for a Distributed Watershed Model CAMEL

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

HydroCore Ltd.

요약 : 본 연구에서는 분포형 유역모델이면서, 국내 환경에 적합하도록 개발된 CAMEL에 기반하여 식생여과대 효과분석을 위한 모듈을 개발하였다. 식생여과대의 주요 모의기능은 기존의 CAMEL과 동의하나 릿에서의 유사포착 현상과 수평둔덕을 추가로 설계하여 모듈에 반영하였다. 식생여과대 모듈을 검증하기 위하여 시험 격자를 이용하여 식생여과대의 길이, 조도계수, 토성, 식생의 높이 및 뿌리 깊이 등 다양한 매개변수에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 식생여과대 모듈의 민감도 분석결과를 종합해 보면, 유사 지표유출량은 조도계수 변화에 따라 민감하게 반응하였으며, 전반적으로는 유사와 TP의 지표유출량 저감률이 시나리오 변화에 상관없이 전반적으로 높은 것으로 분석되었다. TOC, TN의 저감률은 식생여과대의 길이, 토성변화에 따라 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 유사와 TP의 지표유출량 저감률에 비해 상대적으로 저감률이 낮은 것으로 분석되었다. 본 연구에서 개발된 식생여과대 모듈은 환경변화에 따른 오염물질 저감효과를 합리적으로 재현하는 것으로 나타났으며, 향후 식생여과대 조성 지역에 적용되어 비점 오염 물질 제거 효과를 정량적으로 산정하고 효율적인 관리방안을 평가하는데 기여할 것으로 기대된다.

주요어 : 유역모델 CAMEL, 식생여과대, 민감도 분석

Abstract : In this study, a software module to predict the effectiveness of vegetation buffer strip (VBS) has been developed for using with Chemicals, Agricultural Management and Erosion Losses (CAMEL), a distributed watershed model. Most basic functions for the VBS module are same as CAMEL except functions newly developed to implement sedimentation enhancement by vegetation and level spreaders. For verification of the VBS module, sensitivity analyses for length, roughness, soil and vegetation type of VBS were carried out using a test grid cell. The surface discharge of sediment are highly sensitive to the roughness coefficient of VBS. The removal efficiencies of VBS for the surface discharges of sediment and TP are generally high regardless of environment changes. The surface discharges of TOC and TN are highly sensitive to the length and soil of VBS. The

removal efficiencies of VBS for the surface discharges of TOC and TN are generally lower than those of sediment and TP. The newly developed VBS module reasonably simulates the removal efficiencies of surface discharges that vary according to the environment changes. It is expected that this VBS module can be used for evaluating the effectiveness of VBS-based best management practices to be applied to reduce pollution discharges from various non-point sources.

Keywords : Watershed model CAMEL, Vegetation buffer strip, Sensitivity analysis

I. 서론

2012년 기준 우리나라의 곡물자급률은 23.6%로 1990년 43.1%를 기록한 이후로 지속적으로 하락하고 있다(농림수산식품부, 2013). 특히, 사료곡물의 많은 양을 수입에 의존하고 있으며, 조사료의 수입량이 2010년 90.6만 톤에서 2012년 112.0만 톤으로 점차 증가하는 추세를 보이고 있다(농촌진흥청, 2014). 이러한 추세는 식량안보에 대한 사회적인 우려와 함께 국제 곡물가 상승으로 인한 농가의 경영부담을 가중 시킨다. 따라서 고가의 조사료 수입량을 감소시킬 수 있는 대안이 요구되며, 우리나라 국토의 64%가 산지임을 감안할 때, 산지에 목초지를 조성함으로써 사료용 곡류 생산의 자급률을 높이는 방안이 현실적으로 검토되고 있다.

그러나 산지에 목초지를 조성할 경우 식생과 지형이 변동되기 때문에 이에 따른 생태, 대기, 수질 등에 서의 다양한 환경변화가 예상된다. 특히, 목초지에서 유실되는 토양과 비점오염 물질이 하천의 수질에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 이러한 악영향을 사전에 방지하기 위해 초기조성에 따른 환경변화를 정량적으로 평가하고, 이를 제어할 수 있는 방안에 대한 분석이 요구된다. 목초지에서 유입되는 비점오염 물질을 저감하는 방안으로 하천과 농경지 또는 목초지 사이에 식생여과대(Vegetation Buffer Strip: VBS)를 조성하는 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다. 식생여과대는 입자의 포착(trap)과 수착을 통해 하천으로 이동하는 토사와 영양염을 저감시키며, 제방을 안정화하고, 생물다양성을 증가시키는 역할을 한다(Stutter *et al.*, 2009). 또한, 단기간에 조성 가능하며, 저감효과도 높은 것으로 보고되고 있다(Strohmeier, 2002). 그리고 5 ~ 15 m 정도의 너비

의 식생여과대는 농경지에 비용 효과적으로 조성 가능하다. 이러한 이유로 영국, 유럽, 미국에서는 식생여과대 관련 내용을 법률로 제정하고 있다(The Water Environment Regulations, 2008; NRCS, 1999). 국내에서는 경기도 양평군 남한강 좌안 홍수터에 시험완충지를 조성하고, 실내실험과 병행하여 식생여과대의 오염정화효과와 서식처로서의 기능을 분석한 바 있다. SS, 질소, 인의 경우 나대지는 각각 72%, 30%, 45%, 초본의 경우 각각 85%, 48%, 54%로 나타나 식생에 의한 저감효과의 향상을 증명하였으며, 시험지를 잔디, 갈대, 갯버들, 자연지, 혼합지로 구성하여 저감효율을 분석한 결과 유입된 오염부하를 평균적으로 약 50%이상 저감하는 것으로 나타났다(한강수계관리위원회, 2007). 많은 연구들이 식생여과대의 저감효과는 식생여과대의 길이, 식생의 종류, 경사 등에 영향을 받는다고 보고하였다(Parajuli *et al.*, 2008). 일부 연구들은 여과대의 길이가 유사 저감효과의 중요한 인자라고 보고하였지만(Munoz-Carpena *et al.*, 1999; Helmers *et al.*, 2006), 일부 연구들은 식생여과대의 길이가 10 m 이상일 경우 유사의 저감효율은 크게 증가하지 않는다고 보고한 바 있다(Lee *et al.*, 2003; Zreig *et al.*, 2004; Gharabaghi *et al.*, 2002). 식생여과대의 효과적인 저감효과에도 불구하고 극한 강우 사상에 대한 여과대의 유지가능성, 식생여과대에서의 인(Phosphorus)의 장기간 저장능에 대한 불확실성은 여전히 남아있다(Dorioz *et al.*, 2006). Stutter *et al.*(2009)은 식생여과대 토양에서 인을 증가시키는 생화학적 과정을 상쇄하기 위해서는 식생의 수확 등에 있어 전략적인 관리가 이루어져야 한다고 보고하였다. 이러한 연구내용을 종합해 볼 때, 식생여과대 조성에 따른 비점오염물질 저감효과와 효율적인

관리방안을 평가할 수 있는 과학적 도구가 요구되며, 이에 대한 가장 효과적이고 정확한 방법으로 유역모델이 다양한 연구에 적용되고 있다. 유역모델은 유역 프로세스에 영향을 미치는 상호작용과 메커니즘에 대한 이해를 증진시키며, 자원 관리자를 위한 의사결정지원도구으로써 활용될 수 있다(Addisscott, 1993, 1994; Burrough, 1995). 박윤식 등(2008)은 식생여과대의 폭만을 고려하여 유사저감 효율을 산정하는 SWAT 모델의 유사저감 효과 모듈을 개선하기 위해 VFSMOD-W 모형을 이용하여 식생여과대 폭, 강우에 따른 유출, 식생에 관한 인자가 유사 저감 효과에 미치는 영향을 파악하였다. 민감도 분석 결과, 시험포로부터 식생여과대로 유입하는 유출량과 식생대의 폭이 유사 저감 효율에 미치는 영향이 큰 것으로 보고하였다. Chaubey *et al.*(2010)은 목초지의 비율이 높은 Lincoln 호 유역의 수질 향상을 위해 SWAT 모델을 적용하여 총 171개의 다양한 최적관리방안(Best Management Practices: BMPs) 시나리오에 대한 저감효과를 평가하였으며, 그 중 식생여과대 조성 및 방목관리에 관한 BMP가 목초지역에서의 TN과 TP 저감에 가장 효과적이라고 분석하였다. Sheshukov *et al.*(2009)은 시험유역에 SWAT 모델을 적용하여 가축 방목에 대한 BMP 효과를 평가하였다. 시험유역 내 펜스(fence)와 가축 음수대 설치 위치 등에 따라 총 9개의 조합 시나리오를 구성하였으며, 펜스를 하천변에 설치하는 것이 오염물질 제어에 가장 효과적인 대안으로 제시하였다.

위의 연구사례에서 살펴본 바와 같이 국내외에서 미국 농무성의 농업연구국(Agricultural Research Services, ARS)에서 개발한 SWAT 모델을 식생여과대의 효과를 평가하는데 널리 활용하고 있다. 그러나 SWAT과 같이 대상지역을 소유역 단위로 분할하여 구동하는 준분포형 모델은 식생여과대에서 나타나는 공간적 특성을 세분화하여 묘사하는 데 한계가 있다. 식생여과대에서의 수문과 수질 프로세스는 식재되는 식생, 토양 등에 따라 훨씬 복잡한 양상을 보인다. 따라서 유역모델을 이용하여 식생여과대를 모의하기 위해서는 대상유역을 일정한 크기 단위로 분할하고 각 단위 사이의 물질이동 과정을 명시적으로 나타낼

수 있는 분포형 유역모델이 더 적합할 것으로 사료된다. 한편, 모델들은 저마다 사용목적과 연구자에 따라 기능구현에 대한 접근 방법이 다르고 복잡성도 차이를 보인다. 따라서 연구목적에 정확히 부합하는 모델을 찾기가 쉽지 않으며, 기존의 모델에 필요한 기능을 추가적으로 수정·보완하여 모델의 성능을 개선시키는 작업이 필요하다. 본 연구에서는 분포형 유역모델이면서, 국내 환경에 적합하도록 개발된 CAMEL(Koo *et al.*, 2005)에 기반하여 식생여과대 기능을 구현할 수 있는 모듈을 개발하였으며, 다양한 인자들에 대한 검증작업을 실시하였다.

II. 재료 및 방법

1. CAMEL 모델 개요

CAMEL은 분포형 유역모델로서 소규모 유역에 적용하여 지표수, 중간류 및 지하수 유동을 통한 물과 오염물질의 이동 및 물질수지를 분석할 수 있도록 개발되었다(Koo *et al.*, 2005). CAMEL은 대상 유역을 임의 크기의 정방형 격자기동으로 분할하고 각 격자에서의 물질수지를 1 분에서 1 시간까지의 시간단위로 계산한다. 각 정방형 격자기동은 수직 방향으로 토양층과 상하부 대수층으로 구분되며 모델 내에서 직육면체 형태의 개별적 격자기동 구조를 cell이라고 정의한다. 각각의 cell은 최대 8개의 인접 cell을 가질 수 있으며, 그중 다수의 상류 cell과 1개의 하류 cell을 갖는다. Cell 중앙에는 직사각형 단면의 하천 또는 원형, 사각의 우하수관거 등의 물길이 존재하는 것으로 가정한다(Figure 1).

CAMEL은 지표수의 유동을 정상류(steady flow)로 해석하며, 지하수의 유동을 2차원 동력학적으로 해석한다. 유역의 수문과정을 모의하기 위해 수관, 토양, 대수층, 하천 4개의 저장소를 이용하며, 대수층은 다시 2개의 층으로 구분한다. 상부대수층은 지하수의 유동 속도가 큰 풍화대를 표현하고, 하부대수층은 지하수 유동 속도가 낮은 1차 또는 2차 절리층을 표현한다(Koo *et al.*, 2005). CAMEL에서 토양 유실 및 이동 과정은 육상과 하천에서 모두 발생하

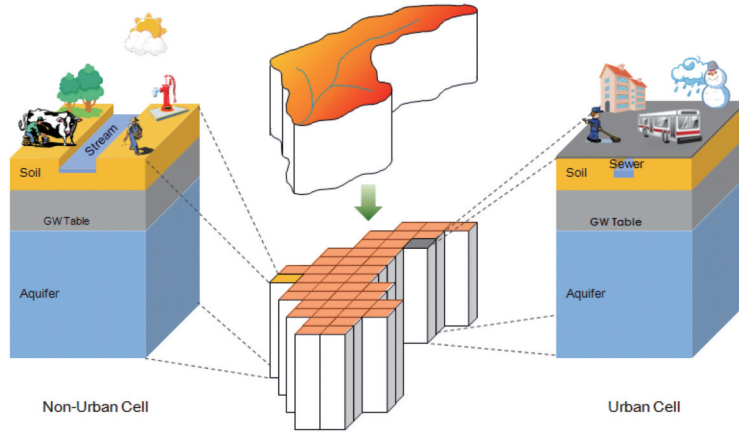


Figure 1. watershed representations in a distributed watershed model CAMEL(Koo, 2010)

Table 1. A short descriptions of the main modules of CAMEL (Koo, 2010)

Modules	Descriptions
Hydrological cycle	<ul style="list-style-type: none"> - Surface and subsurface processes integrated - Energy balance (soil and water temperature) - Some hydraulic features common in Korean taken into account (e.g. paddy fields, reservoirs, weirs and stream banks) - Sewage collection and overflows (CSOs and SSOs)
Sediment transport	<ul style="list-style-type: none"> - Four particle size classes: clay, silt, fine sand and coarse sand - Suspended load and bed load - Pollutants build-up and wash-off, street cleaning
Carbon cycle	- BOD, DO, DOC, POC and CO ₂ simulated for soil and water
Nitrogen cycle	- DON, PON, DIN (NO ₃ , NH ₄) and PIN simulated for soil and water
Phosphorus cycle	- DOP, POP, DIP (PO ₄) and PIP simulated for soil and water

며, 유사(sediment) 공급 효과를 모의하기 위해 육상(interrill), 릴, 하천 3개의 유사 저장소를 정의한다. 이들 각 저장소는 유사 입도에 따라 다시 clay(유효입경 1 μm), silt(유효입경 10 μm), fine sand(유효입경 100 μm) 및 coarse sand(유효입경 1000 μm) 등 4개의 저장소로 구분된다. 한편, 토양, 지표수, 지하수 중 탄소, 질소, 인의 변환과 이동을 모의하기 위해 Litter, Manure, Humus, Biomass의 4개 유기물 저장소를 정의한다. 토양 내 탄소, 질소, 인의 순환과정은 1차 운동 방정식으로 표현되며, 이들 방정식은 4th-order Runge-Kutta 기법을 이용하여 해석된다. CAMEL의 주요 모의 기능은 Table 1과 같다.

2. 식생여과대 모듈개발

식생여과대에서의 비점오염물질 저감효과를 평가

하기 위해 CAMEL의 추가기능으로 식생여과대 모듈을 개발하였다. 식생여과대의 주요 모의기능은 기존의 CAMEL과 동의하나 릴에서의 유사포착 현상과 수평둔덕(level spreader)을 추가로 설계하여 모듈에 반영하였다.

Tollner *et al.*(1976)는 particle fall number(N_f)와 turbulent Reynold's Number(R_e) 변수를 이용한 식생여과대에서의 유사포착 예측식을 각각 제시한 바 있다. 이 중 N_f 변수를 이용한 유사포착 산정식 Equation 1과 Equation 2를 CAMEL의 식생여과대 모듈에 반영하였다. 이 때, 사용자가 보정 가능한 $N_{t,x}$ 함수를 추가로 적용하여 Equation 2를 Equation 3과 같이 수정하여 반영하였다. 여기서, ST(%)는 유사포착효율(trap efficiency), V_s 는 입자 침강속도(m/s), L 은 식생여과대 길이(m), V_m 은 Manning 유

속(m/s), d_f 는 수심(m)을 나타낸다.

$$ST(\%) = 44.1N_f^{0.29} \tag{1}$$

$$N_f = \frac{V_s L}{V_m d_f} \tag{2}$$

$$N_f = \frac{V_s \left(\frac{L}{V_m}\right)^{N_{fz}}}{V_m d_f} \tag{3}$$

한편, 수평둔덕은 식생여과대의 강우유출수 처리 효율을 증진하기 위해 상류에서 발생한 강우유출수를 하류의 식생여과대에 골고루 분배하는 역할을 한다. 식생여과대는 CAMEL의 유역분할 단위인 Cell의 하류방향에 위치하게 된다. 따라서 식생여과대 상류의 초지와 식생여과대는 식재되는 식생과 토양 특성에 따라 개별 수문과정이 상이하게 발생하며, 결과적으로 서로 다른 토양온도와 토양수분을 갖는 개별적 객체로 모의 된다(Figure 2). 토양 대공극을 통한 중간류의 발생과 대수층에서의 지하수 유동은 기존의 CAMEL에서와 동일하게 모의된다.

3. 식생여과대 모듈 검증

식생여과대 모듈을 검증하기 위하여 시험 격자를 이용하여 오염물질 저감에 영향을 미칠 수 있는 식생여과대의 길이, 조도계수, 토성, 식생의 높이 및 뿌리 깊이 등 다양한 매개변수에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 식생여과대 상류의 초지는 100 m × 100 m

정방형 격자로 구축하고, 토양층은 두께 20 cm인 토양층 5개로 구성하였다. 초지 격자의 토성은 sandy clay loam, 식생은 대표적인 한지형 잔디인 tall fescue, 조도계수는 지표면에서는 0.1, 지표면 유출수가 모여 집중류가 발생하는 림에서는 0.05로 설정하였다. 또한, 초지에는 1 ha 당 소 10마리를 방목하는 것으로 가정하였다. IPCC(2006)는 아시아 지역에서 소 한 마리로 부터의 질소 배출량을 0.34 kg-N/day로 제시하였으며, 이 값을 이용하여 가축배설물에 의해 토양으로 유입되는 탄소, 질소, 인의 배출량을 모델에 입력하였다. 한편, 초지의 하류에 식생여과대를 10 m의 길이로 조성하였으며, 초지와 동일하게 토성은 Sandy clay loam, 식생은 tall fescue를 식재한 것으로 설정하였다. 다만 식생여과대에서는 방목을 하지 않기 때문에 지표면 거칠기를 나타내는 조도계수가 초지와 비교하여 상대적으로 높을 것으로 판단되어 조도계수는 0.25 값을 부여하였다. Novotny and Chesters (1981)은 작물재배지의 지표면 조도계수는 0.05 ~ 0.4의 범위를 보인다고 보고하였다. 식생여과대의 계절적 특성이 반영될 수 있도록 현장에서 관측된 기상자료를 모델에 입력하였다. 2009년부터 경기도 여주시 오계리에 위치한 초지와 산지에서 토양온도, 토양수분함량 등을 지속적으로 관측하고 있으며, 향후 확보된 자료가 모델의 보정과 검증에 효과적으로 활용될 수 있도록 해당유역에 설치한 자동기상관측장치(Automatic Weather

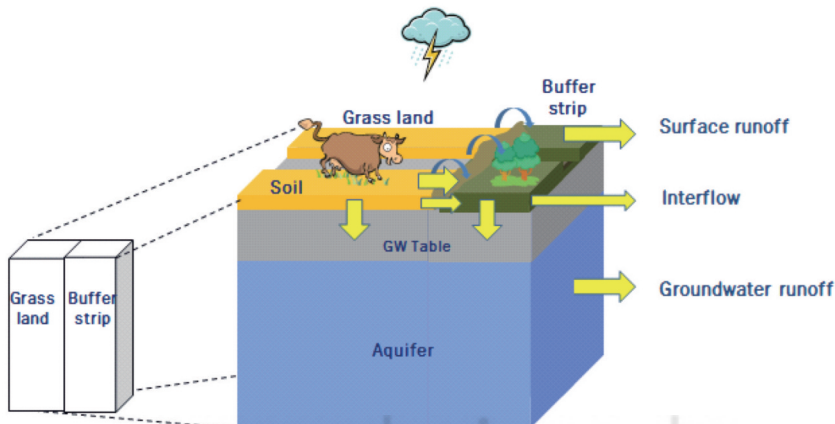


Figure 2. The representation of a VBS cell in the model

Table 2. Scenarios for sensitivity analysis of the VBS module

Scenarios		Contents		number
A	Length	5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 35 m, 40 m		7
B	Roughness coefficient	Surface	0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4	6
		Rill	0.10, 0.14, 0.18, 0.20, 0.25, 0.28(70% of roughness coefficient of surface)	
C	Soil	Sandy clay loam, Sandy loam, Silt loam, Clay loam, Silty clay loam, Clay		6
D	Crop	Alfalfa, switch grass, bermuda grass, tall fescue		4

Table 3. Hydraulic properties of soil textures applied to the model

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)
SCL(Sandy clay loam)	0.398	0.330	0.255	0.148	0.072
SL (Sandy loam)	0.453	0.207	0.095	0.041	0.523
ZL (Silt loam)	0.501	0.330	0.133	0.015	0.163
CL (Clay loam)	0.464	0.318	0.197	0.075	0.048
ZCL(Silty clay loam)	0.471	0.366	0.208	0.040	0.048
C (Clay)	0.475	0.396	0.272	0.090	0.014

Table 4. Seasonal variations in vegetation heights and root depths applied to the model

crop	01/01		03/15		05/01		08/15		11/15		12/15	
	V.H ^a	R.D ^b	V.H	R.D	V.H	R.D	V.H	R.D	V.H	R.D	V.H	R.D
tall fescue	0.5	0.8	0.8	1.1	1.0	1.3	1.2	1.5	0.8	1.1	0.6	0.9
alfalfa	0.3	3.0	0.6	6.0	0.8	8.0	1.0	9.0	0.6	6.0	0.5	5.0
switch grass	0.5	1.0	1.2	2.5	1.5	2.8	1.8	3.1	1.2	2.5	1.0	2.0
bermuda grass	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.4	0.6	0.2	0.3	0.15	0.25

a Vegetation height (m)

b Crop root depth (m)

Station: AWS)에서 관측한 기상자료를 모델의 입력 자료로 이용하였다. 일부 결측 자료는 인근에 위치한 여주농업기술센터에서 관측한 자료로 대체하였으며, 2010년 1년간 1시간 간격으로 관측한 기상자료를 이용하여 1년의 기간에 대해 모의를 수행하였다. 기상 자료는 강우, 기온, 상대습도, 풍속, 현지기압, 일사량 자료를 포함하며, 모의시간 간격은 격자 크기를 고려하여 1분으로 설정하였다.

식생여과대 환경변화에 대한 4개의 시나리오를 구성하고, 각 시나리오별 지표유출수, 유사, TOC, TN, TP 연간 부하량의 저감효과를 분석하여 식생여과대 모듈이 합리적인 결과를 도출하는지를 평가하였다 (Table 2). 시나리오A는 식생여과대의 길이에 따른 유출변화를 평가하였으며, 이를 위해 식생여과대 길

이를 5 m ~ 40 m의 범위에서 7가지로 조성하였다. 시나리오B는 조도계수의 변화에 따른 유출변화를 평가하였다. 지표면의 조도계수는 0.15부터 0.5씩 증가하여 0.4까지 부여하였으며, 린에 대해서는 지표면에 부여된 조도계수의 70%에 해당하는 거칠기가 나타난다고 가정하여 조도계수를 0.10부터 0.28까지의 범위로 부여하여 총 6가지 경우를 구성하였다. 시나리오C는 식생여과대의 토성변화에 따른 유출변화를 평가하였다. 국내의 초지토양 적성등급 기준을 참고하여 식생여과대에 Sandy clay loam, Sandy loam, Silt loam, Clay loam, Silty clay loam, Clay 등 총 6가지의 토성이 분포하는 경우를 구성하였다. 각 토성별 공극, 수리전도도 등의 특성을 모델에 반영함으로써 시나리오를 평가하였다 (Table 3). 시나

리오D는 식생여과대 식생변화에 따른 유출변화를 평가하였다. 초지에 대표적으로 식재하는 alfalfa, switch grass, bermuda grass, tall fescue 등 총 4 가지 식생을 식재하였을 경우의 저감효과를 평가하였으며, 식생별 계절에 따른 일반적인 초장, 뿌리깊이를 모델에 반영함으로써 시나리오를 평가하였다 (Table 4).

III. 결과 및 고찰

1. 식생여과대 길이 변화에 따른 민감도 분석

식생여과대의 길이가 길어질수록 강우의 지표유출량이 감소하는 것으로 분석되었다(Figure 3). 식생여과대를 조성하지 않을 경우 강우량 대비 유출물은

0.43으로 나타났으며, 식생여과대의 길이를 40 m로 조성할 경우 유출률은 0.40로 길이가 길어질수록 유출률이 감소하는 것으로 나타났다(Figure 3). 유사, TOC, TN, TP 지표유출량의 저감률은 식생여과대 길이가 길어질수록 증가하는 것으로 나타났다. 유사 유출량의 저감률은 식생여과대의 길이를 5 m로 조성할 경우 0.894로 나타났으며, 40 m로 조성할 경우 0.989로 나타났다(Figure 4). TOC 지표유출량의 저감률은 식생여과대의 길이를 5 m로 조성할 경우 0.263로 나타났으며, 40 m로 조성할 경우 0.695로 나타났다(Figure 5). TN 지표유출량의 저감률은 식생여과대의 길이를 5 m로 조성할 경우 0.174로 나타났으며, 길이를 40 m로 조성할 경우 0.695로 나타났다(Figure 6). TP 지표유출량의 저감률은 식생여과대의 폭을 5 m로 조성할 경우 0.765, 폭을 40 m로

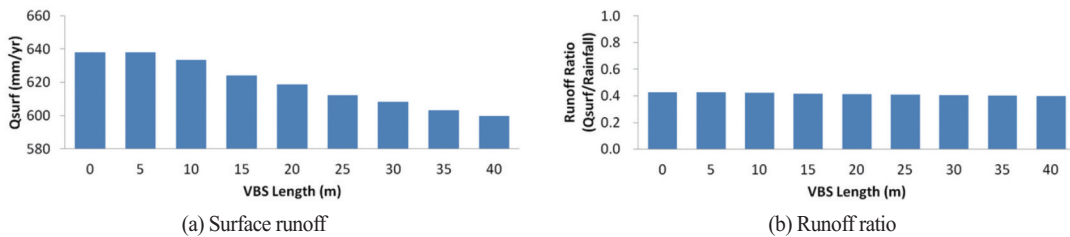


Figure 3. Yearly surface runoff and runoff ratio simulated for various VBS lengths

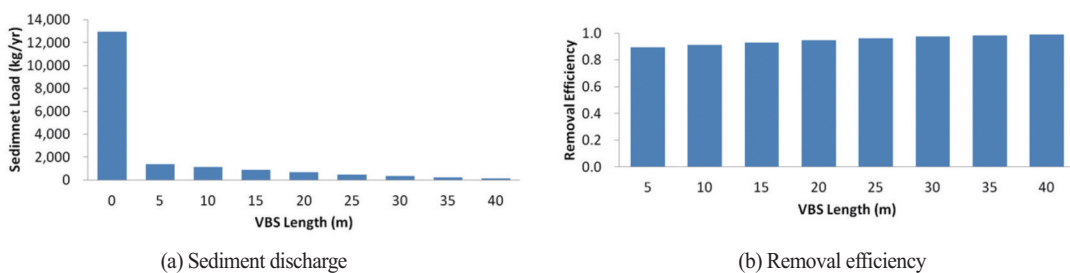


Figure 4. Yearly surface sediment discharge and removal efficiency simulated for various VBS lengths

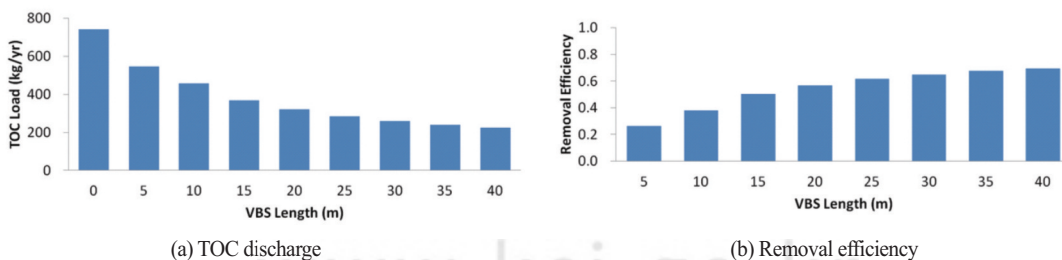


Figure 5. Yearly surface TOC discharge and removal efficiency simulated for various VBS lengths

조성할 경우 0.943로 나타났다(Figure 7). 특히, 유사와 TP의 경우, 식생여과대의 길이를 5 m로 짧게 조성하였을 경우에도 높은 저감률을 보여 길이에 대한 저감률의 증가가 상대적으로 크지 않은 것으로 분석되었다. Gharabhazi *et al.*(2001)는 식생여과대의 유입부 5 m까지가 40 μm 보다 큰 입자의 저감에 중요한 역할을 한다고 보고하였다. 그리고 식생여과대의 길이가 10 m 이상이 될 경우 유사와 유사한 저감효율은 크게 증가하지 않는다고 보고된 바 있다(Lee *et al.*, 2003; Zreig *et al.*, 2004; Gharabhazi *et al.*, 2002). TP의 저감효율이 유사와 유사한 경향을 나타낸 것은 유사에 흡착되어 이동하는 인의 특성이 반영되었기 때문인 것으로 사료된다. 한편, 많은 연구들이 TN 저감효과는 식생여과대의 길이에 비례하여 증가한다고 보고하였다(Dillaha *et al.*, 1988; Dillaha

et al., 1989; Magetta *et al.*, 1989). 이상의 선행연구 결과와 비교할 때, 본 연구에서 개발한 모듈이 식생여과대 효과를 합리적으로 재현하고 있는 것으로 평가된다.

2. 식생여과대 조도계수 변화에 따른 민감도 분석

식생여과대의 조도계수 변화에 따른 강우의 연간 지표유출률의 변화는 크지 않은 것으로 분석되었다(Figure 8). 이에 반하여, 유사유출량의 경우 식생여과대 조도계수가 증가함에 따라 저감률이 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 조도계수를 0.15로 설정하였을 경우 유사유출량 저감률이 0.216에 불과하나, 조도계수를 0.4로 설정하였을 경우에는 유사량 저감률이 0.988로 나타났다(Figure 9). 이는 표면 거칠기가 증가함에 따라 유속이 감소하고 이로 인해 유사운

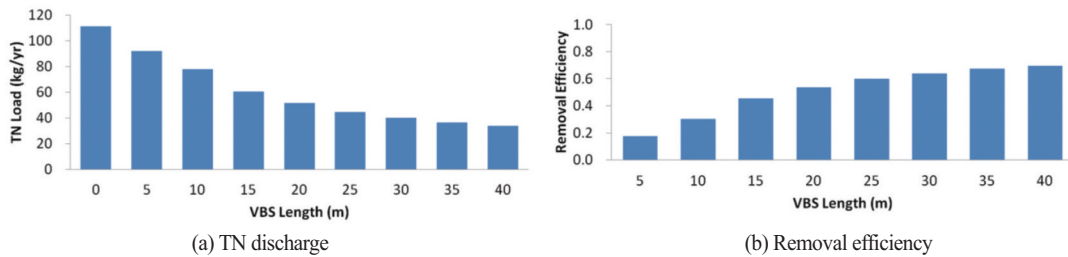


Figure 6. Yearly surface TN discharge and removal efficiency simulated for various VBS lengths

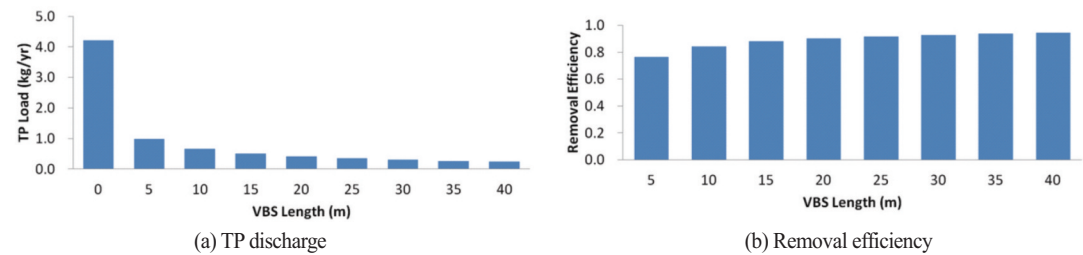


Figure 7. Yearly surface TP discharge and removal efficiency simulated for various VBS lengths

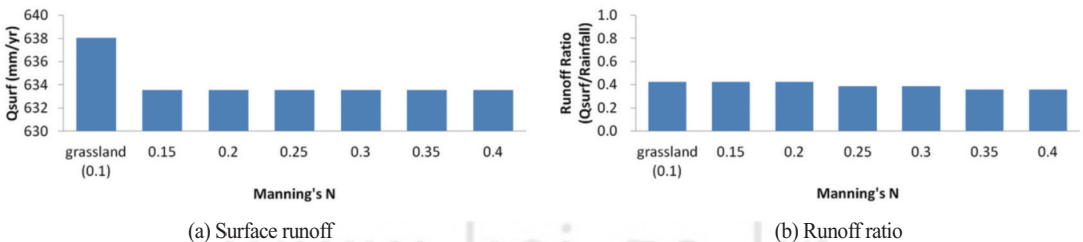
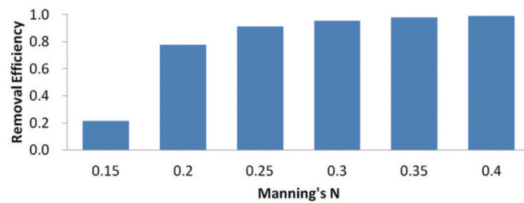
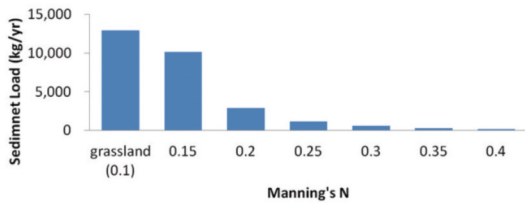


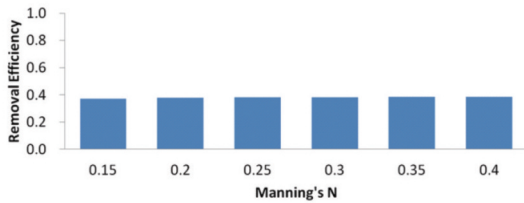
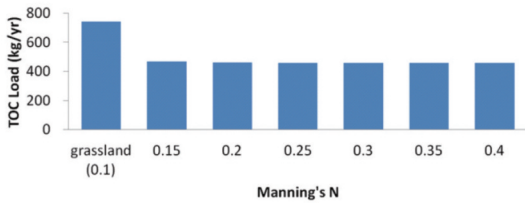
Figure 8. Yearly surface runoff and runoff ratio for various VBS roughness

반 능력이 저감되었기 때문인 것으로 사료되며, Neibling and Alberts(1979)와 Gharabaghi *et al.* (2002)는 이를 식생여과대의 유사저감의 주요기능으로 보고한 바 있다. 한편, TOC 지표유출량의 저감률은 조도계수 0.15일 때 0.371, 조도계수 0.4일 때 0.384로 식생여과대 조도계수가 증가함에 따라 소폭 증가하는 것으로 나타났으나 그 효과는 유사 저감률에 비해 크지 않은 것으로 분석되었다(Figure 10).

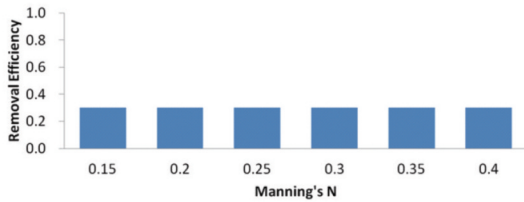
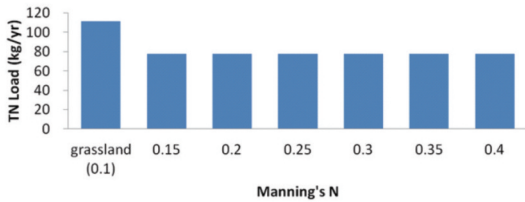
TN 지표유출량의 저감률은 식생여과대 조도계수 증가와 상관없이 0.301으로 변동이 없는 것으로 나타났다(Figure 11). TP 지표유출량의 경우, 조도계수 0.15일 때 저감률 0.795, 조도계수 0.4일 때 저감률 0.851를 나타내 식생여과대 조도계수가 증가함에 따라 저감률이 증가하는 것으로 나타났으며, 특히, 조도계수 0.15 ~ 0.25 사이에서 저감률이 상대적으로 큰 것으로 분석되었다(Figure 12).



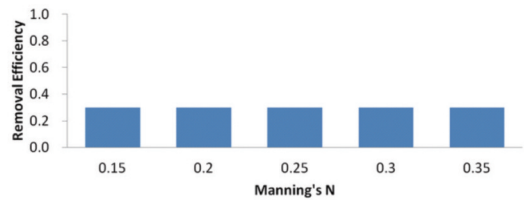
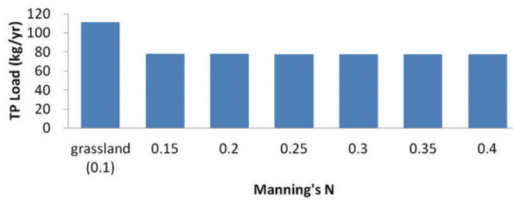
(a) Sediment discharge (b) Removal efficiency
Figure 9. Yearly surface sediment discharge and removal efficiency for various VBS roughness



(a) TOC discharge (b) Removal efficiency
Figure 10. Yearly surface TOC discharge and removal efficiency for various VBS roughness



(a) TN load (b) Removal efficiency
Figure 11. Yearly surface TN load and removal efficiency for various VBS roughness

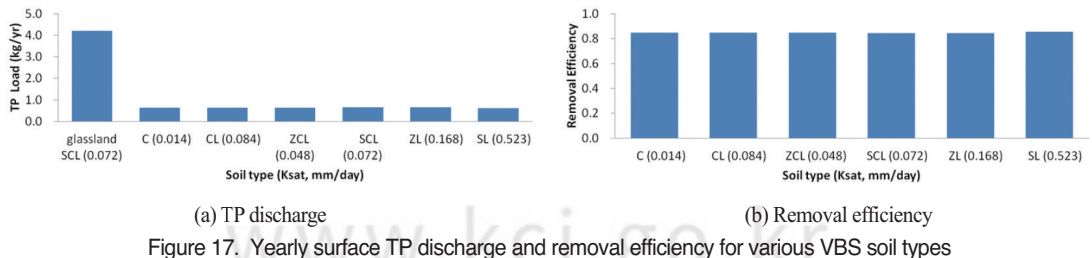
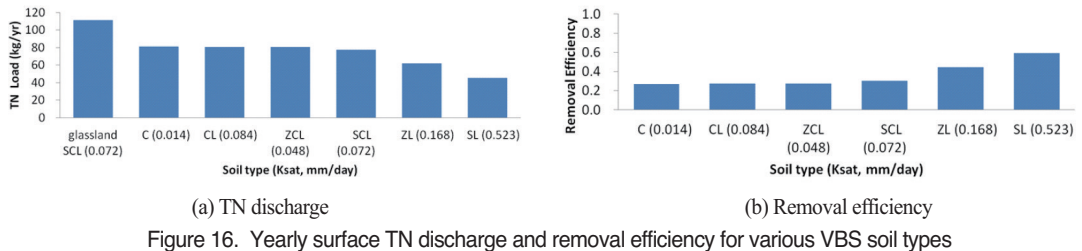
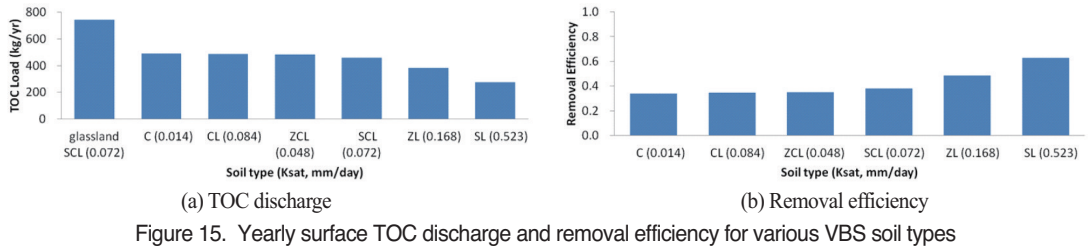
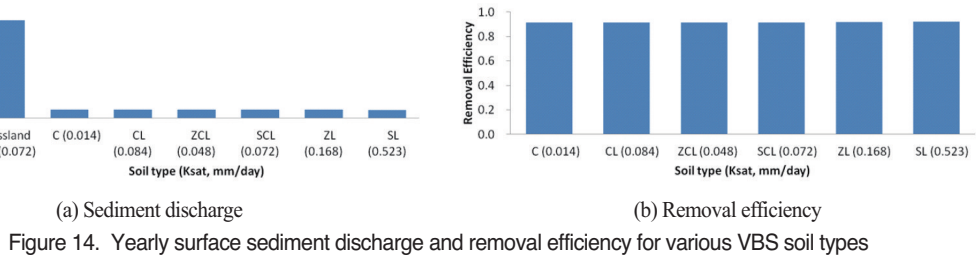
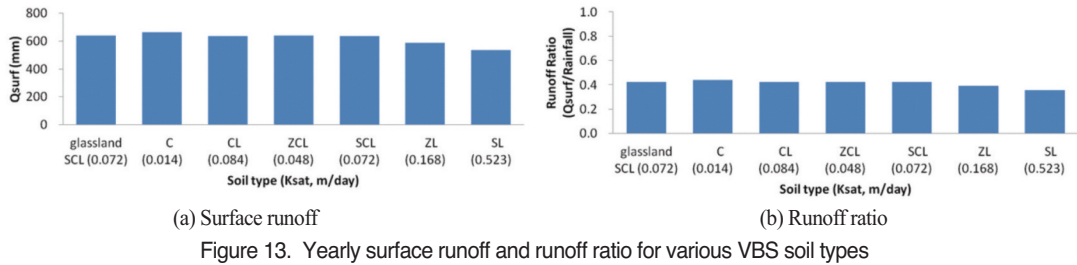


(a) TP load (b) Removal efficiency
Figure 12. Yearly surface TP load and removal efficiency for various VBS roughness

3. 식생여과대 토성 변화에 따른 민감도 분석

식생여과대 토양의 수리전도도가 클수록 전반적으로 강우의 지표유출률이 감소하는 것으로 나타났다 (Figure 13). 유사와 TP 유출량의 저감률은 토성에

따라 각각 0.914 ~ 0.920, 0.847 ~ 0.854의 범위로 토성에 따른 차이가 거의 없이 전반적으로 높은 저감률을 나타냈다(Figure 14, Figure 17) 반면, TOC와 TN 지표유출량의 저감률은 토양의 수리전도도가 증



가함에 따라 저감률이 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. TOC 지표유출량의 저감률은 식생여과대의 토성을 clay로 조성할 경우 0.339, sandy loam으로 조성할 경우 0.628의 값을 보였으며(Figure 15), TN 지표유출량의 저감률은 clay로 조성할 경우 0.271, sandy loam으로 조성할 경우 0.593의 값을 나타냈다(Figure 16). 용존성물질의 경우 수리전도도가 증가할수록 토양으로의 침투가 비례적으로 증가하여 지표면에서의 유출량이 상대적으로 감소한 것으로 사료된다. 질산염의 경우 인과는 달리, 대부분이 용존성의 형태로 존재하기 때문에 천층 지하수로의 이동이 쉬우며(Lowrance *et al.*, 1985), 토양에서의 식생에 의한 흡수와, 탈질에 의한 저감효과가 큰 것으로 보고되고 있다(Parkyn, 2004).

4. 식생여과대 식생 종류 변화에 따른 민감도 분석

식생여과대 식생 종류에 따른 강우의 연간 지표유출량 변화는 거의 없는 것으로 나타났다(Figure 18). 유사유출량의 저감률은 식생여과대에 식생을 tall fescue로 식재하였을 경우 0.915로 가장 높았으며, switch grass와 bermuda grass로 식재하였을 경우 0.854, alfalfa로 식재하였을 경우 0.728의 저감률을 보여주었다(Figure 19). TOC, TN, TP 지표유출량의 저감률은 식생 종류에 따라 큰 차이를 보이지 않았다(Figure 20 ~ Figure 22). 다만, 식생에 상관없이 식생여과대에서의 TOC, TN의 저감률은 0.5 이하로 낮은 반면, 유사와 인의 경우 0.7 이상의 높은 저감률을 보이는 것으로 분석되었다. 많은 연구들이 초지로 조성된 여과대에서 지표유출로 인한 유사, 인

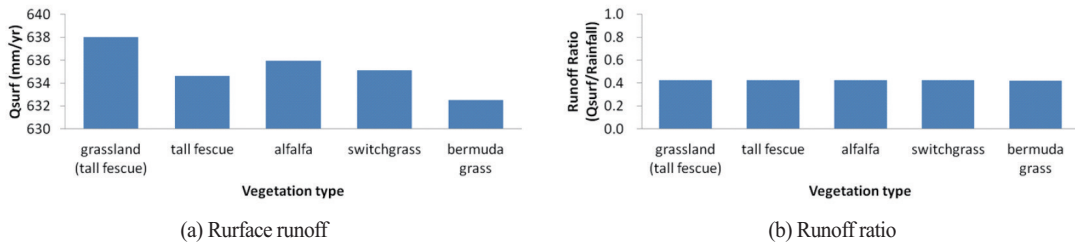


Figure 18. Yearly surface runoff and runoff ratio for various VBS vegetation types

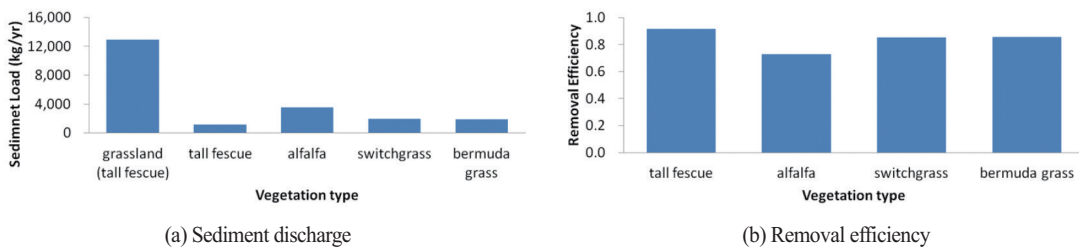


Figure 19. Yearly surface sediment discharge and removal efficiency for various VBS vegetation types

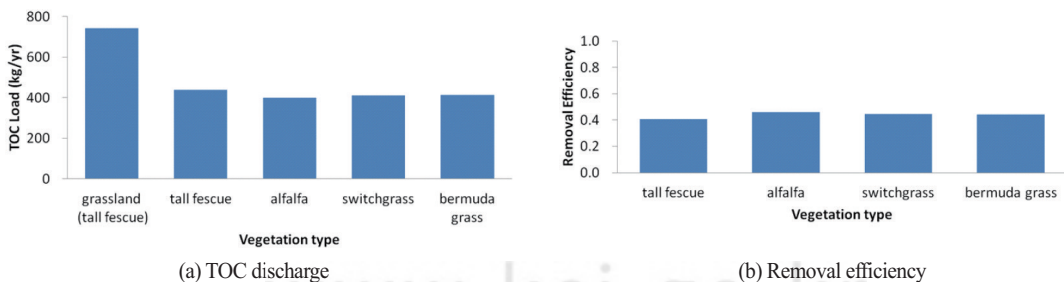


Figure 20. Yearly surface TOC discharge and removal efficiency for various VBS vegetation types

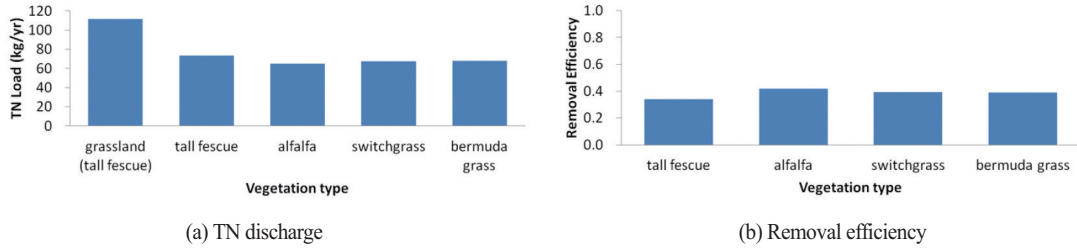


Figure 21. Yearly surface TN discharge and removal efficiency for various VBS vegetation types

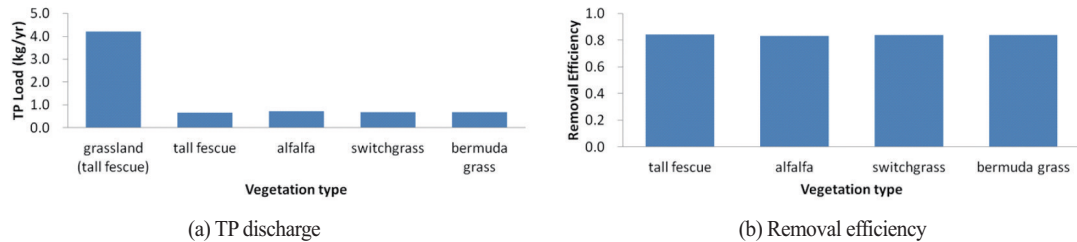


Figure 22. Yearly surface TP discharge and removal efficiency for various VBS vegetation types

자성 인과 질소 등의 저감효과는 높지만, 용존성 영양염의 저감효과는 상대적으로 낮다고 보고한 바 있다(Parkyn, 2004).

IV. 결론

본 연구에서는 분포형 유역모델이면서, 국내 환경에 적합하도록 개발된 CAMEL에 기반하여 식생여과대 효과분석을 위한 모듈을 개발하였다. 식생여과대의 주요 모의기능은 기존의 CAMEL과 동의하나 릿에서의 유사포착 현상과 수평둔덕을 추가로 설계하여 모듈에 반영하였다. 유사포착은 Tollner *et al.* (1976)가 제시한 변수를 이용한 예측식을 수정하여 반영하였다. 식생여과대 모듈을 검증하기 위하여 시험 격자를 이용하여 식생여과대의 길이, 조도계수, 토성, 식생의 높이 및 뿌리 깊이 등 다양한 매개변수에 대한 민감도 분석을 실시하였으며, 모의 결과는 다음과 같다.

1) 식생여과대의 길이가 길어질수록 유사, TOC, TN, TP 지표유출량의 저감률이 증가하는 것으로 나타났다. 유사와 TP의 경우, 식생여과대의 길이를 짧게 조성하였을 경우에도 높은 저감률을 보여 길이에 대한 저감률의 증가가 상대적으로 크지 않은 것으로

분석되었다.

2) 식생여과대 조도계수가 증가함에 따라 유사유출량의 저감률이 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 표면 거칠기가 증가함에 따라 유속이 감소하고 이로 인해 유사운반 능력이 저감되었기 때문인 것으로 사료 된다.

3) 유사와 TP 유출량의 저감률은 토성에 따른 차이가 거의 없이 전반적으로 높은 저감률을 나타낸 반면, TOC와 TN 지표유출량의 저감률은 토양의 수리전도도가 증가함에 따라 저감률이 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

4) 식생에 상관없이 식생여과대에서의 TOC, TN 지표유출량의 저감률은 0.5 이하로 낮은 반면, 유사와 인의 경우 0.7 이상의 높은 저감률을 보이는 것으로 분석되었다.

식생여과대 모듈의 민감도 분석결과를 종합해 보면, 유사 지표유출량은 조도계수 변화에 따라 민감하게 반응하였으며, 전반적으로는 유사와 TP의 지표유출량 저감률이 시나리오 변화에 상관없이 전반적으로 높은 것으로 분석되었다. TOC, TN의 저감률은 식생여과대의 길이, 토성변화에 따라 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 유사와 TP의 지표유출량 저감률에 비해 상대적으로 저감률이 낮은 것으로 분

석되었다. 본 연구에서 개발된 식생여과대 모듈은 환경변화에 따른 오염물질 저감효과를 합리적으로 재현하는 것으로 나타났다. 이는 향후 식생여과대 조성 지역에 적용되어 비점오염 물질 제거 효과를 정량적으로 산정하고 효율적인 관리방안을 평가하는데 기여할 수 있을 것이다. 또한, 저감효율을 높일 수 있는 다양한 시나리오 분석을 통해 식생여과대 조성을 위한 설계 지침 등을 제안할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 본 연구에서 개발된 모듈이 식생여과대 조성 지역에 적용되어 오염물질 저감효과를 평가하기 위해서는 관측치를 이용한 모델 보정과 검증 작업이 필수적으로 선행되어야 한다. 현재 식생여과대 시험지를 조성하여 식생여과대 유입과 유출부에서의 유량과 수질 모니터링을 실시하고 있으며, 향후 대상지역에 모델을 적용함으로써 관측치와의 비교를 통해 식생여과대 모듈에 대한 모델 결과의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ 10100132015)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

인용문헌

- 농림수산식품부. 2013. 농림수산식품 주요통계.
- 농촌진흥청 국립축산과학원. 2014. 스마트한 축산 통계 30.
- 박윤식, 김중건, 김남원, 박준호, 장원석, 최종대, 임경재. 2008. VFSSMOD-W 모형을 이용한 SWAT 모형의 초생대 유사 저감 효율 모듈 개선, 한국물환경학회지, 24(4), 473-479.
- 한강수계관리위원회, 국립환경과학원 한강물환경연구소. 2007. 수변완충지대 효율적 조성 및 오염부하 저감효과 분석: 최종보고서.
- Addiscott TM. 1993. Simulation modeling and soil behaviour, *Geoderma*, 60, 15-40.
- Addiscott TM. 1994. Simulation, prediction, foretelling or prophesy? Some thoughts on pedogenic modelling, In: Bryant, R.B. and Arnold, R.W. (Eds.) *Quantitative modeling of soil forming processes*, SSSA Special Publication 39. SSSA, Madison, WI. 1-15.
- Burrough PA. 1995. Opportunities and limitations of GIS-based modeling of solute transport at the regional scale, In: *Applications of GIS to the modeling of non-point source pollutants in the vadise zone*, Proceedings of 1995 Bouyoucos Conference, Riverside, CA. 1-19.
- Chaubey I, Chiang L, Gitau MW, Sayeed M. 2010. Effectiveness of BMPs in improving water quality in a pasture dominated watershed, *J. Soil Water Conserv*, 65, 424-437.
- Dillaha TA, Sherrard JH, Lee D, Mostaghimi S, Shanholtz VO. 1988. Evaluation of vegetative filter strips as a best management practice for feed lots, *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 60(7), 1231-1238.
- Dillaha TA, Reneau RB, Mostaghimi S, Lee D. 1989. Vegetative Filter Strips for Agricultural Nonpoint Source Pollution Control, *Transactions of the ASAE*, 32(2), 513-519.
- Dorioz JM, Wang D, Poulencard J, Trévisan D. 2006. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics-A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 117, 4-21.
- Lee KH, Isenhardt TM, Schultz RC. 2003. Sediment and nutrient removal in an established multi-species riparian buffer, *J. Soil Water Conserv*, 58 (1), 1-8.
- Gharabhazi B, Rudra RP, Whiteley HR, Dickinson WT. 2001. Sediment removal efficiency of vegetative filter strips, *ASAE*

- Meeting Paper no. 012071. ASAE, St. Joseph, MI.
- Gharabhazi B, Rudra RP, Whiteley HR, Dickinson WT. 2002. Development of a management tool for vegetative filter strips, Best modeling practices for urban water systems (Ed. W. James) volume 10 in the monograph series, 289-302.
- Helmert MJ, Isenhardt T, Dosskey M, Dabney S, Strock J. 2006. Buffers and vegetative filter strips. Available at: <http://www.epa.gov/msbasin/taskforce/2006symposia/4BuffersVegHelmert.pdf> (accessed April 23, 2007).
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- 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, 1359-1404.
- Koo. 2010. Introduction to CAMEL, unpublished presentation material.
- Lowrance R, Leonard R, Sheridan J. 1985. Managing riparian ecosystems to control nonpoint pollution, *Journal of Soil and Water Conservation*, 40(1), 87-91.
- Magette WL, Brinsfield RB, Palmer RE, Wood JD. 1989. Nutrient and sediment removal by vegetated filter strips, *Transactions of the ASAE* 32(2): 663-667.
- Munoz-Carpena R, Parsons JE, Gilliam JW. 1999. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips, *J. Hydrol.* 214, 111-129.
- Niebling WH, Alberts EE. 1979. Composition and yield of soil particles transported through sod strips. Presented at ASAE and CSAE, Paper NO. 79-2065, St. Joseph, MI, 12.
- Novotny V, Chesters G. 1981. *Handbook of Nonpoint Pollution: Sources and Management*(Van Nostrand Reinhold Environmental Engineering Series), Van Nostrand Reinhold.
- Parkyn S. 2004. Review of riparian buffer zone effectiveness (No. 2004-2005). Ministry of Agriculture and Forestry.
- 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.
- 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.
- Stutter MI, Langan SI, Lumsdon DG. 2009. Vegetated buffer strips can lead to increased release of phosphorus to waters: a biogeochemical assessment of the mechanisms, *Environmental Science and Technology*, 43, 1858-1863.
- The Water Environment (Diffuse Pollution) (Scotland) Regulations. 2008. http://www.opsi.gov.uk/legislation/scotland/ssi2008/pdf/ssi_20080054_en.pdf (accessed Feb 2009).
- Tollner EW, Barfield BJ, Haan CT, Kao TY. 1976. Suspended sediment filtration capacity of simulated vegetation, *Trans. ASAE*, 19(4), 678-682.

Zreig MA, Rudra RP, Lalonde MN, Whiteley HR, Kaushik NK. 2004. Experimental investigation of runoff reduction and sediment removal by vegetated filter strips, *Hydrol. Process.* 18, 2029-2037.

References

- Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries(MIFAFF). 2013. Main statistics of Food, Agriculture, Forestry and Fisheries.
- Rural Development Administration, National Institute of Animal Science. 2014. Smart Livestock Statistics 30.
- Park YS, Kim JG, Kim NW, Park JH, Jang WS, Choi JD, Lim KJ. 2008. Improvement of Sediment Trapping Efficiency Module in SWAT using VFSMOD-W Model, *Journal of Korean Society on Water Quality*, 24(4), 473-479.
- Han River Water System Management Committee, Han River Environment research center. 2007. A research of design and implementation of riparian buffer zones and reduction of non-point source pollutants.
- Addiscott TM. 1993. Simulation modeling and soil behaviour, *Geoderma*, 60, 15-40.
- Addiscott TM. 1994. Simulation, prediction, foretelling or prophesy? Some thoughts on pedogenic modelling, In: Bryant, R.B. and Arnold, R.W. (Eds.) *Quantitative modeling of soil forming processes*. SSSA Special Publication 39. SSSA, Madison, WI. 1-15.
- Burrough PA. 1995. Opportunities and limitations of GIS-based modeling of solute transport at the regional scale, In: *Applications of GIS to the modeling of non-point source pollutants in the vadise zone*, Proceedings of 1995 Bouyoucos Conference, Riverside, CA. 1-19.
- Chaubey I, Chiang L, Gitau MW, Sayeed M. 2010. Effectiveness of BMPs in improving water quality in a pasture dominated watershed, *J. Soil Water Conserv*, 65, 424-437.
- Dillaha TA, Sherrard JH, Lee D, Mostaghimi S, Shanholtz VO. 1988. Evaluation of vegetative filter strips as a best management practice for feed lots, *Journal of the Water Pollution Control Federation*, 60(7), 1231-1238.
- Dillaha TA, Reneau RB, Mostaghimi S, Lee D. 1989. Vegetative Filter Strips for Agricultural Nonpoint Source Pollution Control, *Transactions of the ASAE*, 32(2), 513-519.
- Dorioz JM, Wang D, Poulenard J, Trévisan D. 2006. The effect of grass buffer strips on phosphorus dynamics-A critical review and synthesis as a basis for application in agricultural landscapes in France *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 117, 4-21.
- Lee KH, Isenhardt TM, Schultz RC. 2003. Sediment and nutrient removal in an established multi-species riparian buffer, *J. Soil Water Conserv.* 58 (1), 1-8.
- Gharabhazi B, Rudra RP, Whiteley HR, Dickinson WT. 2001. Sediment removal efficiency of vegetative filter strips, ASAE Meeting Paper no. 012071. ASAE, St. Joseph, MI.
- Gharabhazi B, Rudra RP, Whiteley HR, Dickinson WT. 2002. Development of a management tool for vegetative filter strips, *Best modeling practices for urban water systems* (Ed. W. James) volume 10 in the monograph series, 289-302.

- Helmert MJ, Isenhardt T, Dosskey M, Dabney S, Strock J. 2006. Buffers and vegetative filter strips, Available at: <http://www.epa.gov/msbasin/taskforce/2006symposia/4BuffersVegHelmert.pdf> (accessed April 23, 2007).
- IPCC. 2006. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories.
- 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, 1359-1404.
- Koo. 2010. Introduction to CAMEL, unpublished presentation material.
- Lowrance R, Leonard R, Sheridan J. 1985. Managing riparian ecosystems to control nonpoint pollution, *Journal of Soil and Water Conservation*, 40(1), 87-91.
- Magette WL, Brinsfield RB, Palmer RE, Wood JD. 1989. Nutrient and sediment removal by vegetated filter strips, *Transactions of the ASAE*, 32(2), 663-667.
- Munoz-Carpena R, Parsons JE, Gilliam JW. 1999. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips, *J. Hydrol.* 214, 111-129.
- Niebling WH, Alberts EE. 1979. Composition and yield of soil particles transported through sod strips, Presented at ASAE and CSAE, Paper NO. 79-2065, St Joseph, MI, 12.
- Novotny V, Chesters G. 1981. *Handbook of Nonpoint Pollution: Sources and Management*(Van Nostrand Reinhold Environmental Engineering Series), Van Nostrand Reinhold.
- Parkyn S. 2004. Review of riparian buffer zone effectiveness (No. 2004-2005). Ministry of Agriculture and Forestry.
- 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.
- 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.
- Stutter MI, Langan SI, Lumsdon DG. 2009. Vegetated buffer strips can lead to increased release of phosphorus to waters: a biogeochemical assessment of the mechanisms, *Environmental Science and Technology*, 43, 1858-1863.
- The Water Environment (Diffuse Pollution) (Scotland) Regulations. 2008. http://www.opsi.gov.uk/legislation/scotland/ssi2008/pdf/ssi_20080054_en.pdf (accessed Feb 2009).
- Tollner EW, Barfield BJ, Haan CT, Kao TY. 1976. Suspended sediment filtration capacity of simulated vegetation. *Trans. ASAE*, 19(4), 678-682.
- Zreig MA, Rudra RP, Lalonde MN, Whiteley HR, Kaushik NK. 2004. Experimental investigation of runoff reduction and sediment removal by vegetated filter strips, *Hydrol. Process*, 18, 2029-2037.