

국내 경작지 특성을 고려한 SWAT 모형의 식생여과대 유사저감 효율 산정식 개선

한정호 · 박윤식^{*} · 금동혁 · 정영훈^{**} · 정교철^{***} · 김기성 · 임경재[†]

강원대학교 지역결선험공학과

^{*}공주대학교 생물산업공학과

^{**}한국수자원공사

^{***}안동대학교 지구환경과학과

Modification of Sediment Trapping Efficiency Equation of VFS in SWAT Considering the Characteristics of the Agricultural Land in Korea

Jeong Ho Han · Younshik Park^{*} · Donghyuk Kum · Younghun Jung^{**} · Gyo Cheol Jung^{***} ·
Ki-Sung Kim · Kyoung Jae Lim[†]

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

^{}Department of Rural Construction Engineering, Kongju National University*

*^{**}Korea Water Resources Corporation*

*^{***}Department of Earth and Environmental Science, Andong National University*

(Received 7 July 2015, Revised 27 August 2015, Accepted 1 September 2015)

Abstract

In this study, considering the factors that affects sediment trapping efficiency of Vegetative Filter Strips (VFS), the scenarios were designed to develop a regression equation to estimate sediment trapping efficiency of VFS for agricultural fields in South-Korea. For this, general conditions of agricultural fields in South-Korea were investigated. Then, based on these results, total 53,460 scenarios were set and simulated by Vegetative Filter Strip MODEL (VFSMOD-w). Two variables were determined from the results of 53,460 scenarios. These two variables were applied to CurveExpert for development of a equation, which can estimate sediment trapping efficiency of VFS. The equation developed in this study can be used in SWAT model for estimation of sediment reduction efficiency of VFS to upland field in Korea. Moreover, it is expected that VFS will be effectively applied to agricultural fields in South-Korea.

Key words : Sediment, Sediment reduction, SWAT, Vegetative filter strips, VFSMOD-w

1. Introduction

수질 오염원은 크게 점오염원과 비점오염원으로 구분 할 수 있다. 점오염원은 오염원의 배출 및 유입경로 파악이 쉬워 환경기초 시설을 설치하여 체계적인 관리가 이루어지고 있다(Oh et al., 2004). 하지만 점오염원의 체계적인 관리에도 불구하고 지속적인 비점오염원 유입으로 하천과 호소 수질은 크게 향상되지 못하고 있다(Kim et al., 2002). 이에 비점오염원 관리를 위한 다양한 최적관리기법(best management practices)이 적용되고 있다. 최적관리기법은 비점오염원을 저감시키기 위한 구조적·비구조적 관리기법

으로 구분되며, 국내에서 적용되고 있는 최적관리기법에는 배수로, 인공습지, 침사지, 식생여과대 등이 있다(Kim and Lee, 2006). 그 중 식생여과대는 강우사상 시 발생한 유사를 저감하기 위한 최적관리기법으로 경작지 말단부에 띠 모양으로 설치된 식생대를 말한다(Schmitt et al., 1999). 국내에서는 식생여과대, 초생대, 식생대, 완충식생대가 같은 의미로써 혼용되어 사용되고 있으며, 국외에서는 큰 의미에서 vegetative filter strips, grassed buffer strips, filter strips, grassed filters 등으로 혼용되어 사용되고 있다(Choi and Jang, 2014).

효율적인 식생여과대 설계를 위해서는 최적의 식생여과대 면적을 산정하는 것이 중요하다(Park and Hyun, 2014; Park et al., 2007). 만약 식생여과대가 필요 이상으로 설계된다면 작물 재배 면적이 감소하여 생산량이 감소하게 되고 결과적으로 경제적인 손해가 발생한다. 반대로 식생여과대를 너무 작은 규모로 설치한다면 기대 이하의 유사저감 효율을 나타내게 되어 수질 향상에 큰 도움이 되지 못한다.

[†] To whom correspondence should be addressed.

kjlim@kangwon.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이에 최적의 식생여과대 면적을 산정하기 위해 유사저감 효율에 영향을 주는 다양한 인자들에 관한 연구가 진행되었다. Choi and Jang (2014)는 경사도 5%의 경작지를 대상으로 서로 다른 초종(츄파, 피, 바랭이, 잔디, 툴페스큐, 켄터키블루그라스)에 따른 유출저감 효과와 비점오염저감 효과를 분석한 결과 6가지 초종 중에서 잔디를 사용한 식생여과대에서 가장 높은 비점오염저감 효과가 나타났다. Dilaha et al. (1988)은 식생여과대의 길이를 4.6 m와 9.1 m로 다르게 설치하여 가축 방목지에서 발생한 유사저감 효과를 연구하여 각각 81%와 91%의 유사저감 효과를 확인하였다. Patzold et al. (2007)은 서로 다른 길이(3 m, 6 m, 12 m)을 가진 식생여과대를 설치하여 3년간 3가지 제초제의 저감 효율을 비교분석 하였다. 또한 Otto et al. (2012)는 여러 종류의 식생여과대를 설치하여 2007년부터 2009년까지 3년 동안 다양한 강우사상에 대한 제초제 저감 효과를 분석하여 극심한 강우사상 조건에서도 식생여과대의 지속적인 저감 효과를 확인했다. 하지만 현장실험은 다양한 기상 및 지형 조건을 단기간에 고려할 수 없다는 한계점을 가지고 있기 때문에 다양한 조건을 고려하여 식생여과대 유사저감 효율을 모의 할 수 있는 다양한 모델들이 개발되었다. 대표적으로 SWAT (The soil and water assessment tool), VFSMOD-w (Vegetative Filter Strip MODel), WEPP (Water Erosion Prediction Project), GRAPH (GRAss-Phosphorus), GRASSF (Kentucky filter strip model) 등이 있으며, 그 중에서 SWAT 모형은 유역을 대상으로 식생여과대 적용성 평가를 위하여 많이 사용되고 있다(Bosch et al., 2013; Parajuli et al., 2008; Shan et al., 2014).

SWAT 모형은 식생여과대의 유사저감 효율을 산정하기 위하여 White and Arnold (2009)가 개발한 식을 사용하고 있다. White and Arnold (2009)은 식생여과대 유사저감 효율에 영향을 주는 다양한 인자들을 고려하여 여러 가지 시나리오를 설정하고 이를 VFSMOD-w 모형을 통해 모의 한 결과와 현장실험 자료를 바탕으로 식을 개발하였다. 하지만 White and Arnold (2009)가 설정한 시나리오는 미국의 일반적인 경작지 특성을 기초로 설정되었기 때문에 미국 경작지와 다른 특성을 가지고 있는 국내 경작지를 대상으로 적용하기 위해서는 개선이 필요하다. 이에 본 연구의 목적은 국내 경작지 특성을 반영하여 경작지에서의 유출수, 유사발생과 식생여과대의 유사저감 효율에 영향을 미치는 다양한 인자들을 고려하여 시나리오를 설정하고, 이를 VFSMOD-w 모형에 적용하여 SWAT 모형에 적용 가능한 식생여과대 유사저감 효율 산정식을 개발하는 것이다.

2. Materials and Methods

2.1. SWAT 모형 내 식생여과대 모듈

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소에서 개발한 유역 단위 모형으로 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와 토지이용도, 토양속성 그리고 수치지표고모델(DEM)을 입력자료로 하여 장기 유출, 유사 및 비점오염원의 거

동 등을 모의한다. SWAT 모형은 다양한 최적관리기법을 고려한 모의가 가능한데 그 중에서 식생여과대의 유사저감 효율을 모의하기 위해 많이 사용되고 있다(Bosch et al., 2013; Lee et al., 2010; Parajuli et al., 2008). 하지만 기존 SWAT 모형 내 VFS 모듈에 사용되었던 유사저감 효율 산정식(식 (1))은 식생여과대의 유사저감 효율에 영향을 미치는 다양한 인자에 대한 고려 없이 단순히 식생여과대의 폭만을 고려하여 유사저감 효율을 산정한다는 문제점이 있었다. 이에 White and Arnold (2009)는 식생여과대의 폭만을 고려하여 유사저감 효율을 모의했던 기존의 VFS 모듈의 문제점을 개선하기 위하여 식 (2)를 개발하였다.

$$trap_{ef} = 0.367(width_{filtstrip})^{0.2967} \quad (1)$$

여기서, $trap_{ef}$ = 유사 저감 효율(%)
 $width_{filtstrip}$ = 식생여과대의 폭

$$R_R = 75.8 - 10.8 \ln(R_L) + 25.9 \ln(K_{SAT}) \quad (2)$$

$$S_R(\%) = 79.0 - 1.04 S_L + 0.213 R_R$$

여기서, R_R = 유출수 저감률 (%)
 R_L = 유출수량 (mm)
 K_{SAT} = 투수계수 (mm/hr)
 S_L = 단위 식생여과대 면적 당 유입 유사량 (kg/m²)
 S_R = 식생여과대 유사저감 효율 (%)

식 (2)는 다양한 조건을 고려한 1650개의 시나리오를 VFSMOD-w 모형에 적용하여 얻은 결과를 바탕으로 개발되었다. 시나리오의 각 인자들을 살펴보면 강우량은 지속시간 3시간 10 mm ~ 100 mm의 범위로 설정하였으며 토지 피복에 따른 토양유실량의 비율로 정의되는 C-factor는 0.1로 설정하였다. 또한 토양도, 토지이용도 그리고 식생피복 처리 상태 및 수문학적 조건 등 다양한 조건으로 유효우량 발생에 미치는 영향을 나타내는 Curve Number (CN)은 85, 경사도는 2%, 5%, 10% 그리고 식생여과대의 폭은 1 m ~ 2 m의 범위로 설정하였다. 하지만 일반적인 경작지 및 국내 경작지 특성을 고려했을 때 식 (2)를 산정하기 위해 설정한 각 인자들의 범위는 다양한 조건의 경작지를 고려하기에 부족하다. 특히 60% 이상이 7~1 5% 경사도를 가진 국내 경작지를 대상으로 식생여과대의 유사저감 효율을 모의하기 위해서는 급경사에 대한 고려가 필요하다. 또한 강우사상이 발생했을 때 유출수 발생에 많은 영향을 미치는 CN 값은 경작지에 대해서 일반적으로 60~75사이의 값을 사용한다(Jang, 2006; Mishra and Singh, 2003). 식 (2)의 시나리오에서 설정한 CN값인 85는 일반적으로 주거지역이나 공장지역에 해당한다. 실제 경작지에서 CN 값이 80을 넘는 경우는 작물 생장이 모두 끝난 후 지표 대부분이 작물에 의해 피복된 상태에 해당하는 값이다. 하지만 이는 전체 작물 생장기간 중 상당히 짧은 기간으로 작물을 대표하

는 CN 값으로 사용하기에는 적합하지 않다. C-factor 역시 우리나라 경작지에서 주로 재배되는 작물인 콩, 옥수수, 감자 등을 고려했을 때 0.1로 대표하기에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 경작지를 대상으로 식생여과대의 유사저감 효율을 모의하기 위한 새로운 식을 개발하고자 하였다.

2.2. 국내 경작지의 특성

국내 경작지의 일반적인 특성을 반영한 식생여과대의 유사저감 효율 산정식을 개발하기 위해 국립농업과학원에서 개발한 토양환경정보시스템(NAAS, 2015)에서 제공하는 통계자료를 활용하였다. 토양환경정보시스템은 농업환경정보, 농경지화학성, 토양특성, 정밀농업기후도 등의 정보를 제공하는 사이트로써 본 연구에서는 토양환경정보시스템에서 제공하는 다양한 통계자료를 동일한 단위(ha)로 가공하여 국내 경작지의 특성을 조사하였다(Table 1). 조사 결과 국내 경작지의 토양은 양토, 사양토, 미사질 양토가 대부분을 차지했으며 전체적으로 양호한 배수 특성을 나타냈다. 또한 경작지의 약 86%가 1 ha 이하의 소규모 형태이고, 경사도는 전체 면적의 약 60%가 7~15%의 경사도를 나타냈다.

2.3. VFSDMOD-w 모형의 개요

VFSDMOD-w 모형은 시험포 단위 모형으로 식생여과대에

서의 유출, 침투, 유사저감 효율을 모의할 수 있으며, 이미 다양한 현장실험을 통해 모형의 정확도가 검증되었다(Munoz-Carpena et al., 1999). VFSDMOD-w 모형은 설계 강우에 의한 단위유량도를 이용하며, 다양한 조건의 식생여과대를 모의할 수 있도록 식생의 간격, 길이, 경사도, 침투 특성 등의 식생여과대 관련 인자뿐만 아니라 토성과 토양 입자 크기 등 다양한 인자를 고려한 분석이 가능하다. VFSDMOD-w 모형은 크게 3가지 모듈(Infiltration 모듈, Kinematic overland flow 모듈, Sediment filtration 모듈)로 구성되어있다(Fig. 1). Infiltration 모듈은 Green-Ampt 침투 방정식을 이용하여 침투량 및 초과유량을 산정하며, Kinematic overland flow 모듈은 침투층의 유출심과 유출량을 계산한다. Sediment filtration 모듈은 식생여과대로 유입된 유사의 이동과 퇴적을 모의한다(Muñoz-Carpena and Parsons, 2014).

VFSDMOD-w 모형의 입력자료는 시험포의 유출 및 유사발생량 모의를 위한 입력자료와 식생여과대의 유사저감 효율 모의를 위한 입력자료로 구분할 수 있다. 먼저 시험포의 유출 및 유사 발생량 모의를 위한 입력자료는 1) 강우상 및 유출에 영향을 주는 인자(강우량, 강우지속시간, CN 등), 2) 시험포의 지형적 특성 인자(시험포의 길이, 경사도, 면적 등), 3) 시험포의 토양관련 인자(토성, 입자크기 등)가 있으며 이를 통해 시험포의 유출수 및 유사량을 모의한다. 식생여과대로 유입된 유출수와 유사에 대한 저감효율을 모

Table 1. Slope, drainage class, unit size, and soil type of agricultural fields in South-Korea

Slope (%)	0 ~ 2		2 ~ 7		7 ~ 15		15 ~ 30		30 ~ 60		60 ~ 100		Sum
Area (ha)	125,041		437,514		923,778		5,155		0		0		1,491,488
Drainage class	High well		Well		Little Well		Little poor		Poor		High poor		Sum
Area (ha)	77,408		1,286,408		127,671		0		0		0		1,491,488
Unit size (ha)	~0.1	0.1~0.2		0.2~0.3		0.3~0.5		0.5~0.7		0.7~1.0		1.0~	Sum
Area (ha)	205,974	359,598		171,223		284,725		140,349		123,495		206,124	1,491,488
Soil type	Loamy coarse sand	Loamy fine sand	Loamy sand	Fine sandy loam	Sandy loam	Loam	Silt loam	Silt clay loam	clay loam				
Area (ha)	3,132	17,720	9,628	59,192	392,126	661,354	238,662	58,701	40,089				

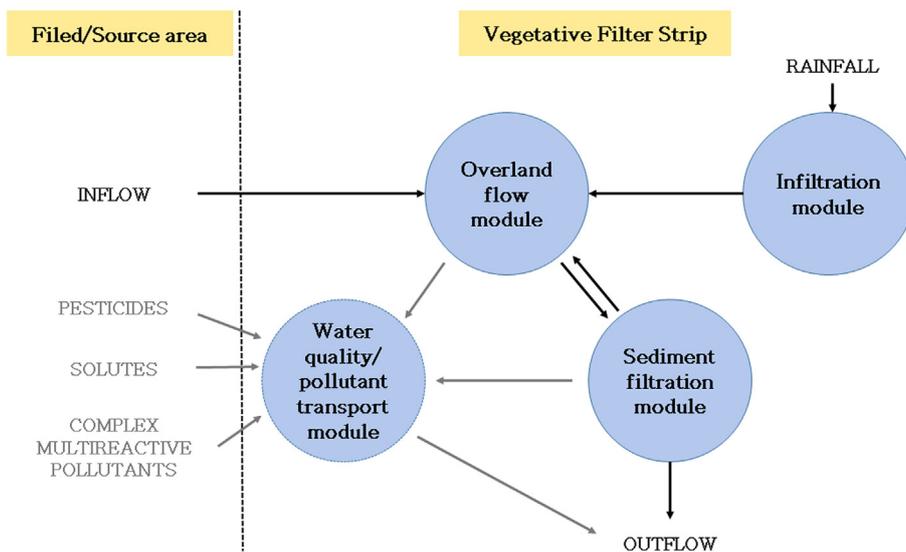


Fig. 1. Schematic depicting of VFSDMOD-w model (Muñoz-Carpena and Parsons, 2014).

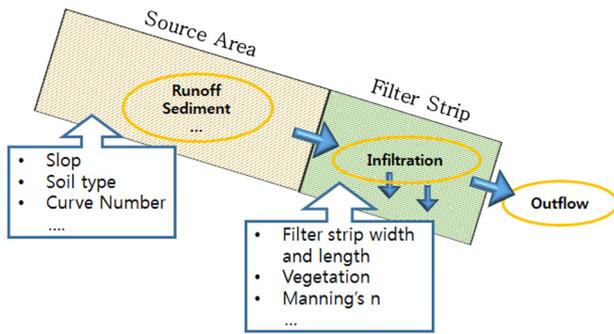


Fig. 2. Hydrologic components at source area and filter strip in VFSMOD-w.

의하기 위한 입력자료는 식생여과대의 폭, 면적, 경사도, 식생의 간격과 길이, 조도계수 등이 있으며, 이를 활용하여 식생여과대에서 유출되는 유출수와 유사량을 모의한다.

2.4. VFSMOD-w 모의를 위한 시나리오 설정

본 연구에서는 국내 경작지 특성 조사 결과를 반영하여 VFSMOD-w 모형 모의를 위한 시나리오를 설정하였다 (Table 2). 강우량과 강우 지속시간은 한국 확률강우량정보 (MLIT, 2012)에서 제공하는 확률강우량도를 사용하여 60분 강우 지속시간의 10년, 20년, 30년 확률강우량에 해당하는 31 mm, 57 mm, 67 mm로 설정하였으며, NRCS의 CN는 59, 68, 77로 선정하였다. 경사도는 완만한 경작지는 물론 급경사지의 경작지 조건까지 고려하기 위하여 2%~20% 넓은 범위를 설정하였다. 토양관련 인자 중 하나인 토성은 국내 경작지에서 가장 많은 양을 나타낸 양토(loam)와 사양토 (sandy loam)를 고려하였으며, 시험포에서 유사 발생 산정을 위한 인자인 USLE 토양보존대책인자(P)는 1.0을, 다양한 작물을 고려할 수 있도록 토양피복인자(C)는 0.1, 0.3, 0.5을 사용하였다.

식생여과대의 면적은 이미 많은 선행연구에서 유사저감 효율에 가장 큰 영향을 주는 인자로 제시되어왔다(Liu et al., 2008; Munoz-Carpena et al., 1999). 하지만 HRU (Hydrologic Response Unit) 별로 유출 및 유사를 모의하는 SWAT 모형의 특성을 고려하였을 때 식생여과대 면적을 그대로 적용하는 것은 한계가 있다. SWAT 모형에서 소유역은 수백 또는 수천개의 HRU로 구성되어 있다. 각각의 HRU는 경작지 전체나 일부분 또는 서로 다른 경작지의 일부분을 나타내

고, 일반적으로 각각의 HRU는 서로 다른 크기와 형상을 가지고 있다. 또한 White and Arnold (2009)는 식생여과대의 유사저감 효율은 HRU의 형상에 큰 영향을 받지 않으며, 시험포 면적에 대한 식생여과대 면적 비(A_R)를 사용하였을 경우 소유역내에 공간적으로 분포하고 있는 모든 HRU에 동일한 비율로 식생여과대를 적용할 수 있음을 확인하였다. 이러한 SWAT 모형의 특성을 고려하여 본 연구에서는 A_R (0.5%~10%)를 인자로 사용하였다. 초종은 국내 경작지를 대상으로 식생여과대 초종에 관한 Choi and Jang (2014)의 연구결과에 따라 잔디를 사용하였다.

시험포 면적은 기존의 식생여과대에 관한 연구에서 많이 고려되지 않았던 조건으로 많은 연구에서 경작지 면적을 고정 한 후 경사도, 초종, 식생여과대 폭 등 여러 인자들에 따른 유사저감 효율 변화를 분석하였다(Kuo and Muñoz-Carpena, 2009; White and Arnold, 2009). 하지만 본 연구에서는 동일한 식생여과대 면적비 조건에서도 시험포 면적의 변화가 식생여과대의 유사저감 효과에 영향을 줄 것으로 가정하고, 이를 분석하기 위하여 다양한 시험포 면적을 설정하였다. 시험포 면적은 폭을 50 m로 고정하고, 시험포의 길이는 10 m~400 m로 설정(0.05~2 ha)하여 다양한 시험포 면적을 고려하였다.

2.5. 식생여과대 유사저감 효율 회귀식 산정

식생여과대의 유사저감 효율에 대한 각 인자들의 영향 정도를 파악하기 위해서는 상관분석을 수행하였다. 이를 위해 본 연구에서는 앞 절에서 설정한 시나리오를 VFSMOD-w 모형을 활용하여 모의한 결과를 활용하였다. 모의 결과를 활용하여 각 인자들에 대해 상관분석을 실시한 후 분석 결과를 반영하여 회귀식 도출을 위한 변수를 설정하였다. 설정된 변수를 통해 유사저감 효율 산정식을 개발하기 위해서는 바람직한 식의 형태를 선정해야 한다. 이를 위해 본 연구에선 CurveExpert (v.2.2.0)를 활용하여 최적의 회귀식을 도출하였다.

CurveExpert는 curve fitting 결과와 데이터 분석을 동시에 제공해주는 cross-platform 프로그램으로 다양한 선형 회귀 모델과 비선형 회귀모델을 제공해준다. 기본적으로 60개가 넘는 식 형태를 제공하고 있으며, 사용자가 직접 식의 형태를 입력할 수 있다는 장점이 있다. 또한 CurveExpert는 최적의 회귀식과 매개변수 산정결과를 그래프 및

Table 2. Selection and application of model parameters to explore runoff and sediment yield variations

Model parameter	Used values	Number of model parameter phase	Total scenario number
Rainfall (mm/60min)	31, 57, 67	3	3×3×2×10×1×3 ×11×9×1=53460
CN	59, 68, 77	3	
Soil type	Sandy loam, Loam	2	
Slope (%)	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20	10	
USLE P-factor	1	1	
USLE C-factor	0.1, 0.3, 0.5	3	
Ratio of VFS area to source area (%)	0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	11	
Source area (ha)	0.05, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2	9	
Vegetation	Turf grass	1	

통계분석 결과(결정계수, 상관계수, 표준오차 등)와 함께 제공해준다(Hyams, 2011). 본 연구에서는 상관분석을 통해 선정된 변수들을 CurveExpert에 적용하여 도출된 회귀식의 결정계수와 그래프를 비교하여 최적의 회귀식을 선정하였다.

3. Results and Discussion

3.1. 시나리오 모의 결과

53460 개의 시나리오 모의 결과를 바탕으로 식생여과대의 유사저감 효율에 대한 각 시나리오 설정 인자들의 영향 정도를 파악하기 위하여 상관 분석을 수행하였다. Table 3 은 각 인자별 상관계수를 정리한 것이다.

상관분석 결과 시험포 면적에 대한 식생여과대 면적비 (A_R)의 상관계수가 0.45로 가장 큰 값을 나타냈으며 그 다음으로 경사도>시험포 면적>CN>C-factor>강우량 순으로 나타났다. 아래의 표는 시나리오 일부를 정리한 것으로 가장 높은 상관계수를 나타낸 세 가지 인자(A_R , 경사도, 시험포 면적)에 따른 유사저감 효율을 정리한 것이다.

Table 4는 A_R 을 제외한 다른 인자들(토성, 경사도, 시험포 면적, CN, C-factor, 강우강도)이 동일할 때, A_R 변화에 따른 유사저감 효율을 나타낸 것이다. A_R 변화에 따른 유사저감 효율은 12.9%~83.7% 범위로 최대 70.8%의 차이를 나타냈다. Table 5는 경사도를 제외한 다른 인자들(토성, A_R , 시험포 면적, CN, C-factor, 강우강도)이 동일할 때 경사도 변화에 따른 유사저감 효율을 나타낸 것이다. Table 5와 같이 경사도 변화에 따른 유사저감 효율은 25.4%~94.7%로 최대 69.3% 차이를 보여 A_R 과 비슷한 차이를 보였다. 마지막으로 Table 6은 시험포의 면적을 제외한 다른 인자들(토성, A_R , 경사도, CN, C-factor, 강우강도)이 일정할 때 시험포 면적 변화에 따른 유사저감 효율을 나타낸 것이다. Table 6과 같이 시험포 면적 변화에 따른 유사저감 효율은 45.7%~92.5% 범위를 나타냈으며 최대 46.8%의 차이를 보여 앞의 두 인자(A_R 과 경사도)와 비교하여 가장 작은 차이를 나타냈다. 하지만 Table 3과 Table 6에서 알 수 있듯이 앞 절(2.4 VFSMOD-w 모의를 위한 시나리오 설정)에서 예상한 것과 같이 동일한 A_R 조건일지라도 시험포 면적의 증가는 유사저

Table 3. Correlation coefficients of model parameters and sediment trapping efficiency

Model parameter	A_R	Slope	Source area	CN	C-factor	Rainfall
Correlation coefficient	0.45	-0.44	-0.40	-0.31	-0.29	-0.24

A_R : Ratio of VFS area to Source area

Table 4. Variation of sediment trapping efficiency with A_R changes

Soil type	A_R (%)	Slope (%)	Source area (m ²)	CN	C-factor	Rainfall / 60min (mm)	Sediment trapping efficiency (%)
Loam	0.5	10	200	0.5	68	68	12.9
Loam	1	10	200	0.5	68	68	21.2
Loam	2	10	200	0.5	68	68	34.5
Loam	3	10	200	0.5	68	68	45.4
Loam	4	10	200	0.5	68	68	54.4
Loam	5	10	200	0.5	68	68	61.9
Loam	6	10	200	0.5	68	68	68.1
Loam	7	10	200	0.5	68	68	73.2
Loam	8	10	200	0.5	68	68	77.4
Loam	9	10	200	0.5	68	68	80.9
Loam	10	10	200	0.5	68	68	83.7

Table 5. Variation of sediment trapping efficiency with Slope changes

Soil type	A_R (%)	Slope (%)	Source area (m ²)	CN	C-factor	Rainfall / 60min (mm)	Sediment reduction (%)
Loam	4	0.2	200	0.5	68	68	25.4
Loam	4	0.18	200	0.5	68	68	28.3
Loam	4	0.16	200	0.5	68	68	32.1
Loam	4	0.14	200	0.5	68	68	37.2
Loam	4	0.12	200	0.5	68	68	44.2
Loam	4	0.1	200	0.5	68	68	54.4
Loam	4	0.08	200	0.5	68	68	67.0
Loam	4	0.06	200	0.5	68	68	80.1
Loam	4	0.04	200	0.5	68	68	87.3
Loam	4	0.02	200	0.5	68	68	90.8
Loam	4	0.01	200	0.5	68	68	94.7

Table 6. Variation of sediment trapping efficiency with Source area changes

Soil type	A_R (%)	Slope (%)	Source area (m^2)	CN	C-factor	Rainfall / 60min (mm)	Sediment reduction (%)
Loam	4	10	400	0.5	68	68	45.7
Loam	4	10	350	0.5	68	68	47.3
Loam	4	10	300	0.5	68	68	49.2
Loam	4	10	250	0.5	68	68	51.4
Loam	4	10	200	0.5	68	68	54.4
Loam	4	10	150	0.5	68	68	58.3
Loam	4	10	100	0.5	68	68	64.1
Loam	4	10	50	0.5	68	68	74.3
Loam	4	10	10	0.5	68	68	92.5

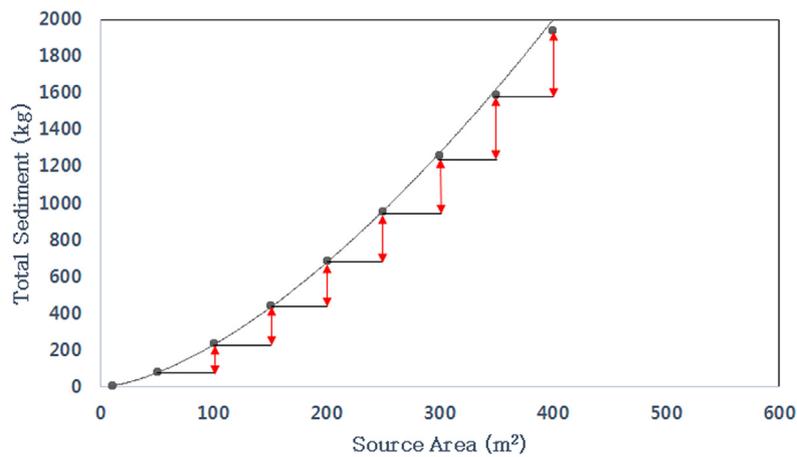


Fig. 3. Exponential relationship of sediment yield (kg/m^2) and source area (m^2).

감 효율에 영향을 주었다. 이는 시험포 면적과 발생 유사량이 정확히 비례관계를 가지지 않기 때문에 Fig. 3과 같이 시험포 면적이 일정한 폭으로 증가될 때 유사 발생량의 증가폭은 기하급수적으로 커지기 때문으로 판단되었다.

3.2. 식생여과대의 유사저감 효율 산정식 개발

회귀식의 변수는 상관 분석 결과를 반영하여 가장 높은 상관성을 나타낸 시험포 면적에 대한 식생여과대의 면적비 (A_R)를 변수로 결정하였다. 또한 시험포 면적과 유사량을 함께 고려하기 위하여 단위 시험포 면적 당 발생 유사량 (S_S)을 변수로 결정하였다. White and Arnold (2009)이 개발한 식 (2)의 경우 회귀식 변수로 단위 식생여과대 면적당 부하 유사량(S_L)을 선정하여 회귀식을 도출하였다. 하지만 민감도 분석 결과 본 연구에서는 S_L 과 S_S 의 상관계수는 각각 -0.59, -0.68로 S_S 의 상관계수가 더 크게 나타나 S_S 가 식생여과대 유사저감 효율에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 S_S 와 A_R 을 회귀식의 변수로 선정하였다. 선정된 변수를 CurveExpert에 적용하여 다양한 선형 및 비선형 회귀식을 도출해낸 후 각 회귀식 별 결정계수와 그래프를 비교하여 최적의 유사저감 회귀식을 도출했다. 식 (3)은 본 연구에서 개발한 식생여과대의 유사저감 효율 산정식의 최종 형태이며 Fig. 4는 CurveExpert에서 제공한 3차원 그래프이다.

$$S_R = \frac{(2.30E+07)(2.17E+09)A_R - (2.83E+08)S_S}{1 + (2.06E+07)A_R + (4.74E+07)S_S} \quad (3)$$

여기서, S_R = 식생여과대 유사저감 효율(%)
 S_S = 단위 시험포 면적 당 발생 유사량(kg/m^2)
 A_R = 시험포 면적에 대한 식생여과대의 면적비(%)

식 (3)에서 R_S 는 식생여과대의 유사저감 효율(%), A_R 는 시험포 면적에 대한 식생여과대의 면적 비율, S_S 는 단위 시험포 면적 당 발생 유사량이다. Fig. 5는 식생여과대의 유사저감 효율을 본 연구에서 개발한 식과 VFSSMOD-w모형을 활용하여 모의한 결과를 비교한 그림이다. 식 (3)의 유사저감 효율 산정 결과를 VFSSMOD-w모형에 의한 유사저감 효율과 검증한 결과 결정계수(R^2)와 Nash-sutcliffe efficiency (NSE)는 각각 0.987, 0.977로 매우 높은 값을 나타냈다. 하지만 Fig. 5에서 박스로 표시한 부분에서 식 (3)결과와 VFSSMOD-w모형 결과 간 큰 차이가 발생하였다. 이에 대한 원인을 분석하기 위해 식 (3)을 분석한 결과 Fig. 6과 같았다.

식 (3)으로 산정한 식생여과대의 유사저감 효율을 분석한 결과 A_R 이 1% 이하일 때 VFSSMOD-w 모형과 비교하여 유사저감 효율을 과소평가하는 경우가 발생했다. 따라서 식 (3)은 A_R 이 1% 이하인 식생여과대를 모의할 경우 유사저감 효율이 과소평가될 수 있다는 한계점을 가지고 있다.

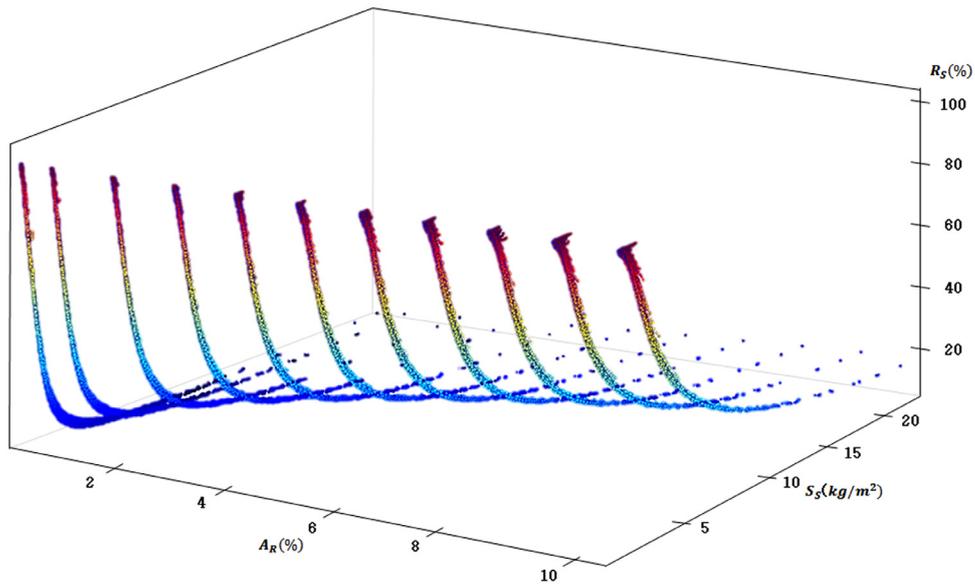


Fig. 4. Three dimensional graph of AR, SS, and RS to retrieve a regression.

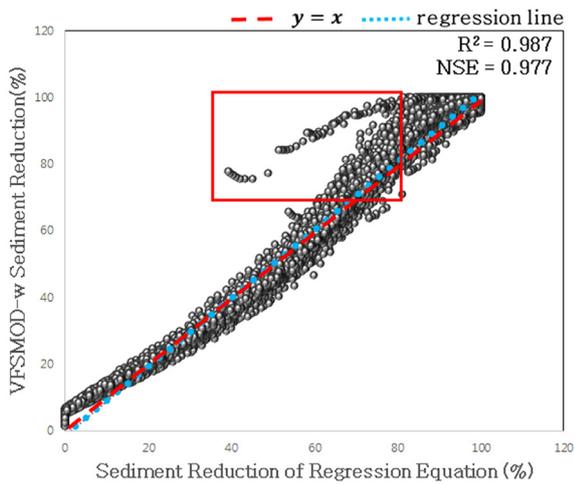


Fig. 5. Comparison of sediment trapping efficiencies by regression and VFSMOD-w model.

4. Conclusion

본 연구에서는 국내 경작지를 대상으로 식생여과대의 유사저감 효율을 모의할 수 있도록 SWAT 모형 내 식생여과대 모듈을 개선하기 위한 새로운 유사저감 효율 산정식을 개발하였다. 이를 위해 VFSMOD-w 모형을 이용하여 다양한 조건을 고려한 시나리오를 모의하였으며, 모의한 결과를 바탕으로 식생여과대의 유사저감 효율 예측을 위한 새로운 식을 제시하였다.

국내 경작지 특성을 고려한 시나리오를 설정하기 위하여 국내 경작지 특성을 조사하였으며, 조사 결과를 바탕으로 VFSMOD-w 모형 모의를 위한 시나리오를 설정했다. 총 53460개의 시나리오 결과를 활용하여 각 인자들에 대하여 민감도 분석을 하였다. 분석 결과 시험포 면적에 대한 식생여과대 면적비(A_R)와 단위 시험포 면적 당 발생 유사량

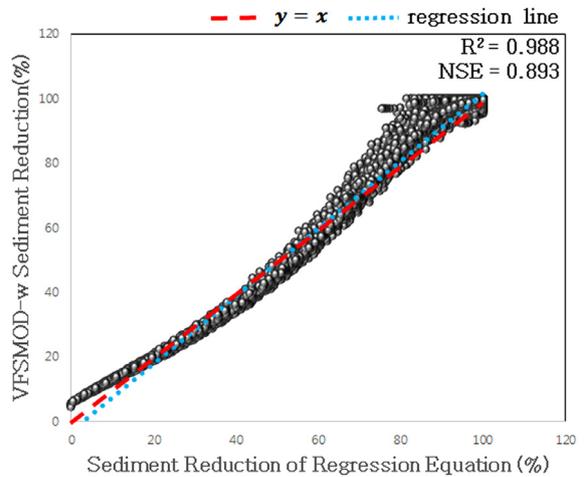
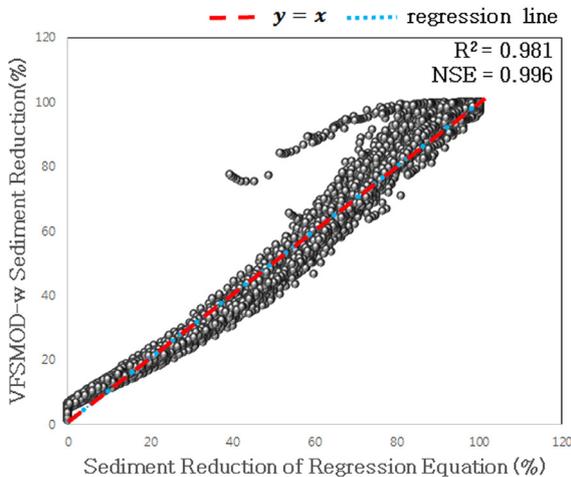


Fig. 6. Comparison of sediment trapping efficiencies by regression and VFSMOD-w model with A_R of 0.5 ~ 1% (left) and 2 ~ 10% (right).

(S_s)의 상관계수가 가장 높게 나타났다. 또한 기존에 식생여과대 설계 시 고려되지 않았던 경작지 면적 변화에 따른 식생여과대의 유사저감 효율 변화를 분석하였다. 분석결과 동일한 면적비로 식생여과대를 설치할지라도 시험포 면적에 따라 유사저감 효율에 차이가 있었다. 이에 본 연구에서는 S_s 를 새로운 변수로 제시하였다. S_s 와 현재 SWAT 모형에서 유사저감 효율 산정식의 변수인 S_L (단위 식생여과대 면적 당 유입유사량)과 유사저감 효율과의 상관계수를 산정한 결과 각각 -0.68과 -0.59로 본 연구에서 제시한 S_s 가 유사저감 효율에 더 많은 영향을 주는 것으로 나타났다. 결과적으로 본 연구에서 제시한 식생여과대 유사저감 산정식은 VFSMOD-w 모형과 비교하여 R^2 와 NSE 각각 0.987, 0.977로 거의 1에 가까운 값을 나타냈다.

하지만 본 연구에서 개발한 식은 식생여과대의 길이가 시험포 길이의 1% 이하일 경우에는 과소평가 할 가능성이 있다. 따라서 추후 이 문제점에 대한 원인분석 및 해결을 통해 본 식의 개선이 필요하다. 또한 현장실험 자료의 부재로 본 연구에서 개발한 식의 검증이 되지 못했다는 한계점이 있다. 이에 추후 체계적이고 장기간에 걸친 현장실험 자료를 통해 본 연구에서 개발한 식의 검증이 요구된다. 하지만 본 연구에서 제시한 식생여과대의 유사저감 효율 산정식을 SWAT 모형의 식생여과대 모듈에 적용한다면 국내 경작지를 대상으로 보다 정확한 식생여과대 유사저감 효율 모의가 가능 할 것으로 판단되며 이를 통해 효율적인 식생여과대의 현장적용이 가능할 것으로 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 물관리사업의 연구비지원(14AWMP-B082564-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Bosch, N. S., Allan, J. D., Selegean, J. P., and Scavia, D. (2013). Scenario-testing of Agricultural Best Management Practices in Lake Erie Watersheds, *Journal of Great Lakes Research*, 39(3), pp. 429-436.
- Choi, K. S. and Jang, J. R. (2014). Selection of Appropriate Plant Species of VFS (Vegetative Filter Strip) for Reducing NPS Pollution of Uplands, *Journal of Korea Water Resources Association*, 47(10), pp. 913-983. [Korean Literature]
- Dillaha, T. A., Sherrard, J. H., Lee, D., Mostaghimi, S., and Shanholtz, V. O. (1988). Evaluation of Vegetative Filter Strips as a Best Management Practice for Feed Lots, *Journal of the Water Pollution Control Federation*, pp. 1231-1238.
- Hyams, D. (2011). *CurveExpert Professional: documentation*, pp. 1-2.
- Jang, B. (2006). *The Assessment of Appropriate Runoff CN(CN) According to Basin Characteristics*, Master's Thesis, Chungbuk National University, pp. 25-37. [Korean Literature]
- Kim, S. K. and Lee, B. C. (2006). The Status of Nonpoint Pollution Source Management in Urban Area, *Korean Society of Civil Engineers*, 54(8), pp. 129-136. [Korean Literature]
- Kim, S. S., Kim, J. S., Bang, K. Y., Kwon, E. M., and Jung, U. J. (2002). The Estimation of the Unit Load and Characteristics of Non-point Source Discharge According to Rainfall in Kyongan Watershed, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 24(11), pp. 2019-2027. [Korean Literature]
- Kuo, Y. M. and Muñoz-Carpena, R. (2009). Simplified Modeling of Phosphorus Removal by Vegetative Filter Strips to Control Runoff Pollution from Phosphate Mining Areas, *Journal of Hydrology*, 378(3), pp. 343-354.
- Lee, M., Park, G., Park, M., Park, J., Lee, J., and Kim, S. (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), pp. 826-833.
- Liu, X., Zhang, X., and Zhang, M. (2008). Major Factors Influencing the Efficacy of Vegetated Buffers on Sediment Trapping: A Review and Analysis, *Journal of Environmental Quality*, 37(5), pp. 1667-1674.
- Ministry of Land Infrastructure Transport. (MLIT). (2012). *Korea Precipitation Frequency Data Server*, <http://www.k-idf.re.kr> (accessed April 2015)
- Mishra, S. K. and Singh, V. P. (2003). Soil Conservation Service CN (SCS-CN) Methodology, *Springer Science and Business Media*, pp. 42.
- Muñoz-Carpena, R. and Parsons, J. E. (2014). *Vegetative Filter Strips Modeling System*, Model Document & User's Manual, pp. 1-6.
- Munoz-Carpena, R., Parsons, J. E., and Gilliam, J. W. (1999). Modeling Hydrology and Sediment Transport in Vegetative Filter Strips, *Journal of Hydrology*, 214(1), pp. 111-129.
- National Academy of Agricultural Science. (NAAS). (2015). *Agricultural Soil Information System (ASIS)*, <http://soil.rda.go.kr> (accessed April 2014)
- Oh, Y. T., Park, J. C., Kim, D. S., and Rhyu, J. G. (2004). Pollutant Characteristics of Nonpoint Source Runoff in Okcheon Stream, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(2), pp. 159-165. [Korean Literature]
- Otto, S., Cardinali, A., Marotta, E., Paradisi, C., and Zanin, G. (2012). Effect of Vegetative Filter Strips on Herbicide Runoff under Various Types of Rainfall, *Chemosphere*, 88(1), pp. 113-119.
- Parajuli, P. B., Mankin, K. R., and Barnes, P. L. (2008). Applicability of Targeting Vegetative Filter Strips to Abate Fecal Bacteria and Sediment Yield using SWAT, *Agricultural Water Management*, 95(10), pp. 1189-1200.
- Park, Y. S. and Hyun, G. W. (2014). Optimization of Vegetative Filter Strip using VFSMOD-w model and Genetic-Algorithm, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(2), pp. 159-165. [Korean Literature]
- Park, Y. S., Kim, J. G., Kim, N. W., Kim, K. S., Choi, J. D., and Lim, K. J. (2007). Analysis of Sediment Yields at Watershed Scale using Area/Slope-Based Sediment Delivery Ratio in SATEEC, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 23(5), pp. 650-658. [Korean Literature]
- Pätzold, S., Klein, C., and Brümmer, G. W. (2007). Run-off Transport of Herbicides During Natural and Simulated Rainfall and Its Reduction by Vegetated Filter Strips, *Soil Use*

- and Management*, 23(3), pp. 294-305.
- Schmitt, T. J., Dosskey, M. G., and Hoagland, K. D. (1999). Filter Strip Performance and Processes for Different Vegetation, Widths, and Contaminants, *Journal of Environmental Quality*, 28(5), pp. 1479-1489.
- Shan, N., Ruan, X. H., Xu, J., and Pan, Z. R. (2014). Estimating the Optimal Width of Buffer Strip for Nonpoint Source Pollution Control in the Three Gorges Reservoir Area, China, *Ecological Modelling*, 276, pp. 51-63.
- White, M. J. and Arnold, J. G. (2009). Development of a Simplistic Vegetative Filter Strip Model for Sediment and Nutrient Retention at the Field Scale, *Hydrological Processes*, 23(11), pp. 1602-1616.