

초생대를 이용한 산지유역 토사유출 저감에 관한 연구

손광익 · 김형준 · 임경재* · 정영훈**†

영남대학교 건설시스템공학과

*강원대학교 지역건설공학과

**강원대학교 환경연구소

Study on Sediment Runoff Reduction using Vegetative Filter Strips in a Mountainous Watershed

Kwangik Son · Hyungjoon Kim · Kyoung Jae Lim* · Younghun Jung**†

Department of Civil Engineering, Yeungnam University

*Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

**Institute of Environmental Research, Kangwon National University

(Received 22 June 2015, Revised 22 July 2015, Accepted 23 July 2015)

Abstract

Soil loss is one of the significant disasters which have threatened human community and ecosystem. Particularly, Korea has high vulnerability of soil loss because rainfall is concentrated during summer and mountainous regions take more than 70% of total land resources. Accordingly, the sediment control management plan are required to prevent the loss of soil resources and to improve water quality in the receiving waterbodies. In this regard, the objectives of this study are 1) to quantify the effect of the Vegetative Filter Strip (VFS) on sediment runoff reduction and 2) to analyze the relationship of rainfall intensity and sediment runoff. For this, SATEEC and VFSMOD were used to estimate sediment runoff according to rainfall intensity and to quantify the effect of VFS on sediment runoff reduction, respectively. In this study, the VFS has higher impact on sediment reduction for lower maximum rainfall intensity, which means that the maximum rainfall intensity is one of significant factors to control sediment runoff. Also, the sediment with VFS considered was highly correlated with maximum rainfall intensity. For these results, this study will contribute to extend the applicability of VFS in establishing eco-friendly sediment control plans.

Key words : SATEEC, Sediment, Soil loss, VFSMOD-w, VFS

1. Introduction

우리나라 국토의 70% 이상이 산지로 이루어져 매년 빈번하게 발생하는 산불 및 벌목, 건설활동 등으로 인하여 환경급변지역에서의 토사유출이 발생하여 인한 인적·물적 피해가 날로 심각해지고 있는 실정이다. 이러한 토사유출로 인한 피해를 최소화하고 대처하기 위해서는 유역내 강우-유출 특성을 파악하고 토양유실 발생 및 이동을 고려한 유역 맞춤형 토사유출 저감대책을 수립하여야 한다(Jang et al., 2015; Lee et al., 2014). 그동안 토사유출로 인한 피해를 막기 위해 국내에서는 주로 침사지나 사방댐 등의 수리 구조물을 사용한 최적관리기법(Best Management Practice)을 시도하

고 있다. 그러나 국외에서는 이와 같은 구조적 대책과 함께 최근 환경적인 측면에서 보다 효율적인 방법으로 여겨지는 초생대, 녹비작물, 지표피복, 식생발두렁 등의 대책들이 많이 활용되어 왔으며, 그 중에 초생대를 이용한 연구들이 많이 진행되어 왔다(Dilaha et al., 1989; Patzold et al., 2007; Robinson et al., 1996).

이러한 초생대의 토양유실 저감 효과는 발생원의 다양한 특징 및 강우 이벤트에 따라서 많은 차이가 발생할 수 있기 때문에 이러한 모든 발생인자들을 고려하여 최적의 초생대 설계를 하기에는 현실적으로 어려움이 따른다. 이러한 이유로 강우유출과 토사유출에 미치는 초생대의 영향을 고려할 수 있는 VFSMOD (Vegetative Filter Strip MODEL) 모형이 개발되어 전 세계적으로 널리 이용되고 있으며, VFSMOD 적용 사례 및 민감도 분석 등에 대한 연구도 다양하다. 이러한 VFSMOD와 관련한 연구를 살펴보면 다음과 같다. Abu-Zreig et al. (2001)은 초생대의 길이 1~15 m, 초생대의 경사 2~12%이며, 초생대의 토성은 사양토(Sandy loam), 양토(Loam), 점토(Clay), 조도계수(Manning roughness of coeffi-

† To whom correspondence should be addressed.
jung.younghun@gmail.com

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.

cient)는 0.04~0.4 범위에서 유입토사의 종류가 모래, 점토, 실트인 경우 VFSMOD에서 초생대 유사 저감 효율에 미치는 영향을 파악하였다. 그 결과 초생대의 길이와 유입토사의 종류가 유사 저감 효과에 가장 영향을 많이 주는 인자로 나타났으며, 그 다음은 조도계수, 초생대의 경사, 초생대의 토성 순으로 나타났다. Munoz-Carpena and Parsons (2004)은 North Dakota주의 TMDL(Total Maximum Daily Load)기준을 75%로 맞추기 위한 초생대 조건을 실험하기 위해 VFSMOD를 적용하였다. 시험 결과, 다코다주에 설치된 초생대 길이 6.1m로서는 TMDL 75% 기준을 만족하기에는 부족하며, 이를 만족하기 위해서는 초생대 길이 최소 8m 이상은 되어야 하는 것으로 조사되었다. Park (2009)은 초생대에 의한 유사 저감 효과에 있어서 초생대의 폭만을 고려하는 SWAT 모형을 개선하기 위해 VFSMOD 모형의 결과값을 이용하여 SWAT 모형의 초생대 유사 저감 효과 모형을 보정하였다. VFSMOD를 통해 여러 가지 인자가 초생대 유사 저감 효과에 미치는 관계를 파악하였는데 초생대 폭이 유사 저감 효과에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. Kum et al. (2012)는 다양한 최적관리기법 가운데 초생대의 유사 저감 효과를 산정하기 위한 모형을 개발하고 평가하였다.

국내 연구사례를 살펴보면 농업 비점오염 저감을 위해 초생대를 적용한 사례로는 농촌진흥청 고령지농업연구소에서 수행된 연구(Lee et al., 2005)와 Choi and Jang (2012)에 의해 진행된 현장적용 연구가 유일하다. Lee et al. (2005)는 경사 17%, 토성이 양토인 고령지 무재배지에서 등고선 방향으로 하단부에 폭 1.0m의 호밀·옥수수 초생대 설치구와 사경 마구리에 호밀초생대를 설치하여 토양유실 경감 효과를 평가하였다. Choi and Jang (2012)은 다양한 초생대 초종을 적용하여 우리나라 밭 경지에 적합한 초종을 파악

하여 잔디가 비점오염저감효과와 유지관리측면에서 가장 유리한 초종인 것으로 조사되었다. 또한 Choi and Jang (2014)은 6개의 초종을 선정하여 초생대를 조성하고 평가한 결과 전반적으로 TS, T-P, T-N에서 초생대로 인해 전반적으로 높은 비점오염저감효과를 보였고 반면 BOD, TOC와 NC3에서는 낮은 오염저감 효과를 나타내는 것으로 조사되었다. 이상의 연구를 살펴보면, 초생대에 관한 대부분의 연구 사례는 농경지 밭의 사례이며, 국내의 경우 산림 유역에 적용한 사례는 전무한 실정이다.

이에 본 연구의 목적은 경상북도 금호강 유역의 산지 유역을 대상유역으로 선정하여 1) 토양유실량 우심 유역 선정 후 초생대 설치에 따른 토사유출 저감 효과를 정량적으로 평가하고, 2) 또한 토사유출 관리 정책 수립에 활용할 수 있는 유출토사량과 강우강도의 관계를 분석하는데 있다.

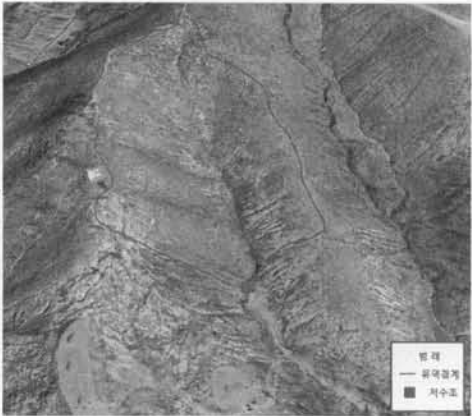
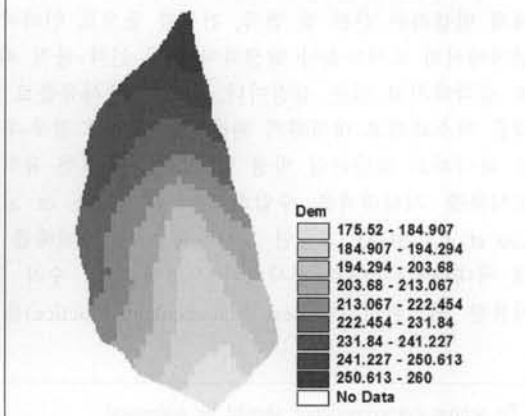
2. Materials and Methods

2.1. 대상지역 선정과 강우 및 유사량 측정

대상유역은 강우사상에 따른 강우량 등의 수문기상자료와 토사유출량 및 유출량 등의 계측이 원활히 이루어질 수 있는 지역을 검토하여 대상지역을 선정하였다. 또한 현장관리와 실측의 편리성을 고려하여 접근성이 용이한 지점을 고려하여 대상유역은 경상북도 칠곡군 지천면 심천유역 선정하였다. 대상유역의 고도는 188m이며 유역면적은 2.54ha, 연평균강우량은 약 748mm이다(Table 1).

대상 유역의 강우량 계측을 위해 고정밀 압력식 수위센서(PLN WATER LEVEL SENSOR)로써 데이터로거(TCP-RT200)를 사용하였다. 데이터로거는 10분단위로 웹상에 자동으로 자료를 전송하는 방식이다. 강우량계의 경우 전도형 강우센서를 이용하였으며 이 또한 무선인터넷 데이터 통신

Table 1. Description of the Study Watershed

Study Watershed	
Location	San 2-12, Simcheon-ri, Jicheon-myeon, Chilgok-gun, Gyeongsangbuk-do, Korea Latitude: N35° 58' 40.68783" Longitude: E128° 31' 13.57138" Elevation:188 EL. 188m
Geography	 
Area	2.54 ha (125 m × 375 m)
Rainfall	Average annual rainfall: 748 mm
History	Forest Fire occurred in April 2009 Hydrological monitoring has been conducted since April 2010

을 이용, 10분 단위 강우량을 웹서버로 전송을 해준다. 두 장치 모두 전원장치로 Solar Panel과 축전지를 사용하기 때문에 실시간 무인 자동화 계측 시스템을 구축하였다. 또한 유압식 센서의 경우 바닥에서 약 30 cm 정도의 이격공간을 가지고 설치했으며, 수위계의 기준면은 바닥에서부터 50 cm로 설정하여 측정하였다.

또한 토사 유출량 계측을 위해 폭 4.5 m, 길이 5.5 m, 저류조 깊이 1.96 m로 구성되어 있으며 콘크리트 두께 20 cm로 이루어진 저류조를 설치하였다. 바닥에서부터 위어 출구까지의 높이는 1.5 m로 구성되어 있다. 저류조의 강우시 유출은 위어를 통해서만 배출이 되도록 만들어 저 있으며 강우가 적어 강우 시 위어를 통해 배출되지 못한 빗물은 저류조 바닥의 배수밸브를 통해 밖으로 배출되도록 만들어져 있다. 또한 위의 후자에 해당하는 상황 시 저류조 속의 빗물배수 시 소류사의 배출을 방지하기 위해 배수밸브에 높이 10 cm 정도의 턱을 두어 소류사 유출을 방지할 수 있도록 하였다.

2.2. 초생대 적용에 따른 토사유출 저감효율 산정 기법

본 연구에서는 대상유역을 대상으로 SATEEC 2.0을 활용하여 토사유출량에 대해 산정하고, 실측된 강우량과 유출량을 활용하여 초생대 적용에 따른 유사저감효율에 대해 산정하기 위해 VFSSMOD-w 프로그램을 사용하였다. 초생대를 이용한 토사유출저감 효과 분석 단계에는 크게 4단계가 있으며 이는 대상유역 실측단계, SATEEC을 이용한 토사유출량 산정 단계, VFSSMOD를 이용한 초생대 적용단계, 토사유출저감효과 분석 단계 등으로 구분할 수 있다. 본 연구의 수행 모식도는 Fig. 1과 같다.

2.3. SATEEC의 개요

SATEEC ArcView GIS 시스템은 Fig. 2와 같이 USLE에서 제공하는 5개의 입력자료(강우침식인자: R, 토양침식인자: K, 수치표고지도: DEM, 토지피복인자: C, 토양보전대책인자: P)만을 이용하여 누구나 손쉽게 유역내 토양유실 및 유사발

생과, 유역면적 및 하천 평균경사에 따른 토사전달률(Sediment Delivery Ratio, SDR)을 산정하여 유역에서 유실된 토양이 얼마만큼 하류로 유달 되는지를 모의 할 수 있는 프로그램으로, 유역 내 임의의 지점에서 토양유실 방지대책을 수행하였을 경우 하류부에 얼마만큼의 유사 발생을 저감시킬 수 있는지를 모의할 수 있는 프로그램이다. SATEEC은 DEM을 이용하여 지형인자(LS)를 산정하며, 토양유실량의 모의에 있어 유역의 태풍등과 같은 집중성 강우를 고려할 수 있도록 일단위 강우자료를 사용하여 유역내 토양 침식량을 모의한다. 이렇게 산정된 토사침식량은 토사전달률(SDR)의 개념을 이용하여 유역의 최종 유출구나 유역내 임의의 지점에서의 유사량을 산정한다. SATEEC의 보다 자세한 내용은 Lim et al. (2003)에서 이용가능하다. SATEEC은 강원도 산지지역에 적용된 사례가 있어 본 연구에서 토양 침식량을 산정하기 위하여 사용되었다(Lim et al., 2011).

2.4. VFSSMOD-w의 개요

VFSSMOD-w 모형(Muñoz-Carpena and Parsons, 1999)은 시험포 단위(field-scale) 모형으로서 인접하고 있는 발생원에서 초생대로의 유출수와 유사 저감 효율을 모의한다. 또한 모형내 강우 분포에 의해 발생원에서의 유출량을 모의한 후, 초생대의 여러 조건뿐만 아니라, 각기 다른 입자 크기를 갖는 유사에 대한 분석이 가능하다는 장점이 있다. VFSSMOD-W 모형은 시험포의 유출-침투 특성을 위해 Green-Ampt 침투 방정식을 이용하여 발생원에서의 유출량 및 침투량을 모의하며, 초생대로의 유출수에 대해 Kinematic Overland Flow를 이용하여 유출심과 유출량 모의를 한다. 그리고 초생대로의 유입되는 유사의 운반과 퇴적 그리고 초생대 밖으로의 유출되는 유사를 모의하기 위해 Sediment Filtrations 모듈을 이용한다(Fig. 3). VFSSMOD-w 모형의 자세한 내용은 Park (2009)서 이용가능하다.

2.5. 초생대 적용을 위한 P값 산정 방법

초생대 적용을 위해 초생대 적용유역 선정, 강우입력자료

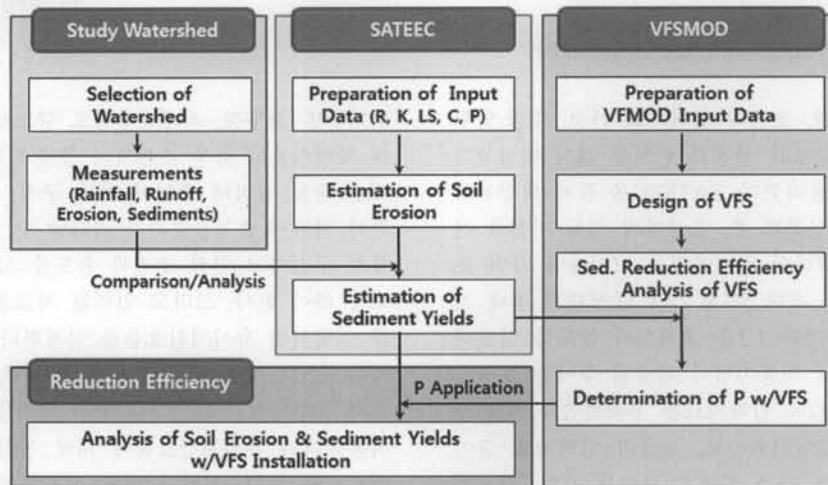


Fig. 1. Diagram for estimating sediment runoff reduction efficiency.

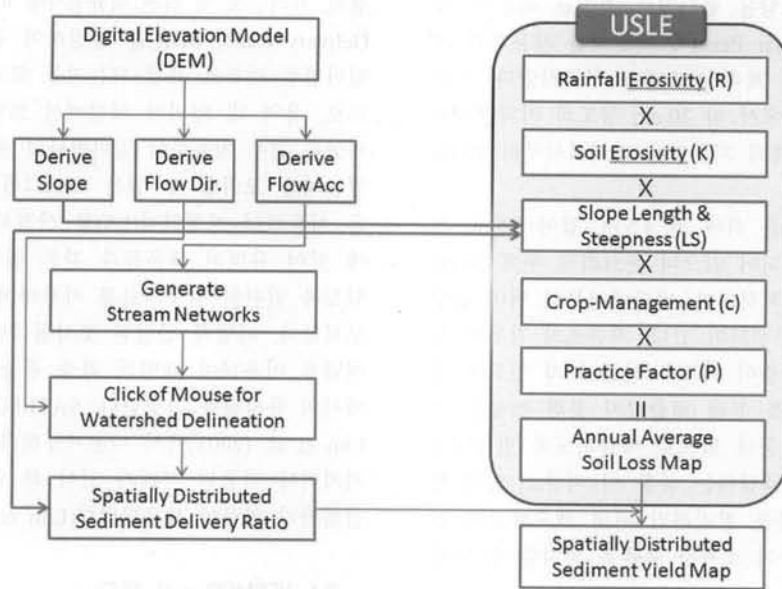


Fig. 2. SATEEC ArcView GIS System (Lim et al., 2003).

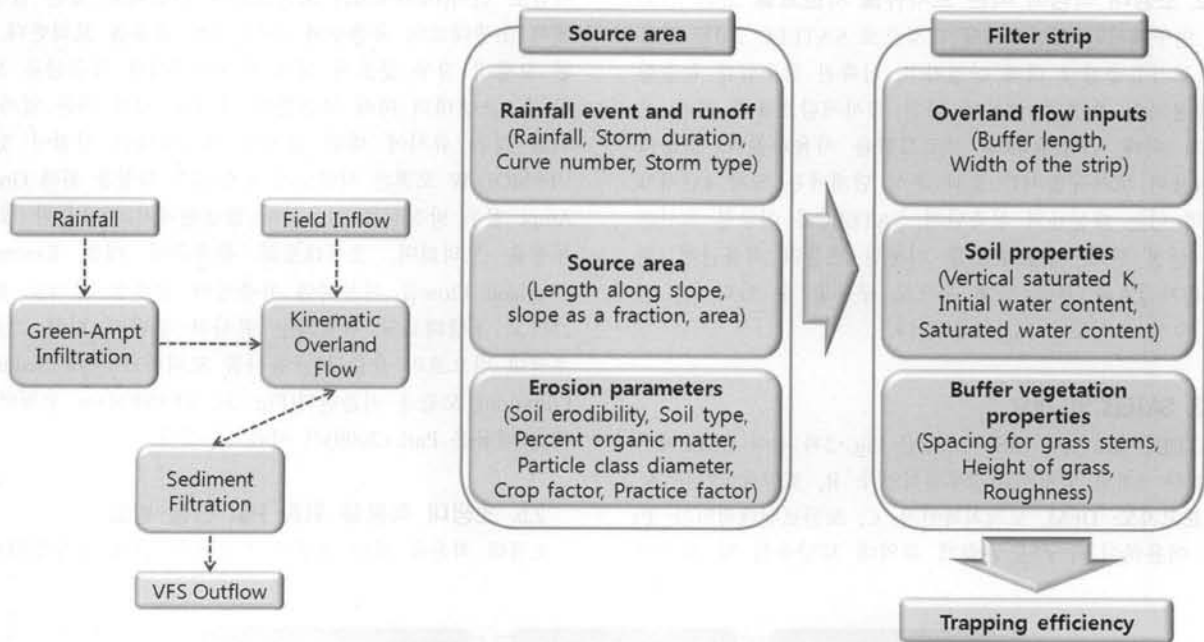


Fig. 3. Diagram of VFSMOD-W (Park et al., 2009).

산정, 유출입력자료 산정, 초생대 입력자료 산정, 토양-침투 입력자료 산정, 유사저감효과 산정의 단계를 걸쳐 대상유역에 대하여 초생대를 적용하였다. SATEEC을 통해 대상유역의 초기 토사유출량을 산정한 후, 초생대의 적용 지점을 선정하였다. 이 경우, 초생대의 입지조건을 고려해야 하며 초생대에 인접한 위경사는 최대 5%로 하고 초생대의 최대 기울기는 상하 언덕 기울기의 1/2를 초과하지 않도록 하였다 (NRCS, 2011). 초생대의 적용지점이 결정된 후에는 초생대 적용을 위하여 VFSMOD의 입력자료를 구축하였다. 입력자료는 크게 강우자료, 토양입력자료, 초생대 입력자료 등이 있는데, 각각의 입력자료 구축 방법은 다음과 같다. 강우자료의 경우 강우계측장치에 의해 측정된 자료를 이용하여 단

위시간별 강우량, 최대강우강도 등으로 구성되어진다. 초생대 입력자료의 경우 초생대의 종류에 따라 간격, 높이, 조도 계수 등을 설정해 주어야 하며 구성 식물 선정시에는 장기간에 걸쳐 유출저감효과가 나타날 수 있도록 다년생 초본식물로 구성하고 현장 조건과 용도를 고려하여 선정할 수 있도록 해야 한다. 그리고 입력된 자료를 바탕으로 VFSMOD를 실행하여 유사저감효율을 선정한다. VFSMOD의 출력값에는 유입유사량, 초생대 잔류 유사량, 유출유사량 등이 있으며 유입유사량과 초생대 잔류 유사량의 비를 통해 초생대 적용유역의 유사저감효율에 대해 산정할 수 있다. 또한 유입유사와 유출유사량의 비를 이용하여 초생대 적용시의 유역특성인자 P값에 대해 산정이 가능하다(Fig. 4).

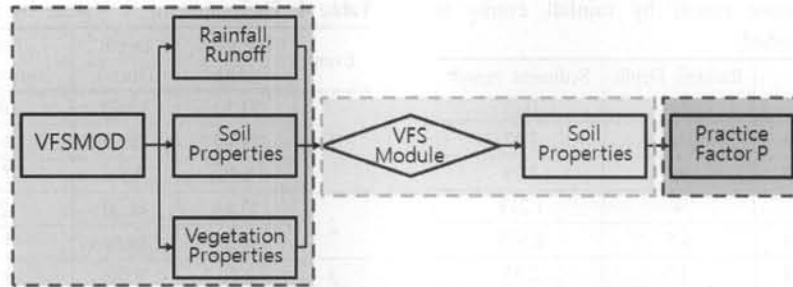


Fig. 4. Procedures for estimation of practice factor (P) using VFSMOD.

2.6. 토사유출저감효과 분석

초생대 적용에 따른 전체 유역에서의 토사유출저감효과를 산정하기 위해서 SATEEC 프로그램을 활용하였다. USLE 인자(R, K, C)와 DEM 자료 및 토사전달률(SDR)값이 이용되며, SATEEC과 VFSMOD를 이용해 산정된 초생대 설치 전후의 토양보전대책인자(P)값을 SATEEC에 재적용하여 토사유출저감효과를 평가하게 된다. 토사유출저감효과를 산정하는 과정은 Fig. 5와 같다.

GIS프로그램 상에서 초생대 설치전 총 유역에서의 DEM, R, K, C 값을 활용하기 위하여 DEM을 제외한 각 인자들의 값은 SATEEC에서 활용 할 수 있도록 Raster 형태로 변환하여 활용하였다. 다음으로 P값의 경우 초생대 미설치 유역에는 초생대 설치전 SATEEC을 이용해 산정된 P값을 적용하고 초생대 설치유역에는 VFSMOD 적용 후 변화된 P값을 적용하였다. 그 다음 DEM을 통해 LS를 산정하고 SATEEC에서 제공하는 기능을 이용해 강우사상별 유역에서의 토양 침식량에 대해 모의하였다. 또한 산정된 토양침식량에 대해 SATEEC에서 제공하는 토사전달률(SDR)산정공식을 이용해 최종 유출점에서의 토사유출량을 계산하였다. 마지막으로 초생대 설치 전후 토사유출량의 비교·검토를 통해 토사유출저감효과를 계산했으며 초생대 설치에 따른 토양침식보전인자(P) 값의 변화를 분석하였다.

2.7. 재현기간과 강우지속시간별 적정 초생대 설계

본 연구에서는 침식이 많이 발생하는 유역을 선정하여 적정 초생대 크기를 결정하기 위하여 강우지속시간 120분과 240분, 재현기간 2년, 10년, 50년, 80년, 100년 빈도 강우

Table 2. Design storm for Recurrence Interval and Rainfall Duration

	Design Storm (mm)	
	120 min.	240 min.
2 yr	44.473	57.144
10 yr	71.256	91.338
50 yr	94.725	121.305
80 yr	101.464	129.887
100 yr	104.637	134.02

대해서 초생대 저감효과를 분석하였으며, 이를 토대로 초생대 적정 크기를 결정하였다.

3. Results and Discussion

3.1. 현장 측정 결과

대상유역에서의 발생강우사상 관측은 대상유역에 설치한 자동 우량계를 통하여 수행되었으며 2010년 4월 말부터 2013년까지 강우시의 실측을 통해 데이터를 수집하였다. 이 중 본 연구에서는 초생대 설치시 1년중 시간경과에 따른 토사유출저감효과를 알아보기 위해 강우의 빈도가 월별로 다양하고 유사의 측정 빈도가 가장 높은 2010년의 자료를 이용하였다. Table 3은 2010년의 강우발생 관찰 기록 중 본 연구에서 토사발생량 계산을 위해 선택한 강우사상이다. 대상 유역의 토사 유출량 계측은 강우시의 실측을 통해 데이터를 수집하였다. 실측 데이터로는 저류조에 발생하는 유출량 및 토사유출량 자료를 축적하였으며 저류조에서의 수위 데이터를 수집하여 분석하였다. Table 2는 선택한 각 강우사

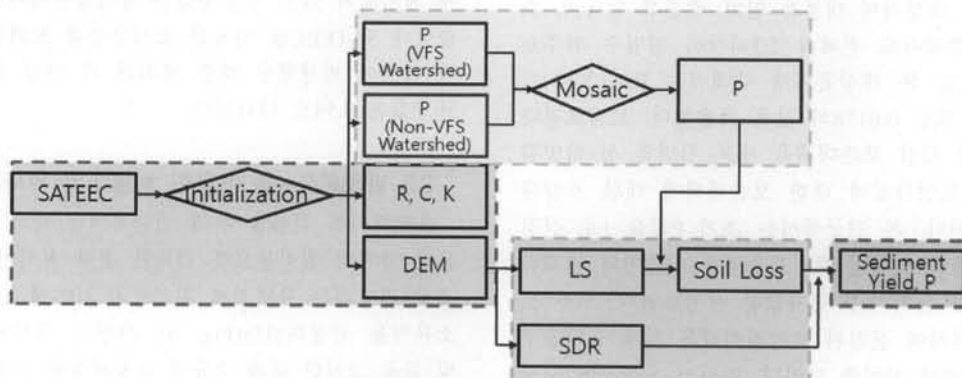


Fig. 5. Flow chart for analysis of sediment runoff reduction using SATEEC.

Table 3. Observed sediment runoff by rainfall events at Simcheon watershed

Event	Rainfall Period	Rainfall Depth (mm)	Sediment runoff (kg)
1	2010.04.21~04.28	37.5	7.67
2	2010.05.17~05.23	97	3.79
3	2010.06.15	9	1.218
4	2010.06.25~06.28	6.5	0.679
5	2010.07.02~07.04	17	2.33
6	2010.07.15~07.17	126.0	1172.56
7	2010.07.23~07.26	73	532.827
8	2010.08.10~08.17	351.5	6369.629
9	2010.08.25~8.27	31	21.425
10	2010.09.01~09.07	108	75.814
11	2010.09.11~09.12	49	47.594
12	2010.09.19~09.22	14	42.72

상에 대한 출구 지점의 저류조에서 채취한 소류사의 양을 나타낸 것이다.

3.2. SATEEC을 이용한 토사유출량 산정

SATEEC은 USLE공식을 이용하여 대상유역의 토사유출량 산정을 하므로 R, K, LS, C, P의 다섯 가지 인자들을 산정하여야 한다. 특히 강우침식인자(R) 산정을 위해서는 시간별 강우량 및 30분지속 최대강우강도 등 강우자료가 요구된다. 일반적으로 중·대규모 유역에서는 강우 관측지점을 중심으로 Thiessen망을 구축하여 유효영역에 대해 해당하는 강우량 자료를 적용하나 연구 대상유역은 면적 2.54ha의 이하의 소규모 산지유역으로, 강우 유역내의 강우분포는 동일하다고 가정하여 강우사상별 침식인자 R값(MJ/ha·mm/hr)을 산정하였다(Table 4).

다음으로 토양침식인자(K)는 대상유역의 정밀토양도 분석 결과 주를 이루는 토양은 IrF2, IrE2, IrE3로 토양통명은 이산이며, 표토의 토성은 침식성이 있는 사양토의 특성을 가진다. 면적비에 의해 K값을 산정한 결과 평균 0.038 ($\frac{\text{tonnes} \cdot \text{hr}}{\text{MJ} \cdot \text{mm}}$)의 값을 나타냈다. 토지피복인자(C)는 특정한 조건 하에서 식생지역의 토양 유실량과 나지의 토양 유실량과의 비로 나타낸 값으로 나지에서 1이고 식생지역에서는 1 이하로 나타났다. 대상유역의 경우 산지유역(UCB CODE : 2210)에 해당하며 대분류 임지, 중분류 임목지, 소분류 침엽수림 중에서도 전체의 2/3이상이 침엽수 위주로 이루어진 산림으로 본 대상유역에 대해서는 Bae(2011)가 제시하고 있는 C값인 0.0178의 값을 적용했다. 토양보전대책인자(P)는 어떤 토양 보존대책을 세운 사면의 상·하방향 경사지로부터의 토양유실에 대한 보존대책에 대한 토양유실의 비로 정의된다. 본 연구에서는 초기 P값을 1로 선정하였으며 이를 통해 산정된 토사유출량을 실측치와 비교하여 초생대 설치전 유역의 P 인자값을 산정하였다. 또한 토양 침식모형에 의하여 산정된 토양침식량은 실제 유역출구에서의 토사유출량과 차이를 보인다. 따라서 유출점에 도달하기전 발생한 퇴적을 비롯한 기타 유사의 이송 특성을 고려

Table 4. Estimation of R Values by rainfall events

Event	Duration (hr)	Depth (mm)	I30 (mm/hr)	R (MJ/ha·mm/hr)
1	11.50	19.00	10	18.574
	14.00	12.00	3	3.239
	8.50	4.50	2	0.780
2	32.83	45.50	12	51.967
	34.33	49.50	9	42.644
3	2.00	9.00	9	9.985
4	55.17	11.00	5	4.580
5	41.00	17.00	18	26.158
6	42.83	126.50	52	722.686
7	69.67	73.50	52	351.353
8	34.83	99.00	25	269.428
	30.83	30.00	6	16.401
	51.83	219.50	49	1301.885
9	3.00	17.00	15	33.842
	1.00	7.00	8	8.000
10	3.83	19.50	14	34.969
	41.33	89.00	26	237.212
11	23.83	48.50	31	152.455
12	14.67	12.50	3	3.372

하기 위해 토사전달률(SDR)의 개념이 필요하다. 일반적으로 토사 전달률에 영향을 미치는 요소는 유역면적, 유역의 주장 및 경사, 하천의 발달 정도, 강우특성, 침식토사의 특성, 지표면 피복상태, 경사면의 길이, 그리고 표면조도 등이 있으며, 본 유역에는 계산된 토양침식량에 대해 Williams and Bernet (1972)의 식을 적용하였다. 산정 결과 대상유역의 토사전달률은 0.1312의 값을 나타내었다. SATEEC을 이용해 토사 전달률이 고려된 토사유출량을 산정한 결과가 Table 5의 Col.2에 나타나 있다.

분석결과 대부분의 경우 SATEEC을 통해 계산된 값이 실측치에 비해 과대 산정을 하고 있는 것으로 나타났으나 8월 10일에서 17일까지 발생한 강우사상의 경우 태풍 곤파스로 인하여 P가 1이상으로 실측값이 더 높게 나는 현상이 나타났다. 이는 호우로 인하여 유역에서 토사침식외에 유로를 따라 하상침식 또는 사면의 토사붕괴 현상으로 인한 추가적 토사유입 가능성이 높은 것으로 판단되어 이 자료는 향후 분석대상에서 제외하였다. 한편, Table 4의 Col.4에 제시되어 있는 수정 P값은 유역출구에서의 실측 토사유출량과 SATEEC을 이용한 토사유출량 모의결과 값의 비로써 태풍이 발생했을 때를 제외한 각 단일 호우에 대한 평균 P값은 0.54로 나타났다.

3.3. VFSMOD-w를 이용한 초생대의 유사저감효과 산정

초생대기법 적용을 위해 대상유역에 대해 SATEEC을 이용한 유역의 침식분포를 검토한 결과 침식이 가장 심한 것으로 판단되는 유역전체 침식량의 30%에 달하는 북서지역 소유역을 선정하였다(Fig. 6). 사면의 경사와 주변의 식생 및 등을 고려한 결과 소유역 유출지점에 5×5m의 크기의 초생대를 선정하고 이 기법의 적용 전·후에 대하여 강우사상

Table 5. The estimated sediment and the modified P value

Event	Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Note
	Sed. Yield (kg)	Est. Sed. Runoff (kg)	Obs. Sed. Runoff (kg)	Modified P Value	
1	350.150	45.94	7.67	0.167	
2	1466.366	192.34	3.79	0.02	
3	154.754	20.30	1.22	0.06	
4	70.984	9.31	0.68	0.073	
5	405.421	53.19	2.33	0.044	
6	11200.802	1469.55	1172.56	0.798	
7	5445.559	714.46	532.83	0.746	
8	24607.725	3228.53	6369.63	1.973	Typhoon
9	648.521	85.09	21.43	0.252	
10	4218.500	553.47	75.81	0.137	
11	2362.874	310.01	47.59	0.154	
12	52.257	6.86	4.27	0.623	

where, Sed. : Sediment, Est. : Estimated Obs. : Observed

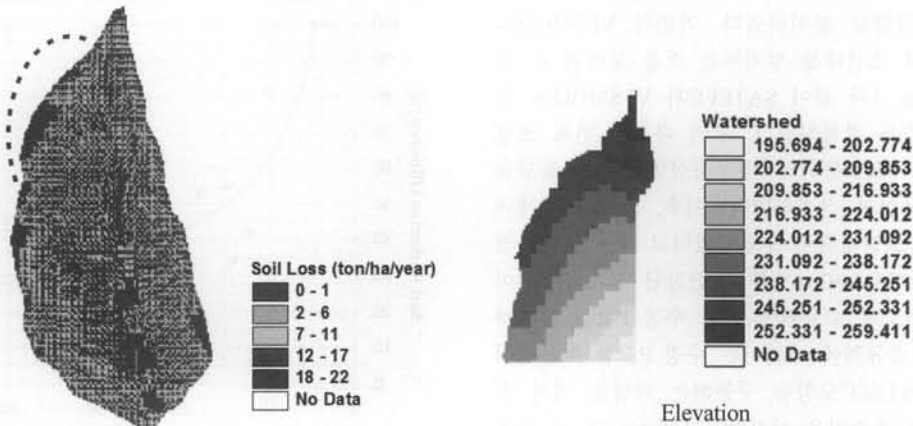


Fig. 6. Sub-watershed selection for an VFS application.

Table 6. Sediment from the selected sub-watershed

Event	Sed. Yield (kg)	Sed. Runoff w/o VFS (kg)	Sed. Runoff w/ VFS (kg)
1	17.41	2.28	0
2	8.60	1.13	0
3	2.77	0.36	0
4	1.54	0.20	0
5	5.29	0.69	0
6	2661.89	349.24	70.21
7	1209.60	158.70	7.598
9	48.64	6.38	0
10	172.11	22.58	0.066
11	108.05	14.18	0.090
12	9.70	1.27	0

where, w/o: without, w/: with

별 토양침식량 및 토사유출량을 Table 6과 같이 제시하였다.

VFSMOD에서는 유역에서의 실측값이 없을 경우 UH 모듈을 이용해 강우강도, 지속시간, CN (Curve Number), 유역의 면적 및 경사, 토양침식인자(K), 입자크기, 토지피복인자(C), 토양보전대책인자(P) 등을 직접 입력하여 Green-Ampt 침투식과 Kinematic overland flow 및 NRCS 방법을 통해 강우량과 유출량에 대해 산정토록 하고 있으나, 본 대상유

역의 경우 강우계측장치 및 위도에 의한 실측값이 존재하므로, VFS 모듈만을 이용하여 초생대 모의시 필요한 강우 및 유출량 자료를 구축하였다. 토양침투 입력자료구축을 위해 대상유역의 정밀토양도를 분석한 결과 표토의 토성은 침식성이 있는 사양토(Sandy Loam)로 토양의 특성은 VFSMOD-w User's Manual에서 제시된 값을 사용하였다. 투수계수(K_s)는 $6.060 \times 10^{-6} m/s$, 평균 모세관 흡입력(S_{om})은 0.1101 m, 포화함수량(θ_s)은 $0.453 m^3/m^3$ 을 사용하였으며, 초기 수분 결핍량은 Maidment (1992)에 의해 제안된 토양종류에 따른 초기 수분 결핍값 0.24를 적용하였으며 식생의 종류는 산지에서 성장할 수 있는 식생조건을 고려하여 Tall fescue로 모의하였다.

침식이 많이 발생하는 소유역에 대해 초생대를 적용한 결과 강우강도가 약한 강우사상의 경우 토사유출저감효율이 우수한 반면 강우강도가 커질수록 토사유출저감효율이 감소하는 경향을 보여주고 있다. Fig. 7은 대상유역에서의 30분지속 최대강우강도와 토사유출량 저감효율의 관계를 보여주고 있다. 20~25 mm/hr 이내의 30분지속 최대강우강도에 대해서는 선정된 유사저감기법의 효과가 대단히 우수하나 최대강우강도가 증가함에 따라 그 저감효과는 감소하는 것을 알 수 있다.

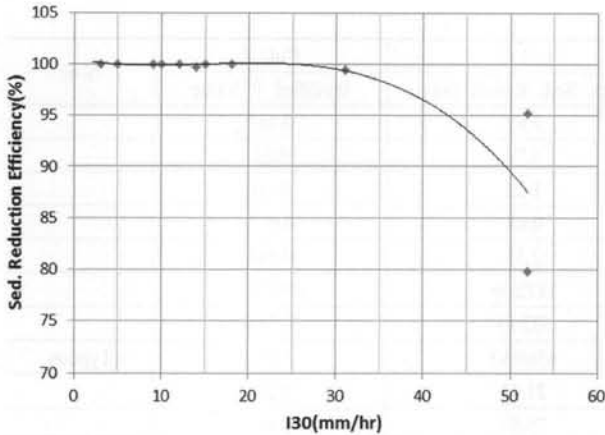


Fig. 7. Effect of VFS and I30 for sub-watershed.

다음은 유역 중상류에 설치된 초생대가 전체유역의 토사 유출량에 미치는 영향을 분석하였다. 기존의 VFSMOD-w 모형은 유역 중간에 초생대를 설치하는 것을 모의할 수 없는 단점이 있어 Fig. 1과 같이 SATEEC과 VFSMOD-w 모형을 결합하는 기법을 적용하였다. 모의 과정은 먼저 초생대가 설치된 소유역으로부터의 강우사상별 토사유출량을 VFSMOD-w를 이용하여 산정하였다. 이후, 소유역 전체에 대하여 동일한 토양보전대책이 수립되었다고 가정하여 산정한 토사유출량과 VFSMOD-w로부터 산정된 토사유출량이 동일한 값을 나타내도록 소유역에 대한 수정 P값을 선정하였다. 초생대 설치 소유역에 대해서는 수정 P값을 적용하여 전 유역에 대한 SATEEC모형을 구동하는 과정을 거쳐 전 유역으로부터의 토사유출량을 산정하였다(Table 7). 그 결과 전체유역에서의 강우사상별 30분지속 최대강우강도와 토사 유출량 저감효율(%)의 상관관계는 Fig. 8과 같이 나타났으며, 소유역에 대한 효과와는 다소 달리 강우강도 10~15 mm/hr 이하에 대해서는 그 효과가 대단히 우수하나 특정값의 강우강도 이후에는 그 효율이 급격하게 저하되는 것을 확인할 수 있다. 유역 전체적으로는 P값의 평균이 초생대 설치 전 0.54에서 초생대 설치 후 0.4로 감소하였으며, 대상 유역의 연평균 저감효율은 약 26%로 나타났다. 따라서 토사유출방지효과 증대를 위해서는 유역 전반에 걸친 다수의 초생대 기법의 동시 적용 또는 다양한 토사유출저감기법의 동시 적용 등 추가적 연구가 필요한 것으로 판단된다.

계절별로 토사저감효과를 알아보기 위해 초생대의 성장 시기에 따라 봄(4~5월), 여름(6~8월), 가을(9월)로 분류하여 분석을 실시한 결과 대상유역에 적용된 초종인 Tall fescue가 가장 활발하게 자라는 시기인 여름(6~8월)의 경우 토사저감율이 25.1%로 다른 계절에 비해 상대적으로 토사저감률이 낮게 나타났다. 이는 우리나라의 경우 6~8월의 경우 강우에 의한 토사유출량의 영향이 초생대의 성장으로 인한 토사저감효과를 능가하는 것을 의미한다.

최대강우강도에 따른 초생대 설치 전·후 토사유출량의 변화를 분석한 결과 Fig. 9와 같은 그래프를 얻었으며, 두 회귀식의 상관계수는 각각 0.89~0.96으로 두 변수간의 상관관계가 밀접한 것으로 나타났다. 따라서 이 시험유역의 경우

Table 7. P Values modified by VFS for estimation of sediment reduction efficiency in study watershed

CASE	Sediment Runoff (Kg)		P w/ VFS	Annual Mean of P
	w/o VFS	w/ VFS		
1	7.67	1.40	0.0305	0.4
2	3.79	2.20	0.0114	
3	1.22	0.0	0	
4	0.68	0.0	0	
5	2.33	1.10	0.0207	
6	1172.56	866.53	0.5897	
7	532.83	418.85	0.5862	
9	21.43	9.77	0.1148	
10	75.81	49.71	0.0898	
11	47.59	32.81	0.1058	
12	4.27	0.0	0	

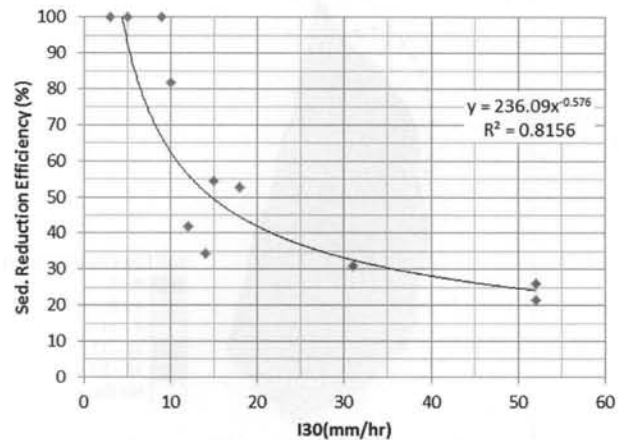


Fig. 8. Effect of VFS and I30 for whole-watershed.

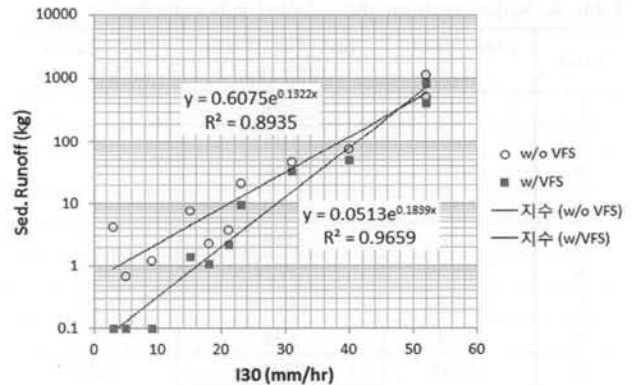


Fig. 9. I30 vs Sediment Runoff (for 5m×5m VFS).

30분지속 최대강우강도만으로 유역 출구에서의 토사의 유출량을 추정할 수 있을 것이다.

3.4. 최적 초생대 규모 설계

시험유역에 대해 최적의 초생대 규모를 산정하기 위하여 다양한 재현기간(2, 10, 50, 80, 100년)과 강우지속시간(120, 240분)에 대해서 초생대 폭(0~10 m)에 따른 토사유출저감효과를 분석하였다. 강우지속시간 120분과 240분에 대

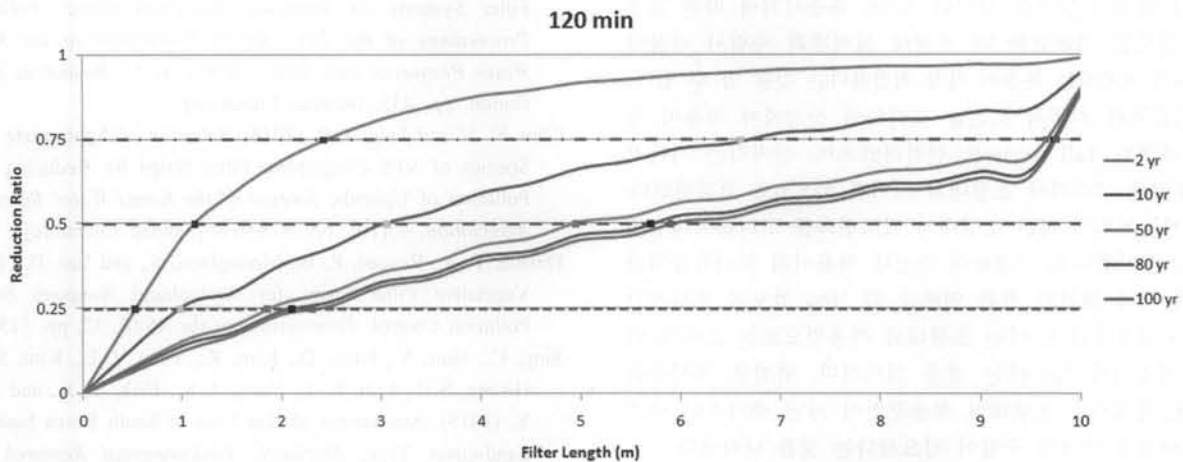


Fig. 10. Sediment Reduction Ratio for various storm events under storm duration of 120 min.

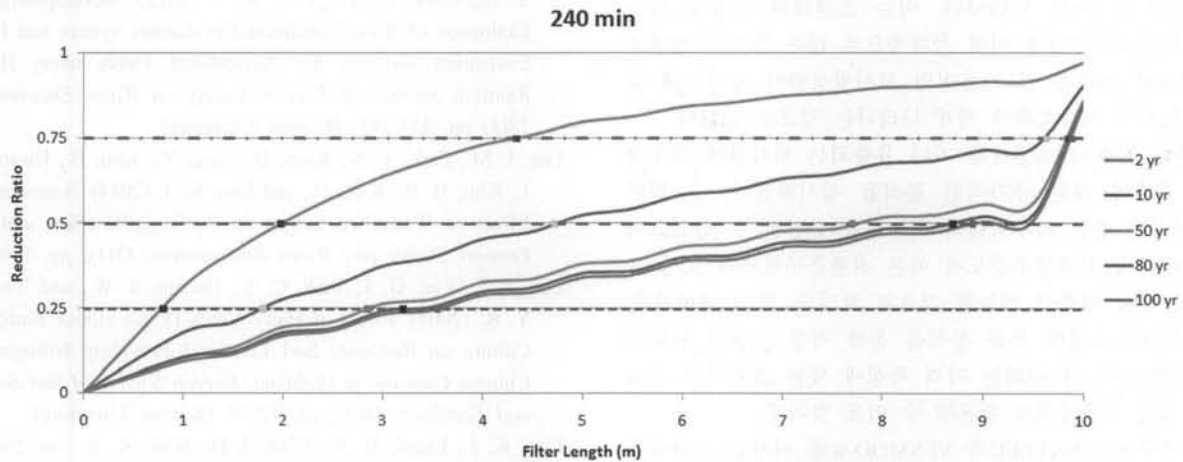


Fig. 11. Sediment Reduction Ratio for various storm events under storm duration of 240 min.

한 유사저감 효율은 Fig. 10~11과 같다. 그림에 나타나는 바와 같이 강우사상에 따라 차이는 있지만, 초생대 폭이 커질수록 저감효율도 증가하는 것으로 나타났다. 약 25%의 유사저감을 위해서는 재현기간별로 0.52 m, 0.98 m, 1.85 m, 2.1 m, 2.3 m의 폭이 요구되는 것으로 나타났으며, 50%에 해당하는 유사저감을 위해서는 재현기간별로 1.13 m, 3.05 m, 4.95 m, 5.7 m, 5.9 m의 폭이 요구되는 것으로 나타났다. 또한 75%의 유사저감을 위해서는 2.42 m, 6.6 m, 9.65 m, 9.73 m, 9.75 m의 초생대가 필요하며, 85% 이상의 유사저감을 위한 초생대의 폭은 재현기간에 상관없이 9.85 m 이상의 폭이 확보되어야 하는 것으로 나타났다.

강우지속기간 240분 분석결과는 Fig. 11과 같으며, 25%의 유사저감을 위해서는 재현기간별로 약 0.8 m, 1.8 m, 2.85 m, 3.2 m, 3.55 m의 폭이 요구되는 것으로 나타났고, 50%에 해당하는 유사저감을 위해서는 재현기간별로 1.98 m, 4.72 m, 7.7 m, 8.7 m, 8.9 m의 폭이 필요하며, 75%의 유사저감을 위한 초생대의 폭은 3.4 m, 9.63 m, 9.84 m, 9.86 m, 9.88 m로 나타났다. 또한 80% 이상의 유사저감을 위한 초생대의 폭은 재현기간에 상관없이 10 m 이상의 폭이 확보되어야 하는 것으로 나타났다.

4. Conclusion

본 연구에서는 초생대를 적용하여 유역의 토사유출 저감 효과를 예측하는 기법에 대한 연구를 수행하였다. 본 연구로부터 도출한 결론은 다음과 같다.

SATEEC에 의해 산출된 초생대 설치 전 후의 토사유출량을 산정함으로써, 저감된 토사의 유출량과 초생대 설치 전 유출되는 토사의 비를 통해 초생대 설치 시 예상되는 유역에서의 토사저감효율에 대해 산정하여 토사의 발생과 관련된 인자들을 검토한 결과 최대강우강도가 증가할수록 토양 침식량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 이를 통해 최대 강우 강도와 토사유출량의 관계를 검토한 결과 지수형태의 적절한 회귀식을 산정할 수 있었다. 이렇게 도출된 식은 통해 추후 대상유역의 강우에 의한 토사유출량 추정 시 활용이 가능할 것으로 기대된다. 또한 상대적으로 최대강우강도가 작은 사상의 경우 큰 사상에 비해 전체 대상 유역에서 유사저감 효율이 높게 나타났다. 이러한 결과는 최대 강우강도가 초생대 적용 시 유역에서의 토사저감효율에 크게 영향을 미치는 인자라는 것을 의미하며, 이는 VFSMOD 프로그램에서 유사량 산정 시 최대 강우강도를 고

려하기 때문인 것으로 보인다. 또한, 파종시기에 따른 초생대의 밀도를 고려했을 때 초생대 설치계획 수립시 식물이 성장하기 시작하는 봄철이 가장 적절하다는 것을 알 수 있다.

대상구역의 기후적 조건을 고려하여 산지에서 적용이 용이한 초종인 Tall fescue를 선정하였으며, 산지라는 지리적 제약조건을 고려하여 초생대의 크기를 5×5 m로 결정하였다. 또한 파종시기에 따른 초생대의 밀도변화를 고려하여 4월에 파종을 실시한다고 가정하여 초생대 적용시의 토사유출저감 효율에 대해 평가한 결과 연평균 약 26% 정도의 유사저감 효과를 나타내었다. 이는 초생대의 적용만으로는 토사가 완전히 저감되지 않는다는 것을 의미하며, 완전한 토사유출저감을 위해서는 초생대의 적용뿐만이 아닌 추가적인 구조적 토사저감 대책의 수립이 필요하다는 것을 나타낸다.

초생대의 성장에 따라 계절별로 분류하여 토사유출저감 효과에 대해 분석한 결과 봄에는 68.6% 여름에는 25.1% 가을에는 35.4%로 나타났다. 이는 초생대의 성장에 따른 토사저감능의 증가에 비해 상대적으로 많은 강우의 발생으로 인하여 여름철 및 가을철의 토사발생량이 급격하게 많아져 토사의 저감효과가 작게 나타나는 것으로 보인다.

초생대 적용시 초생대를 지나 유출되는 토사량과 강우강도의 관계에 대한 추가적인 분석을 실시하였다. 그 결과 상관관계수가 높은 지수형태의 회귀식을 산정할 수 있었으며 이를 이용해 최대강우강도에 따른 최종출구에서의 토사 유출량에 대해 예측이 가능할 것으로 보인다. 또한 재현기간/지속시간별 초생대 효율 분석을 통해 적정 초생대 규모를 산정하였으며, 이 결과는 지역 특성에 맞는 효과적인 초생대 설계의 기본자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구에서 SATEEC과 VFSSMOD-w를 이용한 토사유출저감 산정기법은 산지에서의 토양유실뿐만이 아닌 경작지의 토사유출 저감효과와 유역의 비점오염 저감대책 수립시에도 동일하게 활용이 가능하다. 따라서 추후 국내사정에 적합한 입력자료의 보정 및 설계기법의 최적화에 대한 연구가 이루어진다면, 댐에서 발생할 수 있는 퇴사와 탁수저감 및 하천의 수질관리, 산지의 토양유실 방지를 위한 친환경적인 유사저감계획을 수립하는데 있어 중요한 기초자료로 활용할 수 있을 것이라 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(14AWMP-B079364-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Abu-Zreig, M., Rudra, R. P., and Whiteley, H. R. (2001). Validation of a Vegetated Filter Strip Model (VFSSMOD), *Hydrological Processes*, 15(5), 729-742.
- Bae, J. G. (2011). *A Study of Sediment Yields in a Small Fired Forest Basin*, Yeungnam University, Kyongsan, Korea. [Korean Literature]
- Choi, K. S. and Jang, J. R. (2012). Effects of VFS (Vegetative Filter System) for Reducing Non-Point Source Pollution, *Proceedings of the 2012 Spring Conference of the Korea Water Resources Association*, Korea Water Resources Association, pp. 435. [Korean Literature]
- 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 the Korea Water Resources Association*, 47(10), pp. 973-983. [Korean Literature]
- Dillaha, T. A., Reneau, R. B., Mostaghimi, S., and Lee, D. (1989). Vegetative Filter Strips for Agricultural Nonpoint Source Pollution Control, *Transactions of the ASAE*, 32, pp. 513-519.
- Jang, C., Shin, Y., Kum, D., Kim, R., Yang, J. E., Kim, S. C., Hwang, S. I., Lim, K. J., Yoon, J. K., Park, Y. S., and Jung, Y. (2015). Assessment of Soil Loss in South Korea based on Land-cover Type, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-15.
- Kum, D. H., Ryu, J., Choi, J., Shin, M. H., Shin, D. S., Cheon, S. U., Choi, J., and Lim, K. J. (2012). Development and Evaluation of Runoff-Sediment Evaluation System and BMPs Evaluation Modules for Agricultural Fields using Hourly Rainfall, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(3) pp. 375-383. [Korean Literature]
- Lee, J. M., Park, Y. S., Kum, D., Jung, Y., Kim, B., Hwang, S. J., Kim, B. H., Kim, C., and Lim, K. J. (2014). Assessing the Effect of Watershed Slopes on Recharge/Baseflow and Soil Erosion, *Paddy and Water Environment*, 12(1), pp. 169-183.
- Lee, J. T., Lee, G. J., Park, C. S., Hwang, S. W., and Yeoung, Y. R. (2005). Effect of Hairy Vetch (*Vicia villosa* Roth) Sod Culture on Reducing Soil Loss and Providing Nitrogen for Chinese Cabbage in Highland, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer*, 38(5), pp. 72-78. [Korean Literature]
- Lim, K. J., Engel, B. A., Choi, J. D., Kim, K. S., and Sagong, M. (2003). Development of Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) in Small Scale Watershed, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 20(15), pp. 74-85. [Korean Literature]
- Lim, K. J., Engel, B. A., Kim, N. W., and Park, Y. S. (2011). *SATEEC GIS System for Spatiotemporal Analysis of Soil Erosion and Sediment Yield*, INTECH Open Access Publisher, Rijeka, Croatia.
- Maidment, D. R. (1992). *Handbook of Hydrology*, McGraw-Hill Inc., New York, New York, USA.
- Muñoz-Carpena, R., and Parsons, J. E. (2004). A Design Procedure for Vegetative Filter Strips using VFSSMOD-W, *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 47(6), pp. 1933-1941.
- 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 Resources Conservation Services (NRCS). (2011). <http://www.nrcs.usda.gov/> (assessed May. 2015)
- Park, Y. S. (2009). *Development of Web GIS-based VFSSMOD System to Simulate Sediment Reduction Efficiency with Vegetative Filter Strip*, Degree of Master, dissertation, Kangwon National University, pp. 1-55.
- Patzold, S., Klein, C., and Brummer, G. W. (2007). Runoff Transport of Herbicides during Natural and Simulated Rainfall and its Reduction by Begetated Filter Strips, *Soil*

Use and Management, 23(3), pp. 294-305.

Robinson, B. H., Brooks, R. R., Kirkman, J. H., Gregg, P. E., and Gremigni, P. (1996). Plant Available Elements in Soils and Their Influence on the Vegetation over Ultramaic ("Serpentine") Rocks in New Zealand, *Journal of the Royal Society*

of New Zealand, 26(4), pp. 457-468.

Williams, J. R. and Brendt, A. D. (1972). Sediment Yield Computed with Universal Equation, *Journal of the Hydraulics Division*, 98(12), pp. 2087-2098.