

고랭지밭 밀집지역 초생대의 비점오염 저감 효율 평가 - 비점오염원 관리지역을 중심으로 (만대지구, 가아지구, 자운지구) -

Efficiency Evaluation of Vegetative Filter Strip for Non-point Source Pollutant at Dense Upland Areas - Focused on Non-point Source Management Area Mandae, Gaa, and Jaun Basins -

정연지^a · 이동준^b · 강현우^c · 장원석^d · 홍지영^e · 임경재^{e,†}

Jeong Yeonji · Lee Dongjun · Kang Hyunwoo · Jang Won Seok · Hong Jiyoung · Lim Kyoung Jae

ABSTRACT

A vegetative filter strip (VFS) is one of the best management practices (BMPs) to reduce pollutant loads. This study aims to assess the effectiveness of VFS in dense upland field areas. The study areas are agricultural fields in the Maedae (MD), Gaa (GA), and Jaun (JU) watersheds, where severe sediment yields have occurred and the Korean government has designated them as non-point management regions. The agricultural fields were divided into three or four clusters for each watershed based on their slope, slope length, and area (e.g., MD1, MD2). To assess the sediment trapping (STE) and pesticide reduction efficiency (PRE) of VFS, the Vegetative Filter Strip Modeling System (VFSSMOD) was applied with three different scenarios (SC) (SC1: VFS with rye vegetation; SC2: VFS with rye vegetation and a gentle slope in VFS range; and SC3: VFS with grass mixture). For SC1, there were relatively short slope lengths and small areas in the MD1 and GA3 clusters, and they showed higher pollutant reduction (STE>50%, PRE>25%). For SC2 and SC3, all clusters in GA and some clusters (MD1 and MD3) in MD show higher pollutant reduction (>25%), while the uplands in JU still show a lower pollutant (<25%). With correlation analysis between geographic characteristics and VFS effectiveness slope and slope length showed relative higher correlations with the pollutant efficiency than a area. The results of this study implied that slope and slope length should be considered to find suitable upland conditions for VFS installations.

Keywords: BMPs; Non-point source pollutant; VFS; VFSSMOD

1. 서론

전 세계적으로 지구온난화에 따른 기상변동이 속출하고 있으며 (Lim et al., 2019), 기상변화에 따라 국내에서도 국지성 집중 호우의 발생빈도가 증가하고 있다 (Shin et al., 2013). 집중호우 시 증가된 강우 강도는 토양유실에 직접적으로 영향을 끼치는 인자로서 토양유실 발생량을 증가시킨다 (Park et al., 2000). 우리나라의 지형 특성상 경사가 급한(>15%) 경

작지의 비율이 전체 경작지의 60% 이상을 차지하기 때문에 변화된 강우특성은 대규모의 토양유실이 발생시킬 수 있다 (Seo et al., 2005). 특히, 경작지에서 발생된 토양유실은 각종 농업 비점오염물질들이 흡착된 토양으로 하천으로 유입될 경우 수계 내 수질오염의 직·간접적인 원인으로 작용할 수 있다. 또한 농업인들의 과도한 비료 및 농약사용, 무분별한 성토 등은 유실된 토양으로 발생할 수 있는 환경오염을 가중시킨다 (Lee et al., 2011). 따라서 토양유실은 환경오염의 주요 문제점 중 하나이다.

이에 환경부에서는 강우 유출수에 의해 유실되는 토양을 비점오염원으로 규정하고, 비점오염원 관리지역을 지정하여 지속적으로 토양유실을 관리하고 있다 (Ministry of Environment, 2018). 예를들어 비점오염원 관리지역에 침사지, 개비온 용벽, 수로관과 같은 비점오염저감시설을 설치하여 토양유실의 발생을 억제시키고 있다 (Yoon et al., 2017). 하지만, 설치된 비점오염저감 시설들은 유지관리 미비, 관리인력 부족, 유실된 토양의 사후처리문제와 같은 한계점들이 드러나고 있다 (Choi et al., 2019). 이러한 문제점 해결하기 위해 지자체 관리 중심에서 지역공동체 및 주민참여 중심의 농업비점오염원관

^a MS Student, Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

^b Ph.D. Student, Earth System Science, Auburn University

^c Postdoctoral Scholars, Forest Engineering, Resource & Management, Oregon State University

^d Research Fellow, Division of Public Infrastructure Assessment, Environmental Assessment Group, Korea Environment Institute

^e Ph.D. Student, Earth and Environment, Boston University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-10-2726-2821

E-mail: kyoungjaelim@gmail.com

Received: November 04, 2020

Revised: May 10, 2022

Accepted: June 08, 2022

리 정책의 필요성이 대두되고 있다 (National Institute of Environmental Research, 2014). 이에 환경부에서는 주민들이 직접 자신의 경작지에 설치하고 관리할 수 있는 관리기법을 중점으로 시범사업을 수행하였다 (Kim et al., 2019).

주민참여형 관리기법으로는 작목변환, 벼짚 매트를 활용한 지표피복, 녹비작물 재배, 초생대 설치 등이 있다. 특히, 초생대는 토양유실 저감뿐만 아니라 세류침식에 의한 비점오염저감 시설 보호, 야생동물의 서식처 제공 등 다양한 기능을 갖는다 (Lee et al., 2011). 특히, 미국에서는 강우에 용해된 농약의 유효성분이 하천으로 유입되는 것을 방지하기 위해 초생대 설치를 권장하고 있다 (Ministry of Agriculture and Forestry, 2005). 초생대의 오염물질저감 효율 평가와 관련된 연구들은 대부분 시험포를 대상으로 모니터링을 수행한 후 작물 또는 시험포 특성에 따른 효율을 분석하였다. 초생대의 오염물질저감 효율은 강우특성, 초생대의 규모, 작물 유형, 지형 특성에 따라 다를 수 있으며, 국내·외 연구에 따르면 약 50-91% 토양유실 저감, 58-69% 총인 저감효과, 64-74% 총 질소 저감 효과를 보였다 (Robinson et al., 1996; Gharabaghi et al., 2001; Dillaha et al., 2010; Son et al., 2015).

초생대와 같은 주민참여형 관리기법을 통해 농업비점오염저감사업을 수행하기 위해서는 관리기법별 최적지를 도출하여야 한다. 예를 들면, 경작지의 지형 및 특성을 고려하여 설치에 용이한 관리기법을 도출하거나 비점오염원 저감효율을 고려하여 관리기법별 최적지를 도출하여야 한다. 하지만 지금까지 수행된 초생대 관련 연구들은 실제 농민이 경작하고 있는 현장이 아니라 실내 또는 시험포 단위에서 수행되었기 때문에, 실제 경작지의 지형적 또는 토양 특성 (면적, 경사도, 토성 등)과 같은 다양한 현장 조건들을 고려할 수 없었다. 이에 모델링을 통하여 다양한 조건을 고려한 초생대의 오염물질저감 효율을 분석하는 연구들이 많이 진행되었다 (Seo et al., 2013; Lee et al., 2014; Son et al., 2015). 하지만 선행된 연구들은 임의로 설계된 초생대의 효율을 평가한 연구들이 대부분이었으며, 실제 사업이 진행될 현장 조건을 고려한 연구는 미비한 실정이다.

이에 본 연구의 목적은 1) 환경부에서 지정한 비점오염원 관리지역(만대, 가아, 자운지구)의 경작지 지형적 특성을 분석하여 그룹화하고, 2) 그룹별 특성과 Vegetative Filter Strip Modeling System (VFSMOD)을 활용하여 지역별 초생대 저감 효율을 정량적으로 분석하고 오염물질 저감 효율이 높은 경작지 특성을 도출하는데 있다. 또한, 3) 다양한 초생대 시나리오를 통해 증감된 오염물질저감 효율을 분석하는데 있다.

II. 재료 및 방법

본 연구에서는 주민참여형 비점오염 관리대책 중 하나인 초생대의 비점오염원 관리지역별 오염원 저감 효율을 정량적으로 평가하기 위하여 VFSMOD을 활용하였다. 대상 지역은 경사가 높은 경작지들로 인해 토양유실이 지속적으로 발생하고 있는 만대지구, 가아지구, 자운지구이다. 지구별 대표 경작지를 선정하기 위하여 대상 지역 내 전체 경작지(밭)의 지형적 특성 (면적, 경사장, 경사도)을 이용하여 그룹화하였으며, 그룹별로 대표 경작지를 5개씩 추출하였다. 지역별 기상자료, 경작지의 지형, 토양 특성자료 등을 구축하여 VFSMOD에 적용하여 경작지 지형특성에 따른 오염물질저감 (토양유실, 농약) 효율을 평가하였다. 또한, 오염물질저감 효율을 높일 수 있는 방법으로 1) 초생대 설치 구간의 경사도 완화, 2) 초생대 구간 내 작물 전환 시나리오를 설정하여 오염물질저감 효율이 낮은 그룹에 적용하여 시나리오별 오염물질저감 효율을 비교분석 하였다. Fig. 1은 본 연구의 연구흐름도를 나타낸다.

2. 연구대상지역

연구대상지역은 비점오염원 관리지역인 만대지구, 가아지구, 자운지구이다. 선정된 3개의 관리지구는 소양강 상류에 위치하고 있으며 (Fig. 2), 경작지에서 유실된 흙이 소양강 상류에 흘러와 흙탕물 문제를 발생시키는 지역이다 (Ministry of Environment (MOE), 2007). 만대지구, 가아지구, 자운지구의 면적은 각각 64.14 km², 47.3 km², 133.18 km²이다. 만대지구는 분지 형태의 지형적 특성이 있으며, 무분별한 개간 활동으로 인해 경작지가 형성된 지역으로 산림과 인접한 경작지들이 경사가 높아 면적대비 많은 양의 토양유실이 발생하는 지역이다 (Lee et al., 2011). 가아지구는 경작지가 밀집된 지역에서 토양유실이 집중적으로 발생하고 있으며, 자운지구는 경사가 급한 경작지들이 많고 재배되는 작물 특성상 잦은 개토가 시행되고 있어 강우 시 많은 양의 토양유실이 발생하고 있다 (Choi et al., 2009). 3개 관리지구는 비점오염원 관리지역으로 선정된 이후 침사지와 같은 사후관리 시설형 관리기법들이 설치되었지만, 인력부족으로 인한 관리미비 등과 같은 문제로 인해 지속해서 흙탕물 문제가 발생하였다 (Jeong et al., 2017). 따라서, 농민들이 주도적으로 토양유실과 같은 문제에 참여하지 않으면 토양유실로 인한 문제를 관리하기 어려운 지역이다. 이에 본 연구에서는 주민참여형 관리기법 중 하나인 초생대의 오염물질저감 효율을 정량적으로 평가하고, 오염물질저감 효율이 높은 경작지의 지형적 특성을 도출하고자 3개 지구를 대상으로 선정하였다.

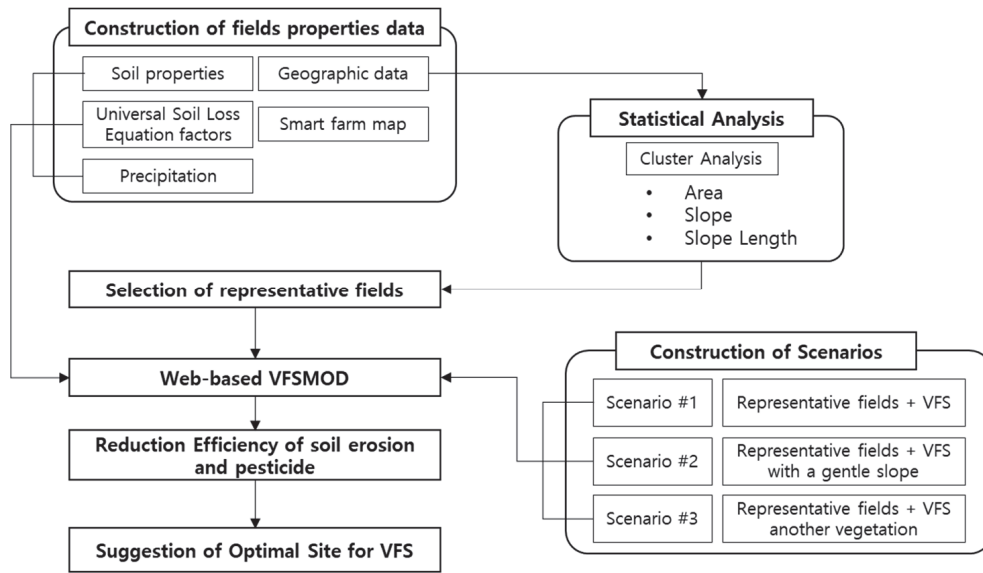


Fig. 1 The study flowchart

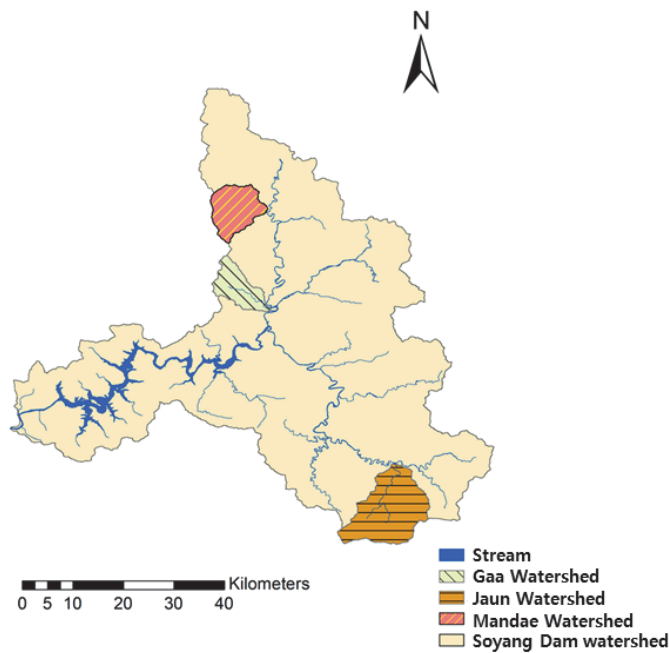


Fig. 2 Location of the study area: Gaa, Jaun, and Mandae Watershed

3. 지구별 데이터 수집과 군집분석

가. 연구지역 내 기상자료 및 경작지 속성 데이터 구축

VFSMOD는 필드단위 모델로 필드의 지형데이터, 토양데이터, 기상데이터, 초생대 속성자료, 농약 자료 등이 필요하다. 본 연구에서는 농림축산식품부에서 구축한 팜맵 (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA), 2021)을 기반으로 만대, 가아, 자운지구 내 경작지 지형특성 데이터를 구축하

기 위하여 Koo et al., (2016)에서 구축한 5 m 해상도 Digital Elevation Model (DEM)과 Park et al., (2019)이 개발한 USLE 지형인자 산정 모듈을 활용하였다. 구축된 지형데이터는 지구별 전체 경작지의 면적, 경사도, 경사장 데이터이다. 강우자료는 기상청 기상자료개방포털에서 제공하는 방재기상관측소 일별 강우량 자료를 활용하였으며, 각 지구별 기상자료를 구축하기 위하여 만대지구, 가아지구, 자운지구와 가까운 기

Table 1 Data source and references used in this study

Data	Source	Tool	Reference
Area (ha)	Farm map	ArcGIS	MAFRA. (2022)
Slope (%)	Digital Elevation Model (DEM)	ArcGIS, USLE LS Tool	Koo et al. (2016)
Slope length (m)			Park et al. (2019)
Precipitation (mm)	-	-	Korea Meteorological Administration (2022)
Soil texture	Soil map	-	Rural Development Administration, (2022)
CN	Hydrologic Soil Group	-	
Pesticide (Chlorpyrifos)	-	-	

상 관측소 지점인 해안, 원통, 내면 관측소를 선택하였다. 강우자료 구축에 사용된 데이터는 2009년부터 2018년까지의 10년 강우자료를 이용하였다. National Institute of Environmental Research (2014)에 의하면 100 mm 이상 강우는 재해에 준하는 양이기 때문에 비점오염원 관리대책 분석 시 사용된 강우자료를 50 mm 이상 100 mm 이하의 강우로 제한하였다. 따라서 본 연구에서는 관측소별 10년간 50 mm 이상 100 mm 이하 강우 이벤트 평균 강우량의 평균값을 지구별 강우 자료로 사용하였다. 토양속성 자료는 농촌진흥청 국립농업과학원에서 제공하는 전국 개략 토양도를 사용하여 지구별 토양 토성 (Soil Texture)과 수문학적 그룹을 산정하여 Curve Number (CN)값을 산정하였다. 농약의 경우 국내 발작물에 널리 사용되는 살충제 (Chlorpyrifos)를 사용하였다 (Rural Development Administration, 2022). Table 1은 본 연구에서 사용한 자료를 나타낸다.

나. 군집 분석을 활용한 지구별 대표 필지 선정

만대, 가야, 자운지구에는 각각 3,062, 291, 1,421개의 경작지(밭)가 존재한다(면적 > 1,000 m²). 전체 경작지를 대상으로 초생대 오염물질저감 효과분석을 하기에는 한계가 있다고 판단하여, 군집 분석을 활용하여 오염물질저감 효과분석을 수행할 대표 경작지를 추출하였다.

1) 계층적 군집 분석 (Hierarchical Clustering Analysis)과 Ward's method

군집 분석이란 대상간 유사성을 측정해서 유사성이 높은 집단을 분류하고, 군집에 속한 사건들의 유사성과 서로 다른 군집에 속한 대상간 상이성을 규명하는 통계분석방법이다. 본 연구에서는 계층적 군집분석 방법의 하나인 Ward's method를 활용하여 지구별 경작지 간 군집을 형성하였다. Ward's method는 편차 제곱합 (Error Sum of Squares; ESS)의 증가분을 기반으로 두 군집 간 유사성을 측정하여 군집을 형성한다 (Ward, J. H, 1963). Ward's method는 군집 내 요소 편차 제곱

합을 활용하기 때문에 군집간 정보를 최소화하여 사용한 데이터의 노이즈나 이상치에 덜 민감한 장점이 있다 (Lee et al., 2011). Ward's method에 활용된 편차 제곱합 공식은 다음과 같다.

$$ESS = \sum_{k=1}^K \sum_{X_i \in C_{kj}} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_{kj})^2$$

여기서, ESS는 편차 제곱합, K는 군집 개수, X_i는 C_k군집 내 요소, j는 변수 개수(1~n)를 나타낸다. Ward's method는 군집 분석할 대상을 모두 분석할 수 있다는 장점이 있어 선택하였으며, 지구별 군집 개수는 Total Within Sum of Square가 크게 변하지 않는 군집 개수를 선택하여 결정하였다. 본 연구에 활용된 군집 분석 인자는 지구별 경작지의 경사도, 경사장, 면적을 주성분으로 계층적 군집 분석을 수행하였으며 군집분석 이후 Analysis of variance (ANOVA)를 통해 군집 간 차이를 확인하였다. 이후 군집별로 경사도, 경사장, 면적의 정규 분포를 확인한 후, 2%, 16%, 50%, 84%, 98%에 해당하는 지형적 값을 추출한 후 이와 가장 유사한 5개의 경작지를 추출하였다.

나. VFSMOD system 개요와 시나리오 효율 평가

1) Vegetative Filter Strip Model (VFSMOD)의 개요

VFSMOD모형은 국내외에서 가장 널리 이용되는 초생대 모의 프로그램으로 시험포 (Source Area)에서 초생대 (Vegetative Filter Strip, VFS)로 구분하여 유출과 침투 및 오염물질저감 효율을 모의하는 모형이다 (Rafael et al., 1999). VFSMOD는 Unit Hydrograph (UH) 모듈과 VFS 모듈로 구성되어 있다. UH 모듈에서의 유출 특성과 오염물질(유사, 농약)을 모의한 뒤 이를 바탕으로 VFS 모듈에서 초생대 특성에 따라 유입량, 유출량, 침투량, 오염물질 저감량을 모의한다 (Rafael et al., 2005; Park et al., 2008). VFSMOD는 데스크탑 기반 모형뿐만 아니라 Park et al. (2013) 그리고 Lim et al. (2017)에 의해 Web 시스템으로 개발되었다. 본 연구에서는

Web 시스템을 통해서 VFSMOD을 구동하여 지구별 오염물질저감 효과를 분석하였다.

2) 초생대 유사 및 농약 저감효과평가를 위한 시나리오 구축 및 평가

비점오염원 관리지역 내 대표 경작지를 대상으로 초생대의 오염물질저감 평가를 위하여 세가지 시나리오를 구축하였다 (Table 2). 초생대 오염물질 효율평가는 Minnesota Pollutant Control Agency (2015)에서 제안한 기준을 사용하였으며, 평가 기준은 Table 3과 같다. 첫 번째 시나리오는 초생대의 경사도를 경작지의 경사도와 동일하게 설정하고, 초종은 환경부에서 권장하고 있는 녹비식물 중 호밀을 선택하였다. 두 번째 시나리오는 경사도가 높은 그룹의 대표 경작지를 대상으로 초생대 내 경사도를 완화하였으며, 완화된 경사도는 연구지역별 경사도가 낮은 그룹의 평균 경사도를 사용하였다. 세 번째 시나리오는 초종을 제외한 나머지 입력자료는 첫 번째 시나리오와 동일하게 적용하였으며, 초종을 국내 잔디와 비슷한 특성을 가진 Grass Mixture를 선택하였다. 본 연구에서는 구축한 시나리오별 유사 및 농약 저감 효율에 대해 분석하였다.

Table 2 Scenarios conducted to evaluate VFS

List of scenarios	Explanation
Scenario I	Rye VFS with the same slope as fields
Scenario II	Rye VFS with gentle slope in VFS range
Scenario III	Grass mixture VFS with the same slope as fields

Table 3 VFS pollutant efficiency evaluation criteria (MSSC, 2005)

Pollutants efficiency (%)	Criteria
≥ 50	Good
50 > and > 25	Satisfactory
≤ 25	Not satisfactory

3) 초생대 효율과 경작지 효율의 상관성 분석

초생대 사업시 경작의 지형적 특성을 우선순위를 선정하기 위하여 대표 경작지로 선정된 경작지 지형적 특성들(경사도, 경사장, 면적)과 VFSMOD 결과(유사, 농약 저감효과)를 이용하여 상관성 분석을 수행하였다. 상관성 분석은 피어슨 상관계수를 사용하였으며 수식은 식 (1)과 같다.

$$r = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}$$

여기서, x 와 y는 분석된 인자를 나타낸다. 피어슨 계수가 1일 경우 양의 상관관계, 0은 상관관계가 없음, -1은 음의 선형 관계를 의미한다.

III. 결과

1. 비점오염원 관리지역 내 경작지 군집 분석결과

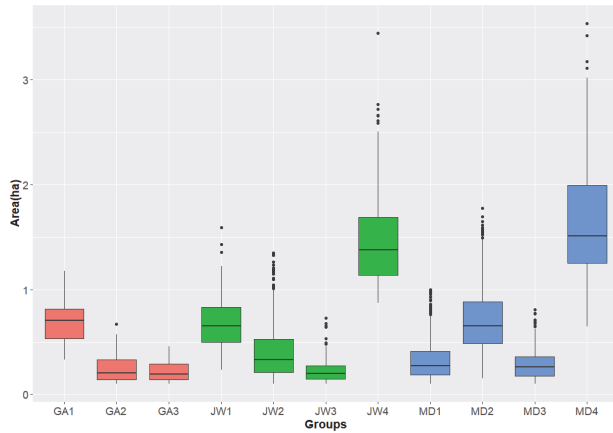
비점오염원 관리지역인 만대, 가야, 자운지구의 내 비슷한 지형적 특성을 가진 경작지를 집단화하기 위하여 각 경작지의 경사도, 경사장, 면적 데이터를 활용하여 계층적 군집 분석과 ANOVA Test를 수행하였다. 군집 분석결과, 만대지구와 자운지구는 4개의 군집으로 구분되었으며, 가야지구는 3개의 군집으로 분석되었다.

Fig. 3 (a)는 군집별 면적 특성을 나타낸다. ANOVA test 결과, 만대지구와 자운지구의 그룹은 모두 통계적으로 다르다고 분석되었다 (P<0.05). 가야지구의 경우 GA2와 GA3 그룹의 면적은 통계적으로 다르지 않았으며 (P=0.54), GA1 그룹은 다른 그룹과 통계적으로 다르다고 분석되었다 (P<0.05). 지구별로 MD4, JW4, GA1 그룹은 면적이 상대적으로 높은 경작지들로 구성되어 있다. Fig. 2 (b)는 군집별 경사도 특성을 나타낸다. ANOVA test 결과, 만대지구와 자운지구, 가야지구 내 모든 그룹이 통계적으로 다르다고 분석되었다 (P<0.05). 지구별로 MD3, JW3, GA2 그룹은 경사가 급한 경작지로 구성되어 있다. Fig. 2 (c)는 군집별 경사장 특성을 나타낸다. ANOVA test 결과, 만대지구의 경우 MD1과 MD3의 경사장은 통계적으로 다르지않다고 분석되었으며 (P=0.95), 만대지구 내 다른 그룹들은 모두 통계적으로 다르다고 분석되었다 (P<0.05). 자운지구와 가야지구 내 모든 그룹은 통계적으로 다르다고 분석되었다 (P<0.05). 경사장 길이는 경작지 면적과 비슷한 경향을 나타내었으며, 면적분석과 동일하게 MD4, JW4, GA1 그룹들은 긴 경사장 특성을 보였다.

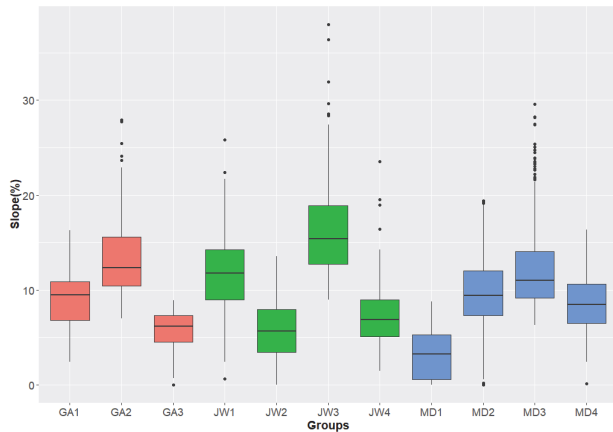
2. 초생대 토양유실 및 농약 저감효과 분석

가. 초생대 오염물질저감 효과분석

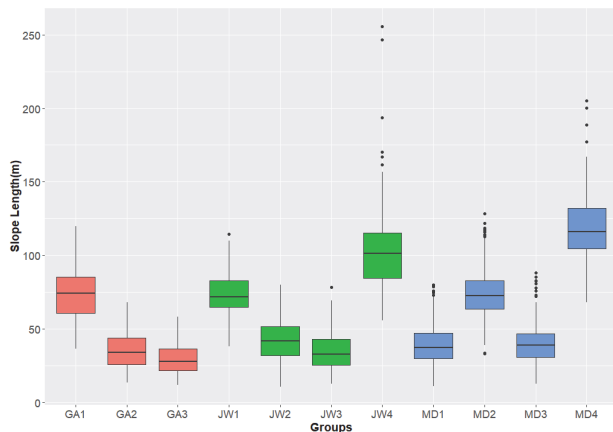
시나리오 1은 초생대 길이 1 m에 환경부에서 권장하는 호밀 식생을 이용한 초생대 시나리오이며, Fig. 5은 만대, 가야, 자운지구 군집별 경작지의 토양유실 및 농약저감 효과분석 결과를 나타낸다. 토양유실 저감효과 분석결과, 만대지구의 MD1 군집과 가야지구의 GA3 그룹은 유사저감 효과는 각각 59.18, 52.43 %로 MSSC (2005)에서 제안된 기준에 따르면 “Good” 에 해당된다. 이외 군집의 유사저감 효과분석 결과 모두 “Not Satisfactory”에 해당된다. 농약저감 효과 분석결과,



(a) Box plot for area of each group



(b) Box plot for area of each group



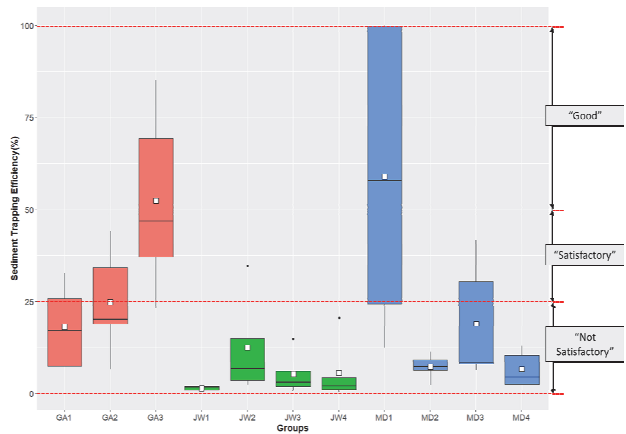
(c) Box plot for slope length of each group

Fig. 3 The geographic characteristics of each group

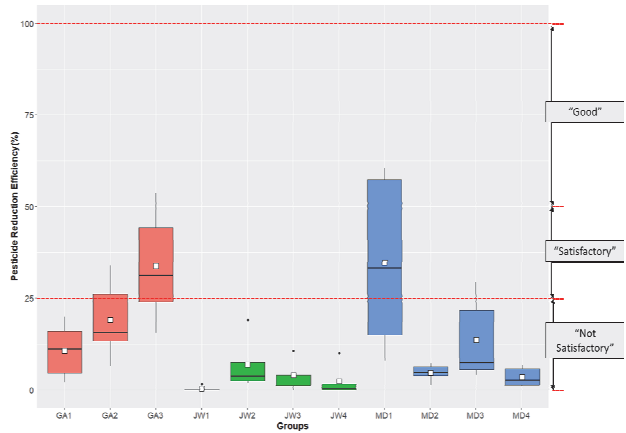
MD1 군집과 GA3 그룹만 “Satisfactory” 기준에 충족하였으며, 저감효과는 각각 33.71, 34.13 %이다. MD1 군집의 평균 면적, 경사도, 경사장과 표준편차는 각각 0.32 ± 0.17 (ha), 38.90 ± 12.37 (m), 3.21 ± 2.48 (%)이며, GA3 군집의 평균 면적, 경사도, 경사장과 표준편차는 각각 0.22 ± 0.10 (ha), 29.33 ± 10.42 (m), 5.84 ± 1.80 (%)이다. 두 군집 모두 지구 내에서 지형적 특성이 낮은 범위에 속해있는 군집이다.

나. 시나리오별 초생대 오염물질저감 효과 비교분석

시나리오 2와 3은 1 m 초생대 구간에 초생대 구간의 경사도 완화(SC2)와 초종(잔디) 변경(SC3)을 통해 초생대의 오염물질저감 효과를 증가시킬 수 있는 방법이다. Fig. 6는 지구별

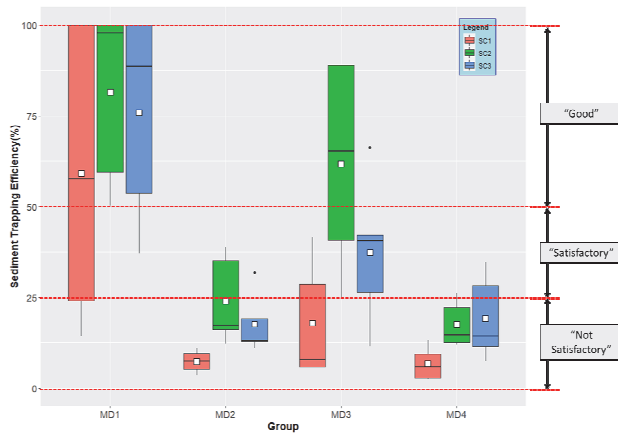


(a) Sediment Trapping Efficiency (%) of each group for scenario 1

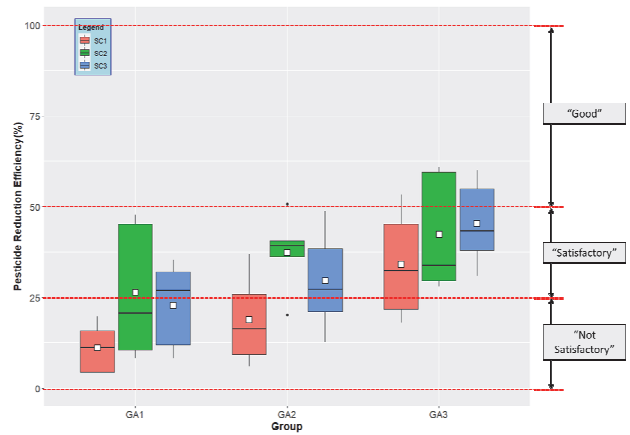


(b) Pesticide Reduction Efficiency (%) of each group for scenario 1

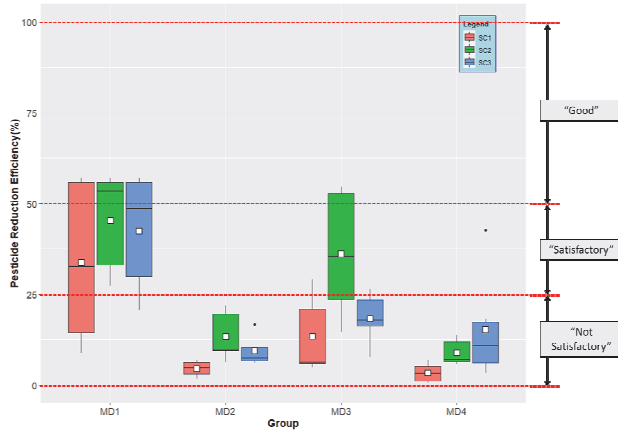
Fig. 4 Pollutant reduction efficiency (%) of each group for scenario a. Red dotted lines show the border of VFS evaluation criteria, White squares mean the average values of each box plot



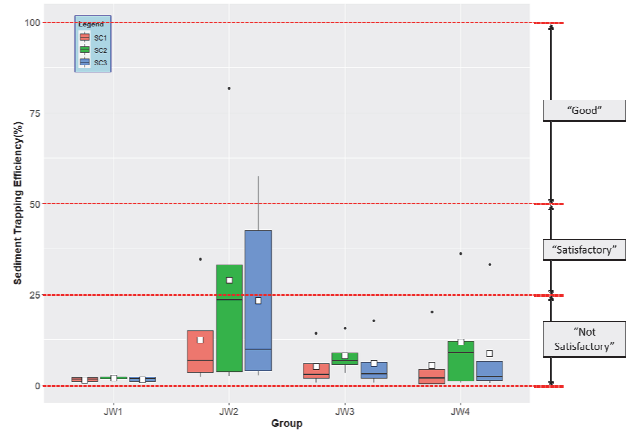
(a) The comparisons of sediment trapping efficiency (%) between three scenarios in the Maedae watershed



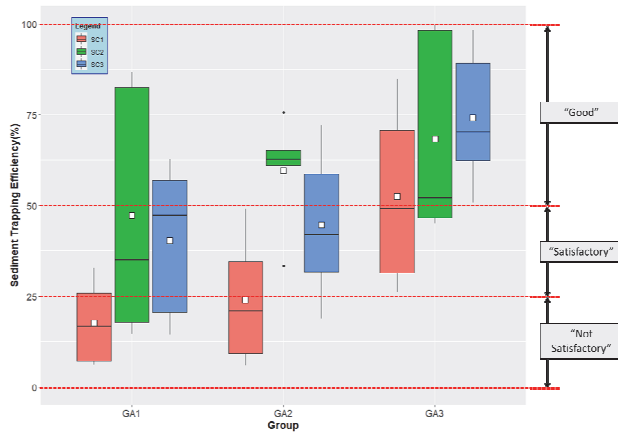
(d) The comparisons of pesticide reduction efficiency (%) between three scenarios in the Gaa watershed



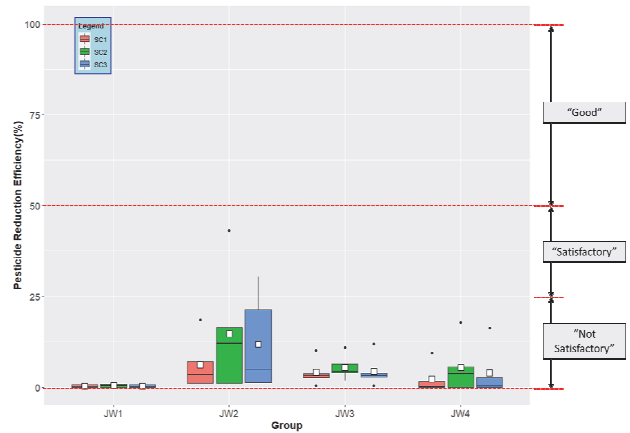
(b) The comparisons of pesticide reduction efficiency (%) between three scenarios in the Mandae watershed



(e) The comparisons of sediment trapping efficiency (%) between three scenarios in the Jaun watershed



(c) The comparisons of sediment trapping efficiency (%) between three scenarios in the Gaa watershed



(f) The comparisons of pesticide reduction efficiency between three scenarios in the Jaun watershed

Fig. 5 The comparisons of the pollutant reduction efficiency (%) between the scenarios, The red, green, and blue box plots represent the results of scenario 1, 2, and 3, respectively. White squares show the average value of the each box plot

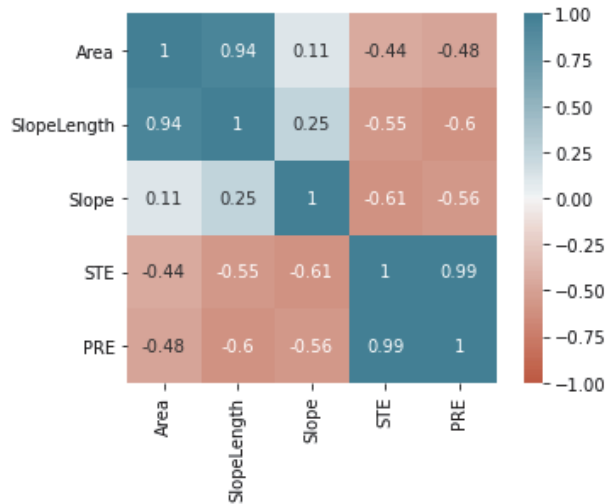


Fig. 6 Correlation results between the geographic factors and the pollutant reduction efficiency

초생대 시나리오의 오염물질저감 효과를 보여준다. 세 개 지역 모두 시나리오 2와 3에서 높은 오염물질저감 효과를 보였다. 만대지구의 경우, MD3 군집에 시나리오를 2와 3를 적용했을 때, 각각 61.71, 37.39 %의 유사저감 효과를 나타냈으며, “Good”과 “Satisfactory” 기준에 해당된다. 농약저감 효과의 경우 유사와 비슷한 경향을 보여줬으며, MD3 군집에서 시나리오 2를 적용했을 때 36.18 % 농약저감 효과를 보였으며 이는 “Satisfactory” 기준에 해당한다. MD2와 MD4 군집은 시나리오 2와 3에서 오염물질저감 효과가 증가된 경향을 나타냈지만, 여전히 “Not Satisfactory” 기준에 해당된다.

가야지구의 경우, 가장 높은 시나리오의 효과를 보여주었다. 유사저감 효과의 경우, 모든 군집이 시나리오 2, 3에서 “Satisfactory”와 “Good” 기준에 충족하였다. 농약저감 효과의 경우, GA1 군집의 시나리오3 경우를 제외하고 모두 “Satisfactory” 기준에 충족하였다. 가야지구의 지형적 특성상, 초생대의 오염물질저감 효과가 다른 두 개 지구에 비해 높은 것으로 분석되었다.

자운지구는 JW2 군집에 시나리오 2에 적용했을 때 28.89%의 유사저감 효과를 보였으며, “Satisfactory” 기준에 유일하게 충족하는 군집이었다. JW1, JW2, JW3 군집은 25% 이하의 오염물질저감 효과를 나타냈으며, 세 개 지구 중 초생대 사업을 수행하기에 가장 적합하지 않은 지역으로 판단된다.

다. 초생대 효율과 경작지 효율의 상관성 분석결과

피어슨 상관계수를 이용하여 경작지의 지형적 특성과 초생대의 오염물질저감 효율의 상관관계를 분석하였다 (Fig. 6).

유사저감의 경우 면적, 경사장, 경사도의 상관관계가 각각 -0.44, -0.55, -0.61로 나타났으며, 경사도의 상관관계가 다른 지형 인자들에 비해 비교적 높은 것으로 파악되었다. 농약저감의 경우 면적, 경사장, 경사도의 상관관계가 각각 -0.48, -0.60, -0.56로 나타났으며, 경사장이 가장 높은 상관성을 보였다. 따라서 초생대 설치에 적합한 경작지를 선정할 때, 면적보다는 경사도와 경사장을 우선순위로 고려하여 선정하여야 한다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 비점오염원 관리지역인 만대지구, 가야지구, 자운지구 내 경작지 (밭)을 대상으로 지형특성 자료(면적, 경사도, 경사장)를 이용하여 군집 분석을 수행하였으며, 이를 통해 군집 별 대표 경작지를 도출하였다. 이후 VFSMOD를 통해 경작지 지형적 특성에 따른 초생대의 유사 및 농약저감 효율을 평가하였다. 초생대 시나리오는 총 세가지로 구성되어 있으며 모두 1 m 구간의 초생대를 적용하였다. 첫 번째 시나리오는 환경부에서 제시한 호밀을 이용하였고, 두 번째 시나리오는 같은 초종에 초생대 구간의 경사도를 완화, 세 번째 시나리오는 첫 번째 시나리오에서 초종만 잔디로 변경하였다.

가야지구는 주로 낮은 면적의 경작지들이 분포해있으며, 자운지구와 만대지구의 경우 경사도가 급하거나 경사장이 긴 경작지들이 포함되어 있었다. 첫 번째 시나리오에서 효율이 높았던 군집은 MD1과 GA3였다. MD1과 GA3 군집의 평균 면적, 경사도, 경사장과 표준편차는 각각 0.32 ± 0.17 (ha), 38.90 ± 12.37 (m), 3.21 ± 2.48 (%)이며, 0.22 ± 0.10 (ha), 29.33 ± 10.42 (m), 5.84 ± 1.80 (%)이다. 두 군집 모두 지구 내에서 지형적 특성이 낮은 범위에 속해있는 군집이며, 초생대 조성 사업 시 두 군집과 비슷한 지형적 특성을 가진 경작지를 대상으로 사업을 수행하여야 사업의 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

두 번째와 세 번째 시나리오를 적용했을 때 가장 효과가 높았던 지역은 가야지구이며 대부분 “Satisfactory” 기준에 충족하였고, MD3 군집 역시 경사도를 낮추는 두 번째 시나리오에서 오염물질저감 효과가 높게 상승하였다. 상승이 높았던 MD3의 지형적 특성의 경우 경사도는 높았지만, 면적이 좁고, 경사장이 짧은 지형적 특성을 가진 경작지였다. 따라서 경사도가 높은 경작지도 면적과 경사장을 함께 고려했을 때 초생대 사업에 적합한 경작지를 선정될 수 있을 거라 판단된다. 자운지구는 대부분의 군집 모두 25% 이하의 오염물질저감 효과를 나타냈으며, 초생대 사업시 가장 낮은 효율을 나타낼

것으로 판단된다.

경작지의 지형적 특성과 오염물질저감 효율의 상관성 분석 결과 경사도와 경사장이 면적에 비해 오염물질저감 효율과의 상관성이 높은 것으로 분석되었다. 따라서 초생대 설치 사업 시 경사도와 경사장을 우선적으로 고려하여 적합한 경작지를 도출하여야 한다.

기존에 수행되었던 VFSSMOD 관련 연구는 가상의 시험포를 구성하여 초생대의 특성에 따른 오염물질저감 효과를 분석하였다. 본 연구에서는 기존에 수행되었던 연구와는 달리 비점오염원 대상 지역의 경작지의 지형적 특성을 고려하였고, VFSSMOD를 통해 실제 사업에 적용할 수 있는 시나리오를 구축하여 초생대의 오염물질저감 효과를 분석하였다. 본 연구의 결과는 이는 지속적인 비점오염원 관리를 위해 농민의 참여를 유도할 수 있는 자료 및 초생대 설치 사업 시 적합한 대상 경작지를 선정할 수 있는 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “표토보전관리기술개발사업 (2019002820003)”으로 지원을 받아 연구되었음.

REFERENCES

- Ahn, J. H., S. L. Yun, S. K. Kim, Y. S. Park, and K. J. Lim, 2012. Analysis of suspended solids reduction by vegetative filter strip for cultivated area using web GIS-Based VFSSMOD. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 34(12): 792-800 (in Korean).
- Choi, J. D., 2014. National Institute of Environmental Research, 192-193, Establishment of Nonpoint Source Management Measure in Goljicheon Watershed.
- Cho, J. H., 2016. Monitoring and Evaluation of Non-Point Pollutants Management Areas in Manda, Gaa and Jawoon districts, 19, Wonju-si, Ministry of Environment.
- Choi, J. S., K. H. Hyun, J. M. Lee, M. S. Kang, and S. K. Jung, 2012. Issues and improvements in extended application of LID technologies. *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, 242-246 (in Korean).
- Choi, J. W., G. W. Hyun, J. W. Lee, D. S. Shin, K. S. Kim, Y. S. Park, J. G. Kim, and K. J. Lim, 2009. Evaluation of sediment yield prediction and estimation of sediment yield under various slope scenarios at Jawoon-ri using WEPP watershed model. *Journal of Korean Society on Water Quality* 25(3): 441-451 (in Korean).
- Dillaha, T. A., J. H. Sherrard, D. Lee, S. Mostaghimi, and V. O. Shanholtz, 2010. Evaluation of vegetative filter strips as a best management practice for feed lots. *Journal of Water Pollution Control Federation* 60(7): 1231-1238.
- Gharabaghi, B., R. P. Rudra, H. R. Whiteley, and W. T. Dickinson, 2001. Performance testing of vegetative filter strips. In *Bridging the Gap. Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges*, 1-9.
- Jeon, M. S., 2015. An institutional plan to manage areas in Gangwon province that are vulnerable to nonpoint source pollution, Research Institute for Gangwon.
- Jeong, W. G., I. R. Huh, G. H. Yi, S. H. Kim, C. M. Bae, U. J. Park, S. B. Choi, and C. C. Kim, 2017. Analysis of water quality improvement effects in a muddy water occurrence stream during rainfall. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis* 20(1): 49-57 (in Korean).
- Kim, J. G., M. H. Sin, and E. M. Hong, 2019. An example of resident participation governance for reducing muddy water in rivers. *Water for Future* 52(6): 69-72 (in Korean).
- Koo, J. Y., D. S. Yoon, D. J. Lee, J. H. Han, Y. H. Jung, J. E. Yang, and K. J. Lim, 2016. Effect of DEM Resolution in USLE LS Factor. *Journal of Korean Society on Water Environment* 32(1): 89-97 (in Korean).
- Lee, J. W., J. S. Eom, B. C. Kim, W. S. Jang, J. C. Ryu, H. W. Kang, K. S. Kim, and K. J. Lim, 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 (in Korean).
- Lee, K. A., T. H. Kim, and J. H. Kim, 2011. Gene screening and clustering of yeast microarray gene expression data. *Korean Journal of Applied Statistics* 24(6): 1077-1094 (in Korean).
- Lee, S. G., J. R. Jang, and K. S. Choi, 2014. Simulations of Reduction Effects on Runoff and Sediment for VFS Applications by Considering Uplands Characteristics in Iksan. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 56(5): 89-99 (in Korean).
- Lee, S. G., J. R. Jang, and K. S. Choi, 2015. Estimation of application cost and utilization of turf grass VFS for reduction of uplands NPS pollution. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(2): 75-83 (in Korean).

16. Lee, S. R., G. J. Lee, D. S. Yang, Y. J. Choi, K. J. Lim, and W. S. Jang, 2019. Occurrence and behavior analysis of soil erosion by applying coefficient and exponent of MUSLE runoff factor depending on land use. *Journal of Wetlands Research* 21(s-1): 98-106 (in Korean).
17. Lim, H. J., S. Y. Choi, H. Y. Park, and S. I. Yeo, 2019. Understanding of applicants for science gifted education on the phenomena and problems of global warming. *Korea Society of Energy & Climate Change* 9(3): 293-301 (in Korean).
18. Ministry of Agriculture and Forestry, 2005. Management and Control of Nonpoint Source Pollution in Rural Area (I).
19. Ministry of Environment, 2007. Water Environment Conservation Act.
20. Ministry of Environment, 2018. Water Environment Conservation Act, Sejong-si: Ministry of Environment.
21. Park, J. H., H. S. Woo, C. K. Pyun, and K. I. Kim, 2000. A study of distribution of rainfall erosivity in USLE/RUSLE for estimation of soil loss. *The Korea Water Resources Association* 33(5): 603-610 (in Korean).
22. Park, Y. S., J. G. Kim, N. W. Kim, J. H. Park, W. S. Jang, J. D. Choi, and K. J. Lim, 2008. Improvement of sediment trapping efficiency module in SWAT using VFSMOD-W model. *Journal of Korean Society on Water Quality* 24(4): 473-479 (in Korean).
23. Park, Y. S., J. Y. Park, W. S. Jang, and J. G. Kim, 2019. A study to determine the slope length and steepness factor of universal soil loss equation with determining and adapting major slope length at field scale. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(6): 55-56 (in Korean).
24. Robinson, C. A., M. Ghaffarzadeh, R. M. Cruse, 1996. Vegetative filter strip effects on sediment concentration in cropland runoff. *Journal of Soil and Water Conservation* 51(3): 227-230.
25. Rafael, M. C., E. P. John, and J. W. G., 1999. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips. *Journal of Hydrology* 214(1-4): 111-129.
26. Shin, D. S., J. B. Park, D. K. Kang, and D. J. Jo, 2013. An analysis of runoff mitigation effect using SWMM-LID model for frequently inundated basin. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 13(4): 303-310 (in Korean).
27. Seo, J. H., and K. S. Choi, 2013. Analysis of sediment reductions effects of VFS systems for the general characteristics of uplands in Korea. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(4): 121-131 (in Korean).
28. Seo, J. H., J. Y. Park, and D. Y. Song, 2005. Effect of cover crop hairy vetch on prevention of soil erosion and reduction of nitrogen fertilization in sloped upland. *Korean Journal of Soil Science and Fertilizer* 38(3): 134-141 (in Korean).
29. Song, S. H., 2014. Rural areas non-point pollution source management planning guidelines provided research, NIER-SP2014-322, National Institute of Environmental Research (in Korean).
30. Sung, Y. S., D. J. Kim, S. I. Lee, J. C. Ryu, J. G. Kim, K. J. Lim, and K. S. Kim, 2020. Analysis of effect of ditch restoration on soil loss reduction in highland agricultural fields. *Journal of Korean Society on Water Environment* 36(5): 385-391 (in Korean).
31. Yun, S. I., Y. J. Lee, J. H. Ahn, W. S. Choi, J. W. Lee, H. C. Oh, and S. K. Kim, 2017. Evaluation of filtration and backwash efficiency of non-point source pollution reduction facility. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 39(12): 664-672 (in Korean).