Journal of Korean Society on Water Environment, Vol. 30, No. 6, pp.638-646 (November, 2014)
pISSN 2289-0971 eISSN 2289-098X http://dx.doi.org/10.15681/KSWE.2014.30.6.638

최적관리기법에 따른 토양유실 저감 효과 유역단위 분석

이동준[*] · 이지민[*] · 금동혁[*] · 박윤식[*] · 정영훈[*] · 신용철[**] · 정교철[***] · 이병철[****] · 임경재[*,†]

[*]강원대학교 지역건설공학과
[**]APEC 기후센터
[***]안동대학교 지구환경과학과
[****](주) 네오콘텍

Analysis of Effects on Soil Erosion Reduction of Various Best Management Practices at Watershed Scale

Dong Jun Lee[*] · Ji Min Lee[*] · Donghyuk Kum[*] · Youn Shik Park[*] · Younghun Jung[*] · Yongchul Shin[**] · Gyo-Cheol Jeong[***] · Byeong Cheol Lee[****] · Kyoung Jae Lim[*,†]

[*]*Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University*
[**]*APEC Climate Center (APCC)*
[***]*Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University*
[****]*NeoCon Tech*

(Received 13 August 2014, Revised 29 October 2014, Accepted 31 October 2014)

Abstract

Soil erosion from agricultural fields leads to various environmental problems weakening the capabilities of flood control and ecosystem in water bodies. Regarding these problems, Ministry of Environment of South-Korea prepared various structural and non-structural best management practices (BMPs) to control soil erosion. However, a lot of efforts are required to monitor and develop BMPs. Thus, modeling techniques have been developed and utilized for these issues. This study estimated the effectiveness of BMPs which are a vegetation mat with infiltration roll and Roll type vegetation channel using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model through the adjustment of the conservation practice factors, P factors, for Universal Soil Loss Equation which were calculated by monitoring data collected at the segment plots. Each BMP was applied to the areas with slopes ranged from 7% to 13% in the Haeanmyeon watershed. As a result of simulation, the vegetation mat with infiltration roll and Roll type vegetation channel showed 55% and 59% efficiency of soil erosion reduction, respectively. Also, Vegetation mat with infiltration roll and Roll type vegetation channel showed each 11.2% and 11.8% efficiency in reduction of sediment discharge. These roll type vegetation channel showed greater efficiency of soil erosion reduction and sediment discharge. Based on these results, if roll type vegetation channel is widely used in agricultural fields, reduction of soil erosion and sediment discharge of greater efficiency would be expected.

Key words : BMPs, Roll type vegetation channel, Soil erosion, SWAT, USLE P, Vegetation mat with infiltration roll

1. Introduction

최근에 기후가 급변하면서 전 세계적으로 집중호우, 가뭄 등 기후변화에 의한 자연재해들이 많이 발생하고 있으며 (Jang and Ahn, 2012), 이러한 변화는 우리나라에서도 발생하고 있다. 국토 면적의 70%이상이 산지이며 경사도가 7% 이상인 경작지가 전체 경작지의 60% 이상인 우리나라에서는 집중강우의 발생 빈도가 증가함에 따라 대규모의 토양유실이 발생되고 있다(Seo et at., 2005). 특히 몬순기후의 영향으로 강우가 집중되는 7~9월은 농경지에서부터 일시에 많은 양의 토양유실이 발생되어 하천 수질 및 정화능력 등에 다양한 환경문제를 발생시키고 있다(Kim et al., 2007; Lee et al., 2011; Lee et al., 2014). 환경부에서는 강우 유출에 의해 유실되는 토양을 비점오염원으로 규정하고(Kum et al., 2012), 토양유실을 저감시키기 위해 도시, 산업, 농촌 등 토지이용별 특징에 따라 토양유실 방지 대책 을 수립하고 관리하고 있다. 또한 환경부에서는 표토를 자원으로서 활용하고 보전하기 위해 표토관리 지침을 고시하였다 (Park, 2008). 표토가 한번 유실되면 재생성 되는데 있어 많은 시간이 필요하기 때문에 표토침식 관리가 중요한 쟁점으로 부각되었다. 최근에 표토의 관리 및 보전을 위해 토양침식 모니터링 및 저감 기술 개발, 표토의 복합적 질 평가 및 최적 관리 시스템 구축 등과 같은 표토보전을 위한 많은 연구가 진행되었다(MOE, 2001). 다양한 환경분야 연구를 통해 표토침식저감을 위한 식생매트, 식생수로, 및

† To whom correspondence should be addressed.
kjlim@kangwon.ac.kr

침사지 같은 친환경적이고, 공학적인 저감 공법 등이 개발되었으나 이 공법들은 비용, 예산, 지형적 조건 등의 제한으로 실제 현장에 적용하기에는 어려움이 있다. 식생매트를 설치하기 위해서는 지표면을 다듬는 단계에서 많은 예산과 인력, 장비가 필요하며, 사면에 고정되어 있는 식생매트의 경우 지나가는 야생동물들이 다치거나 죽는 경우가 다수 발생한다. 또한 식생매트는 강우 이벤트 후 그 효과가 저감되는 경우가 많아 유지관리하기에 어려움이 있다. 식생수로관의 경우 우수의 흐름을 방해하여 더 큰 피해를 야기할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 발생원인 농경지에서 토양 유실을 관리하는 것이 더욱 효율적일 것으로 생각된다. 이에, 2012년 강원대학교에서 진행된 식생조절 방안/공학적 저감 공법/토지개발사업 토양침식 저감 공법 개발(Kangwon National University, 2012)연구에서는 식생매트 투수롤, 다발형 식생수로관이 개발되었다. 식생매트 투수롤은 기존의 수로관 측면에 식생매트와 투수롤을 설치하여 유실되는 표토가 배수로에 유입되는 것을 억제하기 위한 공법이며, 다발형 식생수로관은 측면에 식생부를 형성하여 토사의 유입을 방지하고 침투형 수로의 결합을 통해 유속 또한 저감시킬 수 있는 공법이다. 개발된 공법의 효과를 검증하기 위해 시험포를 조성하였고 모니터링이 수행되었다. 모니터링 결과 식생매트 투수롤과 다발형 식생수로관 모두 저감효과가 큰 것으로 나타났지만, 소규모 단위에서의 실험 결과를 활용하여 유역단위의 효과를 판정하기에는 지형 및 재배 작물, 토양속성 등 공간조건의 차이로 인해 어려움이 있다. 또한 유역단위의 모니터링을 수행하기에도 비용 및 시간적 어려움 있다. 최근에는 비용적 시간적 문제를 해결하고 다양한 최적관리기법(Best Management Practice, BMP)의 효과를 평가하기 위해 수리/수문 모형이 활용되고 있다. 국내에서 볏짚지표의 저감효과를 분석하기 위해 농촌 소유역에 Hydrological Simulation Program (HSPF) 모형을 적용하였으며(Jung et al., 2012), Jang et al. (2010)과 Kum et al. (2012)은 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형을 이용한 볏짚매트 효과 평가를 위한 모형 적용 변수로 USLE P 값을 산정하였다.

본 연구의 목적은 식생매트 투수롤과 다별형 식생수로관, 플륨관, 투수롤 시험포 모니터링 결과 값을 활용하여 USLE P 인자를 산정한 후 이를 수문/비점 모형인 SWAT 모형에 적용시켜 유역단위에서 최적관리기법들의 토양 유실 및 유사저감 효과를 평가하는데 있다.

2. Materials and Methods

2.1. 연구지역

본 연구에서는 다양한 토양유실 저감 공법의 효율을 평가하기 위하여, 소양강 유역 내 고랭지 농업이 성행하고 있는 강원도 양구군 해안면 유역(Fig. 1)을 연구 대상 지역(Jun, 2007)으로 선정하였다. 해안면 지역의 면적은 양구군 전체의 8.8%에 해당되며, 유역면적은 61.52Km^{2}이다. 이중 농경지는 전체의 35.8%에 해당된다. 농경지 중 논과 밭은 각각 17%와 83%를 차지하고 있다. 이 지역의 평균 실측 경사도는 11.5%이나 분지의 하부를 제외하고는 경사가 매우 급하며, 고랭지 농업이 주를 이루고 있다(Yoo et al., 2008). 유역내 필지에서의 정확한 강우-유출 그리고 유사 발생 및 이동 등을 정확하게 평가하기 위해서 본 연구에서는 John et al. (2011)에서 대상 연구 유역에서 조사한 각 필지별 경사도와 경사장 자료를 반영하여 모형을 구성하였다. 이는 해안면 유역의 실측 필지자료를 이용하여 임의 필지에 대해 최적관리기법을 적용시키고, 경작지의 경사도 별 토양유실 저감 효과를 평가하는데 있어 현장 조건을 반영하기 위함이다.

2.2. 최적관리기법 선정 및 USLE P 산정

본 연구에서는 강원대학교에서 진행된 "식생조절 방안/공학적 저감 공법/토지개발사업 토양침식 저감 공법 개발(Kangwon National University, 2012)" 에서 개발된 식생매트 투수롤과 다발형 식생수로관의 유역단위 토양유실 저감 효과를 분석하기 위해 개발된 최적관리기법들과 기존의 최

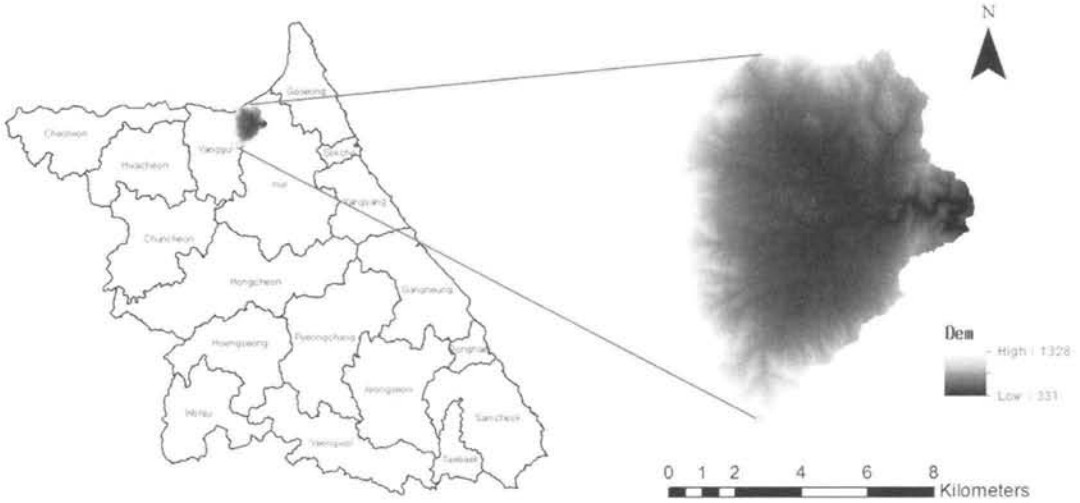

Fig. 1. Location of the Haeanmyeon watershed.

적관리기법인 플륨관과 투수롤 그리고 자연상태인 대조구의 모니터링 자료를 이용하였다. 식생매트 투수롤(Fig. 2)이란 기존의 수로관 측면에 식생매트와 투수롤을 설치함으로서 유실된 표토가 배수로로 유입되는 것을 억제하는 공법이다. 식생매트를 통해 유출되는 우수의 유속을 저감시키고 토사를 제어한다. 또한 입자가 작은 토사가 유실될 경우 투수롤를 통해 2차적으로 유실을 방지한다. 다발형 식생수로관(Fig. 3)은 수로 외벽부에 해당하는 측면에 식생부를 형성하여 토사의 유입을 방지하고, 수로 중앙부에는 유수의 흐름 및 침투가 가능한 수로를 형성하여 유속을 저감시키는 기능을 수행한다.

본 연구에 사용된 USLE P 인자는 범용토양유실공식(USLE) 중 토양관리인자로서 토양보전 대책기법 적용 시 발생하는 토양 손실량과 사면에서의 토양유실 비를 의미한다(Lee et al., 2012). 따라서 개발된 각 최적관리기법의 유사 저감 효과를 평가하기 위해 USLE P 인자를 이용하는 것은 적합하다고 사료된다. USLE P 인자를 산정하기 위해 GAIA Project 식생조절/공학적 저감 공법/토지개발사업 토양침식 저감 공법 개발 연구에서 진행된 최적관리기법들의 모니터링 자료를 분석하였다. 모니터링 자료는 개발된 두 가지 종류의 최적관리기법의 효율을 분석하기 위해 최적관리기법을 적용하지 않은 대조구와 기존에 많이 사용되고 있는 플륨관, 그리고 이번 연구를 통해 개발된 투수롤을 같은 경사도와 같은 작물인 옥수수를 재배한 시험포에 적용하여 모니터링 하였다. 모니터링 자료는 2012년 4월부터 2013년 4월동안 6차례의 강우 시 각 최적관리기법에서 유실된 토양의 무게를 측정하여 대조구와의 무게와의 비를 통해 각 최적관리기법들의 USLE P값을 산정하고자 하였다. 하지만 첫 번째 강우 시 시험포의 지표표면 상태가 불완전했기 때문에 비교적 많은 양의 토양이 유실되었다. 따라서 첫 번째 강우 인해 유실된 토양의 무게는 USLE P 인자를 산정하는데 있어 적합하지 않다고 판단하였다. 이에, 본 연구에서는 첫 번째 강우 이벤트를 제외한 나머지 5가지의 강우 이벤트에서 유실된 토양의 무게를 이용하여 USLE P 인자를 산정하였다.

2.3. SWAT 모형의 개요 및 입력자료

2.3.1. SWAT 모형의 개요

SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service)에 의해 개발된 유역단위 모형으로서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상에 따른 수질과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리 방법 등을 비롯한 유역에서의 수문 거동을 모의하기 위해 개발되었다(Arnold, 1992; Aronld et al., 1998; Neitsch et al., 2005a; Neitsch et al., 2005b). 유역단위의 수문 거동을 시·공간적으로 모의하기 위해서는 시간적으로 변화하는 기상자료와 공간적으로 다르게 분포하는 토양속성, 토지이용현황 그리고 지형자료 등이 필요하다(Arnold, 1992; Arnold et al., 1998). SWAT 모형은 수문학적 반응단위(Hydrological Response Unit; HRU)을 기본단위로 하여 유역 내 수문현상을 모의한다. HRU는 토지이용도와 토양도 및 경사도의 중첩을 통해 생성한다. 그리고 수치지도(Digital Elevation Model; DEM)를 통해 소유역의 평균 경사도와 경사장을 따라서 HRU를 생

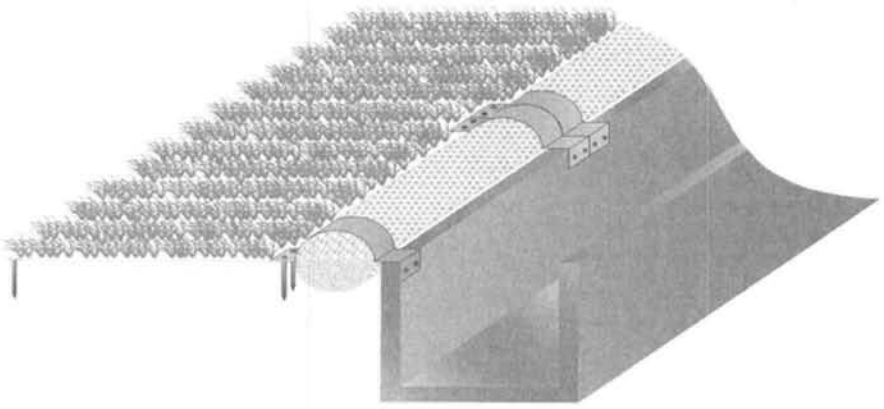

Fig. 2. Vegetation mat with Infiltration roll (Kangwon National University, 2012).

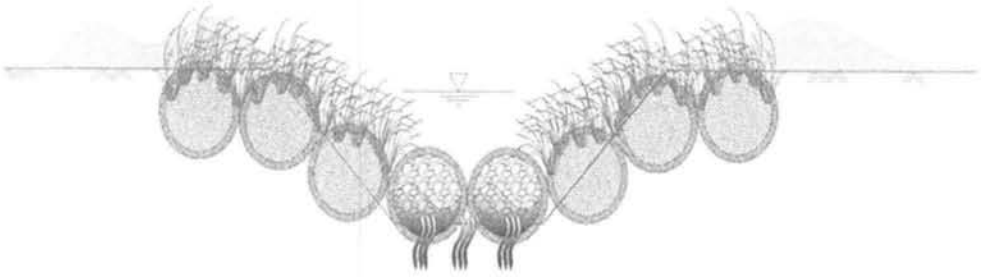

Fig. 3. Roll type Vegetation Channel (Kangwon National University, 2012).

성하는데, 소유역 내 HRU의 경사도와 경사장이 동일하게 연산되어 경작지에서의 유출 및 토양유실 특성을 충분히 반영하지 못하기 때문에 유사 발생이 빈번하게 일어나는 농경지를 포함한 유역에서 정확한 토양유실 및 유사거동을 평가하는데 한계점이 있는 것으로 생각된다.

2.3.2. 경사도/경사장 구축

SWAT모형은 전반적으로 경사가 완만한 지역인 미국 지형을 바탕으로 개발되어 적용되었다. 이 모형에 사용된 많은 수문 및 토양유실, 그리고 비점관련 모듈은 우리나라와 같이 경사가 급한 곳이 많은 유역에 SWAT 모형을 적용할 때, 지형인자 추출오류가 발생하는 등 정확한 토양유실 및 유사거동을 평가하는 데에 있어 한계점이 있을 수 있다(Kim, Park, Jang et al., 2008; Kim et al., 2009). 또한 SWAT 모형은 소유역의 평균경사와 HRU의 경사장 관계 곡선식을 이용하여 HRU의 평균 경사장을 산정하는데, 이 과정에서 경사도 25% 이상인 급경사지역에 있는 소유역 경사장의 값을 일괄적으로 0.05m~10m로 작게 산정하는 문제가 발생한다(Arnold and Srinivasan, 1994; Kim, Park, Kim et al., 2008). HRU의 지형인자 추출의 한계는 각 수문 및 유사를 모의하는데 오류가 발생할 수 있는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 정확한 토양유실량 모의를 위해 2010년 해안면 유역의 실측 경사도와 실측 경사장 자료는 TERRECO의 John et al. (2011)를 이용하였다. 실측된 경사도와 경사장을 입력함으로서 전형적인 급경사 농업지대인 해안면 유역의 유출량 및 토양 유실량을 산정하는데 SWAT 모형의 한계점을 보완하고자 하였다.

2.3.3. 기상자료

SWAT 모형을 이용하여 유역단위의 수문 및 유사거동을 모의하기 위해서는 시간적으로 변화하는 기상자료(일 수평면 일사량(MJ/m^2), 일 강수(mm), 일 평균상대습도(%), 일 평균풍속(m/sec), 일 최고·최저기온(°C))가 필요하다. 본 연구에서는 John et al. (2011)에서 해안면 유역의 11개 지점을 대상으로 조사한 2007년부터 2010년 8월까지의 관측된 일별 기상자료를 이용하였다.

2.3.4. 지형자료

SWAT 모형의 입력 자료인 DEM (Digital Elevation Model)은 국립지리원에서 제공해 주는 수치지도(1:5,000)를 이용하여 구축하였다. 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공해주는 개략토양도(1:50,000)를 사용하였으며, 해안면의 토양속성 현황은 Clay-Slit (An), Silt-Sand (Ma), Clay-Slit (Mu), Silt-Sand (Ra), Silt-Sand (Rck), Silt-Sand (Re)로 구성되어 있다(Fig. 4). SWAT모형의 여러 입력자료 중 토지이용도의 불확실성이 클 경우, 모의치가 실측치를 제대로 반영하지 못하여 과대 또는 과소평가 될 수 있다(Heo et al., 2008). 이에 본 연구에서는 해안면 유역 내 유출량 및 토양유실량 현황을 정확하게 예측하기 위하여 John et al. (2011)에서 조사한 해안면 유역의 실측 작물지도를 이용하여 토지이용도(Fig. 5)를 구축하였다. 해안면의 토지이용현황은 호박(AGRR), 배추(CABG), 초지(PAST, CLVR), 옥수수(CORN), 활엽수림(FRSD), 상록수림(FRSE), 과수원(ORCD), 혼효림(FRST), 고추(PEPR), 감자(POTA), 벼(RICE), 무(SGBT), 콩(SOYB), 공공시설지역(UINS), 중간-밀집 주거지역(URMD), 저밀도 주거지역(URML), 교통지역(UTRN), 수역(WATR)으로 이루어져 있다. 유역 유출 및 토양유실량 평가를 위하여 필지별 작물의 경작 장법, 경운, 시비 등의 영농정보를 SWAT 모형의 입력자료로 활용하였으며, 양구군(Yanggu-gun)에서 제공하는 해안면 유역 내 환경기초시설에서 배출하는 방류량 자료를 이용하여 유량 및 유사량을 보정하였다.

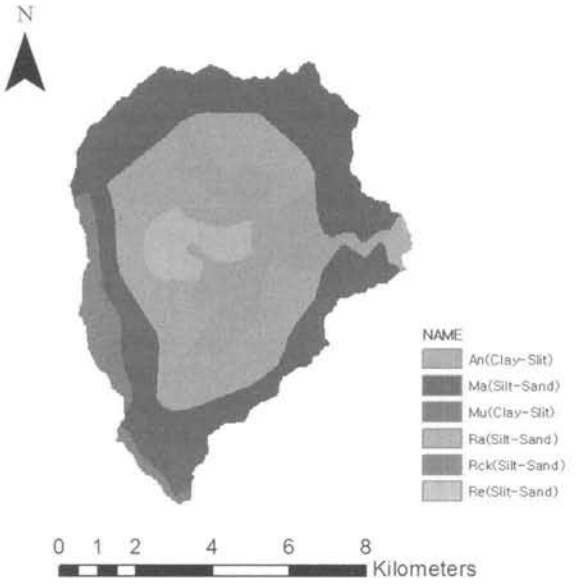

Fig. 4. Major soil types of study area.

2.4. 유출량 및 유사량 보정

본 연구에서는 SWAT 모형의 유출량과 관련된 변수를 보정한 후, 유사와 관련된 변수 보정하였다. 본 연구에서는 Lee et al. (2014)에서 해안면을 대상으로 SWAT 모형 보정 시 Surlag, LAT_Time, ALPHA_BF, Soil_K, CN2가 유출량과 유사량에 가장 민감하게 반응한다고 제시하였다. 따라서 본 연구에서도 Surlag, LAT_Time, ALPHA_BF, Soil_K, CN2를 이용하여 유출량과 유사량 보정을 실시하였다. 유출량은 2010년 1월부터 2010년 8월 까지 총 강우-유출이 발생하여 실측자료가 있는 25일에 대해 유량 보정을 실시하였으며, 유사량은 2010년 1월부터 2010년 7월까지 실측자료가 있는 20일에 대한 유사량 보정을 실시하였다. 본 연구에 사용한 실측 자료 중 2010년 5월 18일에 해당하는 실측 유사량 자료는 유의 수준 0.05(신뢰도 95%)의 기준에 적합하지 않아 유사량 자료 분석 시 제외하였다(Lee et al., 2014). SWAT 모형 보정 시 실측치에 대한 모의치를 평가하기 위하여 결정계수(Coefficient of determination; R^2)와 유효 지수(Nash-Stucliff Efficiency; NSE)를 이용하였으며, NSE 산정은 식 (1)에서 보이는 바와 같다(Nash and Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2 / \sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O_i})^2 \quad (1)$$

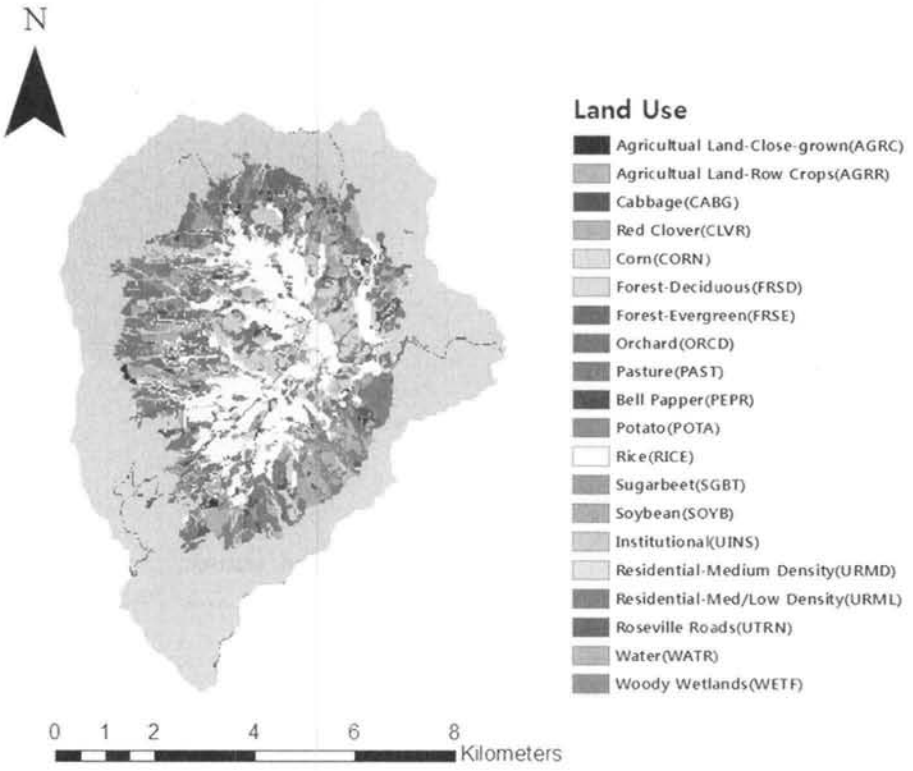

Fig. 5. Landuse of study area.

여기서 O_i 는 각 강우 시 실측된 값이고, P_i 는 모형에서 예측된 각 강우별 별 모의 값이며, $\overline{O_i}$ 는 모든 강우 시 실측값의 평균이다. NSE의 값이 1에 가까울수록 모형의 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다. Ramanarayana et al. (1997)은 R^2가 0.5 이상이고 NSE가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 제안하였다.

2.5. 대상 경작지 선정 및 SWAT 모형을 이용한 최적관리기법의 토양유실저감 효과분석

본 연구에서는 각 최적관리기법의 USLE P값을 SWAT 모형에 적용시켜 토양유실저감 효과를 분석하였다. 실측된 해안면의 실측 작물 지도 자료(Table 1)를 이용하여 최적관리기법을 적용시킬 수 있는 경작지를 분류(Table 2)하였다. 선정된 경작지는 실제 최적관리기법을 적용시킬 수 있는 밭을 대상으로 결정하였다.

본 연구에서 사용한 USLE P값은 경사도가 10% 내외인 시험포에서 모니터링에 의한 경험식으로 산정된 값이므로 산정된 8가지 토양이용도에서 시험포와 경사도가 유사한 7% 이상 13% 이하에 해당되는 경작지를 산정하였다.

토지이용도와 경사도의 조건을 만족하는 경작지를 대상으로 SWAT모형을 이용하여 최적관리기법 별로 산정된 USLE P값을 산정된 경작지에 적용하여 유실된 토양을 분석하였다. 농경지에 면적 대비 유사량을 비교하기 위해 해안면의 본류와 지류에 따라 3개의 소유역(Watershed 1, 2, 3)으로 구분하였다(Fig. 6).

3. Results and Discussion

3.1. USLE P 산정 결과

본 연구에서는 식생매트 투수롤, 다발형 식생수로관 및 기존의 공법인 플륨관, 투수롤의 USLE P 인자를 산정하기 위해 대조구인 공법을 적용하지 않은 상태에서의 USLE P 인자를 1로 설정하였다. 6차례의 강우 이벤트 중 첫 번째 강우이벤트를 제외하고 시험포에서 유실된 유사의 무게를

Table 1. Various landuses 2010 at Haeanmyeon watershed

Landuse	FRSD	RICE	PAST	POTA	CLVR	AGRR	SOYB	ORCD	SGBT	CABG
Area (%)	56.70	12.61	9.98	3.19	2.99	2.69	2.65	2.34	2.01	1.42
Landuse	UTRN	URML	URMD	WATR	AGRC	CORN	UINS	FRSE	WETF	PEPR
Area (%)	0.70	0.65	0.62	0.45	0.28	0.27	0.25	0.17	0.05	0.01

Table 2. Target Areas of BMPs

Landuse	AGRC	CABG	CORN	ORCD	PEPR	POTA	SGBT	SOYB
Area (%)	0.28	1.42	0.27	2.34	0.01	3.19	2.01	2.65

Table 3. Sediment yield and Estimation of USLE P Factor as fraction to Baseline

Storm event / Best Management practices	First Event (kg)	Second Event (kg)	Third Event (kg)	Fourth Event (kg)	Fifth Event (kg)	Sixth Event (kg)	Sum (kg)	USLE P value
Control field	137.10	4.77	2.24	2.95	0.54	0.57	11.08	1.00
Conventional flume pipe	62.50	3.00	1.22	1.41	0.20	0.17	5.99	0.54
Infiltration roll	17.39	1.57	0.38	0.39	0.04	0.05	2.42	0.22
Vegetation mat with Infiltration roll	3.65	0.68	0.28	0.25	0.03	0.03	1.26	0.11
Roll type vegetation channel	2.15	0.17	0.21	0.21	0.03	0.03	0.66	0.06

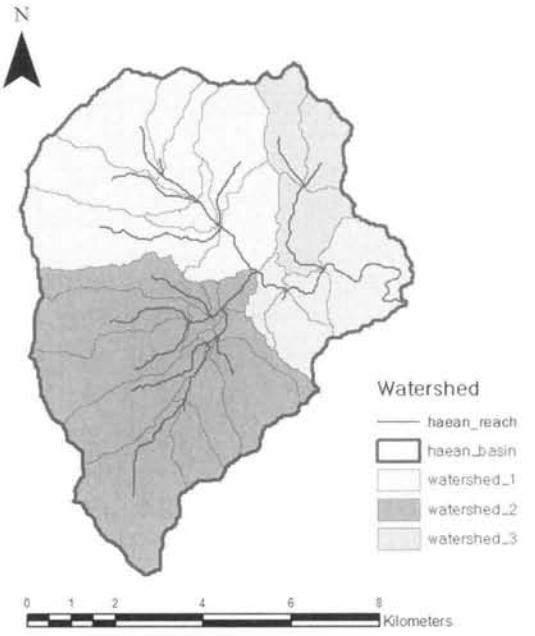

Fig. 6. Three watershed groups at Haeanmyeon watershed.

측정하여 대조구 시험포에서 유실된 유사의 무게와 각 공법 적용 후 유실된 유사의 무게의 비로 USLE P값은 산정하였다. Table 3은 6차례 강우 후 각 최적관리기법 별 유실된 유사의 무게와 산정된 USLE P값을 나타낸다. 다발형 식생 수로관과 식생매트 투수롤의 USLE P 인자 값은 각각 0.06, 0.11로 산정되었으며, 기존의 플륨관과 투수롤의 USLE P 인자 값은 각각 0.54, 0.22로 산정되었다.

3.2. 유출 및 유사 보정 결과

본 연구에서는 SWAT모형의 보정변수를 조정하여 유출량과 유사량을 산정하였다. 양구군 해안면 물굴교에서 측정된 2010년 1월부터 2010년 8월까지 25일간의 실측 직접유출량에 대하여 보정을 실시하였다. 유출량 보정결과 NSE는 0.61, R^2는 0.82 (Fig. 7)였다. 유량 보정 후 유사에 영향을 주는 모형의 매개변수를 보정하여 2010년 1월부터 2010년 7월까지 20일간의 실측 유사량에 대하여 보정을 실시하였다. 유사량 보정결과 NSE는 0.58, R^2는 0.58 (Fig. 8)였다.

본 연구의 유출 및 유사 보정 결과는 Ramanarayanan et al. (1997)이 제시한 기준에 충족되었으므로, SWAT 모형을 이용하여 해안면 유역의 유출 및 유사를 모의 할 수 있을 것으로 판단된다.

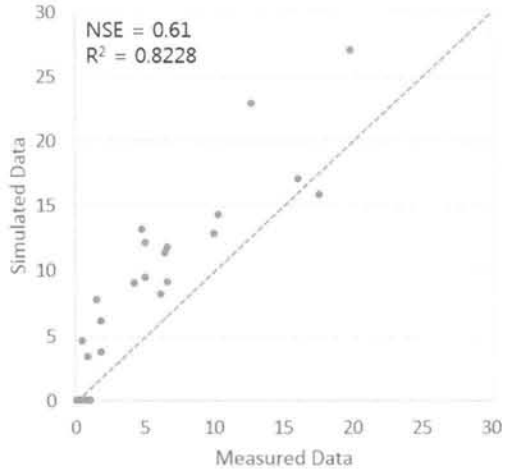

Fig. 7. NSE value for SWAT calibration of flow estimation.

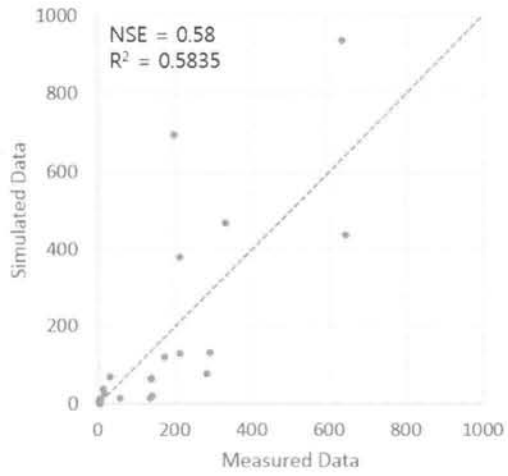

Fig. 8. NSE value for SWAT calibration of sediment estimation.

3.3. 대상지역 선정 및 최적관리기법 적용에 따른 유사저감 효과

본 연구에서는 2010년 해안면 유역의 실측 경사도와 실측 경사장 자료 John et al. (2011)를 SWAT 모형에 반영하여 Table 2에서 제시한 8가지 Landuse에서 경사도가 7%~13%인 대상 경작지를 선정한 결과 최적관리기법 적용 경작지는 3.98 km^2로 해안면 전체 지역의 6.3%이며 전체 농경지의 25.5%를 차지하고 있다.

모니터링에 결과에 따른 최적관리기법 별 USLE P 인자를 대상 경작지에 적용하여 토양유실저감 효과를 분석한 결과 식생매트 투수롤와 다발형 식생수로관은 기존의 공법

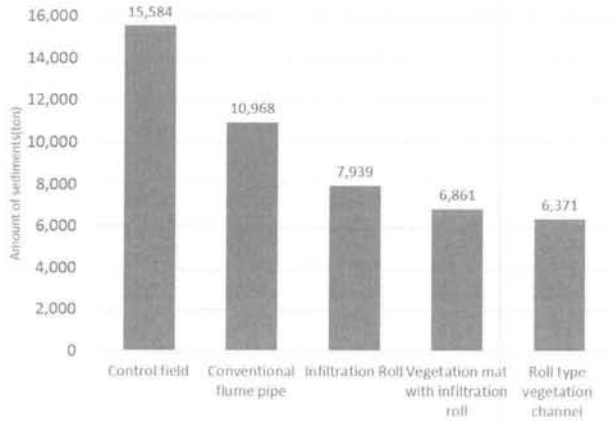

Fig. 9. Effects on Soil Erosion Reduction of various BMPs.

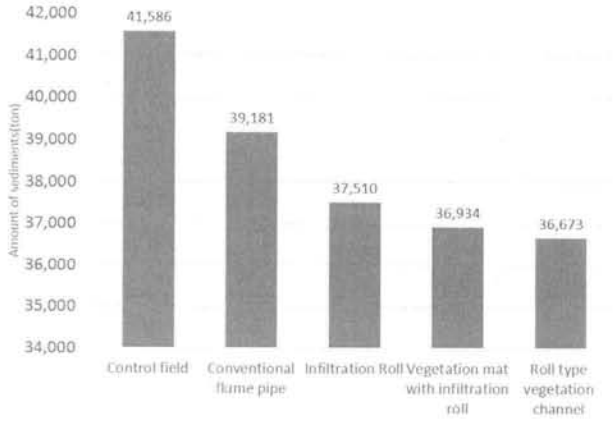

Fig. 10. Effects on Sediment Reduction of various BMPs.

에 비해 보다 큰 저감 효과를 보였다. USLE P가 1인 대조구에서 모의기간(2010년 1월~2010년 8월)동안 대상경작지 전체에서 유실된 토양은 15,584 ton이며, 기존의 플륨관과 투수롤을 적용했을 때의 유실량은 각각 10,968 ton, 7,939 ton으로 약 29%, 49% 이상 토양유실저감 효과를 보였다. 모의기간동안 개발된 식생매트 투수롤과 다발형 식생수로관을 적용시켰을 때의 유실량은 각각 6,861 ton, 6,371 ton으로 약 55%, 59% 이상 토양유실저감 효과를 보였다(Fig. 9).

경작지에 공법을 적용함으로써 경작지에서 토양 유실량이 저감됨에 따라 유출수에 의해 발생되는 유사량 또한 저감효과를 보였다. 본 연구에서는 해안면 유역의 하천의 본류와 지류에 따라 3가지 소유역으로 나누어 각 소유역 면적 대비 유사량을 분석하였다. 분류된 소유역의 면적과 경작지 면적 및 적용 경작지 면적은 Table 4 와 같다.

소유역의 면적 결과 Watershed_2에서 면적대비 경작지가 가장 많이 존재하였으며, 공법이 된 경작지의 면적 또한 가장 높아 가장 높은 효율을 보였다. 공법별 소유역 유사량 저감 효과는 Table 5와 같다.

Watershed_1과 Watershed_3의 다발형 식생수로관의 유사저감 효과는 대조구 대비 각각 7.71%와 1.09%로 유사저감 효과는 미비하였다. 하지만 소유역의 전체 면적 대비 공법을 적용한 경작지의 면적이 작았기 때문에 유사저감 효과가 적은 것으로 생각된다. 하지만 경작지의 면적의 비율이 높은 Watershed_2에서는 소유역 면적의 11%에 식생매트 투수롤과 다발형 식생수로관을 설치함으로써 각각 17.6, 18.6%로 유사 저감효과가 상대적으로 높게 나타났다.

해안면 유역 전체 면적에서 공법이 적용되지 않았을 때 모의기간동안의 유사량은 41,585,71ton이였며, 기존의 플륨관과 투수롤을 적용하였을 때 유사량은 각각 39,180.71 ton, 37,509.74 ton로 5.7%, 9.8%의 유사저감 효과를 보였다. 모의기간동안 개발된 식생매트 투수롤과 다발형 식생수로관을 적용시켰을 때 유사량은 각각 36,934.04 ton, 36,673.19 ton으로 11.2%, 11.8%의 유사저감 효과를 보였다(Fig. 10).

토양유실저감 효과 및 유사저감 효과 분석 결과를 통해 고랭지 밭이 있는 유역에 새로 개발된 식생매트 투수롤 및 다발형 식생수로관을 설치한다면 토양유실 및 유역내 유사량을 감소시킬 수 있을 것이라 사료된다.

Table 4. Area of agriculture and BMPs applied

Watershed	Area (km^2)	Agricultural Area (km^2/%)	Application catchment area (km^2/%)
Watershed_1	22.03	5.68 / 25.78	2.57 / 11.67
Watershed_2	27.09	7.87 / 29.01	3.23 / 11.92
Watershed_3	6.58	0.75 / 11.40	0.21 / 3.19

Table 5. Effects on Sediment Reduction of BMPs

Watershed		Control field	Conventional flume pipe	Infiltration roll	Vegetation mat with infiltration roll	Multiple pipe
Watershed_1	Weight of sediment discharge (ton)	20956.25	20164.61	19614.63	19425.52	19339.60
	Weight of sediment reduction (ton)	-	0	0	0	0
	Sediment reduction ratio (%)	-	3.78	6.40	7.30	7.71
Watershed_2	Weight of sediment discharge (ton)	15552.62	14139.44	13156.45	12818.17	12664.27
	Weight of sediment reduction (ton)	-	-3.78	-6.40	-7.30	-7.71
	Sediment reduction ratio (%)		9.09	15.41	17.58	18.57
Watershed_3	Weight of sediment discharge (ton)	3714.67	3694.82	3680.82	3676.38	3674.15
	Weight of sediment reduction (ton)	-	-9.09	-15.41	-17.58	-18.57
	Sediment reduction ratio (%)	-	0.53	0.91	1.03	1.09
Haean Basin	Weight of sediment discharge (ton)	41586.71	39180.71	37509.74	36934.04	36673.19
	Weight of sediment reduction (ton)	-	-0.53	-0.91	-1.03	-1.09
	Sediment reduction ratio (%)	-	5.79	9.80	11.19	11.82

4. Conclusion

본 연구에서는 실측 유량 및 유사량 자료를 이용하여 최적관리기법에 대한 USLE P값을 산정하였으며, 고랭지 농업지역인 해안면 유역의 경작지를 대상으로 대조구와 기존의 2가지 최적관리기법 및 새로 개발된 2가지의 최적관리기법의 USLE P값을 적용시켜 토양유실저감 효과와 유사저감 효과를 모의하였다.

모의기간 내 시험포의 경사도와 비슷한 경작지(경사도: 7%~13%)를 대상으로 각 최적관리기법을 적용하였을 때 식색매트 투수롤과 다발형 식생수로관은 대조구에 비해 55%, 59%의 토양유실저감 효과를 보였다. 기존의 공법인 플륨관과 투수롤은 대조구에 비해 29%, 49%의 토양유실저감 효과를 보였다. 새로 개발된 식생매트 투수롤과 다발형 식생수로관을 토양유실이 많이 발생되는 경작지에 적용하였을 때 기존의 최적관리기법 보다 높은 토양유실저감 효과를 확인 할 수 있었다. 해안면 전체 지역의 6.3%인 경작지를 관리함으로써 경작지에서 발생되는 토양유실을 59% 이상, 유역전체에서 발생되는 유사의 11.8% 이상을 저감할 수 있다면 자원으로써의 표토를 보전을 할 수 있으며, 수질 또한 개선시킬 수 있을 것이라 사료된다. 본 연구에서 제시한 식생매트 투수롤과 다발형 식생수로관을 고랭지 농업이 성행하는 유역에 설치한다면 강우 시 토양유실저감 효과가 클 것이라 기대된다. 또한 본 연구의 결과는 해안면 지역과 같이 많은 양의 토양유실이 발생되는 다른 지역의 토양유실저감 대책을 수립하는데 필요한 기초 자료로 이용 될 수 있다고 사료된다. 하지만 본 연구에서 사용된 모니터링 자료만으로 USLE P값을 산정하기에는 몇 가지 한계점이 존재한다. 본 연구에 사용된 실측 유량 및 유사 자료는 2012년 여름 이후에 측정된 자료이므로, 봄철 강우 이벤트에 대한 영향은 연구에서 사용된 자료에 포함되지 않았다.

최적관리기법의 시험포의 경사도도 역시 10%내외인 단일 경사도에서 측정된 자료만을 사용하였기 때문에, 다른 경사도에 대한 적용에는 한계점이 있을 것으로 생각된다. 시험포에 사용된 작물 역시 옥수수인 단일 작물만을 이용한 모니터링 결과 값을 이용하였다. 고랭지 지역에는 다양한 작물들이 재배되고 같은 양과 같은 강도의 비가 온다고 해도 유실되는 토양의 양이 다르기 때문에 단일 경사도와 작물로만으로 USLE P값을 산정하기에는 한계점이 존재한다. 따라서 최적관리기법을 고려하기 위한 USLE P 산정을 위해 봄철 강우사상을 포함한 장기적인 모니터링과 다양한 작물과 경사도에서 측정된 모니터링에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국환경산업기술원 GAIA Peroject (No:2012000540017) "식생조절 방안/공학적 저감 공법/토지개발사업 토양침식 저감 공법 개발"의 연구비와 2014년도 강원대학교 학술연구조성비지원(과제번호: 120141393)으로 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

Arnold, J. G. (1992). *Spatial Scale Variability in Model Development and Parameterization*, ph.D. Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN.

Arnold, J. G. and Srinivasan, R. (1994). Integration of a BASIN-SCALE Water Quality Model with GIS. Water Resources Bulletin, *Journal of the American Water Resources Association*, 30(3), pp. 453-462.

Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., and Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment: part I: model development, *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.

Heo, S. G., Kim, N. W., Park, Y. S., Kim, J. G., Kim, S. J., Ahn, J. H., Kim, K. S., and Lim, K. J. (2008). Evaluation of Effects on SWAT Simulated Hydrology and Sediment Behaviors of SWAT Watershed Delineation using SWAT ArcView GIS Extension Patch, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(2), pp. 147-155. [Korean Literature]

Jang, J. H. and Ahn, J. H. (2012). Assessing Future Change Impact on Hydrologic and Water Quality Components in Nakdong River Basin, *Journal of Korea Water Resources Association*, 45(11), pp. 1121-1130. [Korean Literature]

Jang, W. S., Park, Y. S., Choi, J. D., Kim, J. G., Shin, M. H., Ryu, J. C., Kang, H, W., and Lim, K. J. (2010). Analysis of Soil Erosion Reduction Effect of Rice Straw Mat by the SWAT Model, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 52(3), pp. 97-104. [Korean Literature]

John. T., Seo, B., Kim, I., Arnhold, S., Shope, C., and Park, S., (2011). *Spatial setting of the TERRECO project in the soyang lake watershed of gangwon-do and the haean catchment of yanggu-gun*, 2011 TERRECO Science Conference.

Jun, M. S. (2007). *A device for reducing muddy water in the watershed of Soyang Dam*, Gangwon Development Research Institute, Chuncheon Gangwon, pp. 131-140. [Korean Literature]

Jung, C. G., Park, J. Y., Lee, H. J., Choi, J. D., and Kim, S. J. (2012). HSPF Modeling for Identifying Runoff Reduction Effect of Nonpoint Source Pollution by Rice Straw Mulching on Upland Crops, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(4), pp. 1-8. [Korean Literature]

Kangwon National University. (2012). *Development of soil erosion reduction techniques with vegetation control and engineering method, and for environment-friendly urban land development*, Kangwon National University. [Korean Literature]

Kim, J. G., Lim, K. J., Park, Y. S., Heo, S. G., Park, J. H., Ahn, J. H., Kim, K. S., and Choi, J. D. (2007). The Effect of Slope-based Curve Mumber Adjustment on Direct Runoff Estimation by L-THIA, *Journal of Korea Society on Water Environment*, 23(6), pp. 897-905. [Korean Literature]

Kim, J. G., Park, Y. S., Jang, W. S., Yoo, D. S., Kim, K. S., Choi, J. D., and Lim, K. J. (2008) Analysis of Soil Erosion and Sediment Yield Comparison with various DEM Cell Size Using the SWAT ArcView GIS Extension Patch, *Journal of Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, 15(2), pp. 7-14. [Korean Literature]

Kim, J. G., Park, Y. S., Kim, N. W., Chung, I. M., Jang, W. S., Park, J. H., Moon, J. P., and Lim, K. J. (2008). Development

and Evaluation of SWAT Topographic Feature Extraction Error (STOPFEE) Fix Module from Low Resolution DEM, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(4), pp. 488-498. [Korean Literature]

Kim, J. G., Park, Y. S., Yoo, D. S., Kim, N. W., Engel, B. A., Kim, S. J., Kim, K. S., and Lim, K. J. (2009). Development of a SWAT Patch for Better Estimation of Sediment Yield in Steep Sloping Watersheds, *Journal of the American Water Resources Association*, 45(4), pp. 963-972.

Kum, D. H., Jang, C. H., Shin, M. H., Choi, J. D., Kim, B. C., Jeong, G. C., Won, C. H., and Lim, K. J. (2012). Determination of Model Parameters of Surface Cover Materials in Evaluation of Sediment Reduction and Its Effects at Watershed Scale using SWAT, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 28(6), pp. 923-932. [Korean Literature]

Lee, J. W., Eom, J. S., Kim, B. C., Jang, W. S., Ryu, J. C., Kang, H. W., Kim, K. S., and Lim, K. J. (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), pp. 37-45. [Korean Literature]

Lee, J. M., Jung, Y. H., Park, Y. S., Kang, H. W., Lim, K. J., and Kim, H. S. (2014). Assessment of Future Climate Change Impact on Groundwater recharge, Baseflow and Sediment in Steep Sloping Watershed, *Journal of Wetlands Research*, 16(2), pp. 173-185. [Korean Literature]

Lee, J. H., Shim, E. J., Lee, Y. K., and Kim, T. W. (2012). A study on the Estimation of Soil Erosion Quantity Using USLE in the Upper Region of ManKyoung River Basin, *Korean Wetlands Society*, 14(3), pp. 317-328. [Korean Literature]

Ministry of Environment (MOE). (2001). *A Study on the Conservation of Surface Soil and Erosion Control*, M035885, Ministry Of Environment (MOE), pp. 2-59. [Korean Literature]

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principal, *Journal of Hydrology*, 10(3), pp. 282-290.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2005a). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005*, USDA, ARS, Temple, Texas, pp. 1-647.

Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., and Williams, J. R. (2005b). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual Version 2005*, USDA, ARS, Temple, Texas, pp. 1-662.

Park, E. J. (2008). *The Status of Soil Exposure and Management Practices for Soil Conservation in Urban Watersheds*, 2008-06, Gyeonggi Research Institute, pp. 35-40. [Korean Literature]

Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., and McFarland, A. M. S. (1997). Using APEX to identify alternative practices for animal waste management, *ASAE International Meeting*, Paper 97-2209, pp. 1-7.

Seo, J. H., Park, J. Y., and Song, D. Y. (2005). Effect of Cover Crop Hairy Vetch on Prevention of Soil Erosion and Reduction of Nitrogen Fertilization in Sloped Upland, *Journal of Korean Society of Soil and Fertilizer*, 38(3), pp. 134-141. [Korean Literature]

Yoo, D. S., Kim, K. S., Jang, W. S., Jun, M. S., Yang, J. E., Kim, S. C., Ahn, J. H., and Lim, K. J. (2008). Evaluation of Sediment Yield using Area-weighted Measured Slope and Slope Length at HeaAn Myeon Watershed, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 24(5), pp. 569-580. [Korean Literature]