

토양유실 저감을 위한 지표피복 저감효과 변수 결정 및 SWAT 모형 유역단위 효과 분석

금동혁 · 장춘화 · 신민환 · 최중대 · 김범철* · 정교철** · 원철희 · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과

*강원대학교 환경과학과

**안동대학교 지구환경과학과

Determination of Model Parameters of Surface Cover Materials in Evaluation of Sediment Reduction and Its Effects at Watershed Scale using SWAT

Donghyuk Kum · Chun Hwa Jang · Min Hwan Shin · Joong-dae Choi · Bomchul Kim* · Gyo-Cheol Jeong** · Chul Hee Won · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

*Department of Environmental science, Kangwon National University

**Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

(Received 25 June 2012, Revised 20 November 2012, Accepted 20 November 2012)

Abstract

The purpose of this study was to determine parameters of surface cover materials and evaluation the effects on runoff and sediment reductions with rice straw mat with PAM at watershed scale using the SWAT model. In this study, 1) regression equation of CN for rice straw mat + PAM using SCS curve number method was developed, 2) the USLE P factor, being able to reflect simulation of rice straw mat + PAM in the agricultural field, was estimated for various slope scenarios with VFSMOD-w. Then regression equation for CN and USLE P factor were used as input data in the SWAT model. Assuming rice straw mat + PAM is applied to radish and potato fields, occupying 24% of agricultural fields at the study watershed. Result of direct runoff without rice straw mat + PAM was 65,964,368 m³, with rice straw mat + PAM, direct runoff was 65,637,336 m³, 327,031.8 m³ reductions compared without it. Also, result of sediment without rice straw mat + PAM was 163,531 ton, with rice straw mat + PAM, sediment was 84,779 ton, 78,752 ton reduction compared without it. This analysis showed that about 48% sediment reductions would be expected with rice straw mat + PAM. As shown in this study, rice straw mat + PAM would be used as an efficient site-specific BMPs to reduce runoff and sediment discharge from field.

keywords : BMPs, Direct runoff, PAM, Rice straw mat, Sediment, SWAT model, VFSMOD-w

1. 서론

우리나라에서는 매년 6월에서 9월중에 태풍 및 집중호우 등으로 인한 풍수해 자연재난이 매년 반복 발생되고 있다. 특히 국내는 지형 및 다양한 조건으로 인해 계절별 강수량의 편차가 매우 커, 연평균 강수의 70%가 여름철에 집중되어 있으며, 인천을 기준으로 보면 여름철 강수강도가 다른 계절에 비해 최소 2배에서 최대 6배 이상 높은 것으로 나타나고 있다(NIMR, 2010). 이처럼 여름철 강수가 집중되고 강우강도가 높은 경향을 보이는 국내의 기후적 특성으로 인해 경사가 급하고 고랭지 농경지가 많이 분포되어 있는 소양강댐 유역은 매년 집중호우 발생 시 지표 유출량이 많아 토양유실 발생량이 크며 고탁수가 큰 문제가 발생 되고

있다(Cho et al., 2010; Park, et al., 2010). 더욱이 토양유실로 인해 하천으로 유입되는 미세 토양입자는 수생태계를 파괴하는 주된 요인으로 알려져 있다(Seo et al., 2011). 이에 환경부에서는 한강수계의 수질 및 수생태계에 심각한 영향을 미칠 수 있는 소양강댐 유역을 비점오염원 특별 관리지역으로 지정하였고, 정부에서는 7년(2007~2013년)간 15개 사업에 총 3,839억 원의 사업비를 투자하여 법정부적 차원의 종합 탁수 저감대책을 마련하였다(Han Basin Commission, 2008). 탁수 저감 대책으로는 초생대, 녹비작물, 발두령, 빗물우회수로, 지표피복, 계단식 논과 같은 최적관리기법(Best Management Practices: BMPs)들이 제안되어 왔으며, 국내에서는 BMPs 중 농경지에서 발생하는 유출수를 감소시키고, 토양유실을 방지할 수 있는 지표피복에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 국외에서는 지표피복재로 볏짚을 이용하면 토양으로 침투량이 증가하며(Ghawi et al., 1986), 강우강도 증가에 따른 직접유출과 토양유실 감

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

소에 매우 효율적인 것으로 나타나고 있다(Lal, 1976). 또한 폴리머 소재(Polyacrylamide : PAM)를 이용한 토양유실 방지 연구도 활발히 진행되고 있다(Entry et al., 2002). 국내에서는 Shin et al. (2009)의 벚짚거적을 이용한 토양 유실과 표면 유출량 저감 방안 연구결과에 의하면 경사지 밭 표면에 벚짚을 적용할 경우 유사량은 약 67%, 직접유출량은 약 46% 이상의 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, Choi et al. (2010)의 고랭지 밭 토양유실 방지를 위한 PAM의 현장 적용성 평가 연구에서는 경사지 밭에 PAM 처리시 토양 입단의 안정성이 최대 11% 증가하고, 토양유실량은 최대 41%가 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 Shin et al. (2011)과 Won et al. (2011)의 토양유실 저감을 위한 지표 피복재에 관한 연구에서는 개별적으로 벚짚거적이나 PAM을 이용한 지표피복 방안도 뛰어난 효과가 있으나 벚짚과 PAM을 조합할 경우 그 효과가 더욱 증대 될 것으로 예상하고, 그 효과를 인공강우를 이용한 실내실험과 야외실험을 통해 분석하였다. 실내의 실험 결과 이러한 지표피복은 토양유실량과 직접유출량 감소뿐만 아니라 현장 토양의 침투능을 높게 유지하는데 효과가 있는 것으로 나타났다. 이는 벚짚과 PAM이 지표의 피복률을 높이고, 강우에너지를 상쇄시켜 토양의 침투능을 높게 유지하며, 토양표면의 Seal 형성을 줄이고, 토양 입자간의 결합력을 증가시켜 유출수, 유사 및 SS 농도를 저감시키는 것으로 분석하였다. 탁수로 인해 다양한 사회·경제·환경적 문제가 발생하는 유역에서 이러한 탁수 저감 공법을 적용하기 위한 예산을 마련하기 위해서는 먼저 공법 적용에 따라 예상되는 탁수 저감효과를 분석해야 한다. 이를 위해 다양한 모니터링 연구와 병행하여 지난 1990년대 이후 유역 유출-토양유실 모형 연구가 활발히 이용되고 있다. 특히 다양한 유역 모형 중 국내에서는 Soil and Water Assessment Tool (SWAT) 모형이 널리 활용되고 있는데, SWAT 모형은 유역에서의 강수에 따른 유출 및 비점오염의 발생 및 거동을 시·공간적으로 분석할 수 있기 때문에 널리 이용되고 있다. Jang et al. (2010) 벚짚매트의 유역 단위 토양유실 저감효과 분석을 위하여 VFSMOD-w 모형을 이용하여 벚짚매트의 USLE P 인자를 결정하고 SWAT모형에 적용하여 저감효과를 분석하였다. VFSMOD-w 모형(Muñoz-Carpena and Parsons)은 Muñoz-Carpena et al. (1999), Xiao et al. (2012) 등의 초생대 토양유실 저감효과 분석에 활용된 모형으로 MUSLE 기반 토양유실량을 산정한다. 그리고 Lee et al. (2011)은 SWAT 모형을 이용하여 만대천 유역의 비점오염 예측과 초생대 수질 개선 효과 분석, Lee et al. (2012)은 SWAT 모형을 홍천강 유역에 적용하여 BMPs 적용에 따른 토양유실 저감효과를 분석하였다. SWAT모형을 이용한 BMP 효과분석 연구 결과를 살펴보면 유출량 저감효과가 아닌 유사량 저감효과에 중점을 두고 분석이 이루어졌다. 현장 실험을 통한 모니터링 결과에서는 BMPs 적용에 따라 토양유실 저감효과는 직접유출량 저감효과에 기인한 것으로 분석되었으며, 실제 여름철 집중 강우시 직접 유출량 감소는 홍수나 하천 범람과 같은 자연재해를 감소시키는 효과도

있을 것이다.

이에 본 연구의 목적은 1) 벚짚매트+PAM 적용 시험포에서의 유출량 저감효과를 평가하기 위한 유출곡선지수(Curve Number: CN)를 산정하고, 2) 단일 강우사상을 고려하여 필지단위 토양유실량을 산정 할 수 있는 모형을 이용하여 벚짚매트+PAM에 관련된 유사 매개변수 추정, 3) 추정된 매개변수를 SWAT 모형에 적용하여 유역단위 유출/유사 저감 효과를 분석하는데 있다.

2. 연구방법

Won et al. (2011)의 벚짚거적과 토양개량제를 이용한 강우유출 모의 연구에서는 실내인공강우 30 mm/hr조건과 경사도 10%, 20% 조건에서 벚짚거적과 PAM을 이용해 지표를 피복하였을 경우 직접유출과 유사 저감효과를 분석하였다. 경사도 10% 조건에서는 대조구(나지)에 비해 직접유출 92%, 유사 99.1%, 경사도 20% 조건에서는 직접유출 80% 이상, 유사 95.6~96.5% 저감되는 것으로 나타났다. 그리고 Shin et al. (2011)의 경사지 밭에서 발생하는 토양유실 저감을 위한 피복재 적용 연구에서는 30~40 mm/hr 강우 조건에서 경사도 28%에서 벚짚거적과 PAM의 직접유출과 유사 저감효과를 분석하였다. 직접유출은 4.7~25.8%, 유사는 85.9~100% 저감되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 Shin et al. (2011)과 Won et al. (2011)의 연구결과를 토대로 벚짚매트 + PAM의 지표피복에 따른 유역단위 저감효과를 분석하였다.

벚짚매트 + PAM 적용에 따른 직접유출량 및 유사 저감 효과 분석을 위한 연구방법을 간략히 보면 Fig. 1과 같이 1) 직접유출량 관련 인자 산정을 위해 SCS 유출곡선지법을 이용하여 시험포에서의 각 시나리오별 강우/유출 관계에 따른 CN을 계산하여 경사도에 따른 벚짚매트 + PAM의 처리시 시험포 CN 회귀식을 산정하고, 2) 토양유실량 산정에 많이 활용되는 USLE 공식의 경작인자 방법인 P 인자를 산정하였다. USLE P 인자 산정을 위해 시험포의 유출/유사량 산정에 적합한 VFSMOD-w 모형을 이용하였으며, 이 모형에 시나리오별 실측 유출/유사 자료를 적용하여 벚짚매트 + PAM 적용 전 USLE P인자를 1로 가정, 적용 전 상태의 토양침식성 인자 K를 산정한 후, 이를 입력값으로 하여 벚짚매트 + PAM 적용후의 USLE P인자를 산정하였다. 3) 이렇게 산정된 벚짚매트 + PAM의 CN 회귀식과 USLE P인자를 유역단위 유출/유사 거동 특성 모의에 가장 많이 이용되는 SWAT에 적용하여 직접유출/유사 저감효과를 분석을 실시하였다(Fig. 1).

2.1. 연구지역 선정

지표피복 BMPs 적용에 따른 유역단위 유출/유사 저감효과를 분석하기 위하여 강원도 양구군 해안면을 연구지역으로 선정하였다. 해안면은 환경부에서 지정한 한강수계 탁수 우선관리지역으로서 유역면적은 60.42 km²이며, 양구군 전체 면적의 8.8%를 차지하고 있고 있는 타원형 형태의 분지이다(Fig. 2). 이 지역의 평균경사는 11°이나 상부는 20°

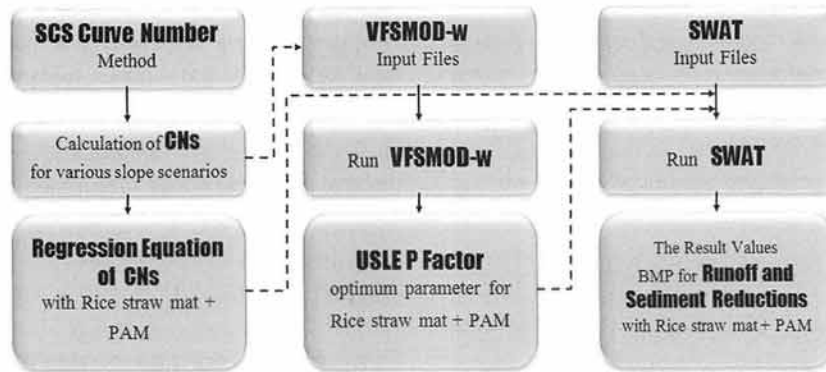


Fig. 1. Modeling processes to evaluate effects on runoff and sediment reductions with rice straw mat + PAM.

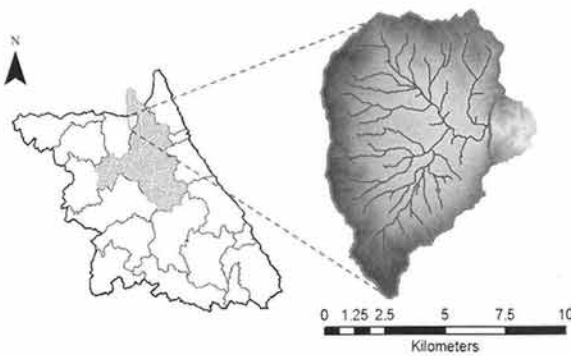


Fig. 2. Location of the Hae-an myeon watershed.

부는 5°로서 분지의 하부를 제외하고는 경사가 매우 급하며 전형적인 고랭지 농업이 주를 이루고 있다(Yoo et al., 2008). 특히 해안면의 고랭지 밭은 경사가 심한 산기슭에 위치한 데다 빗물에 잘 씻겨 나가는 마사토의 특성 때문에 장마철 마다 흙탕물 발생과 함께 농경지 유실로 이어지는 등 악순환이 반복되고 있다.

2.2. SCS 유출곡선지수법

SCS 유출곡선지수법은 강우 사상에 대한 유효우량을 산정하기 위해 경험적 방법으로 개발되었다. Andrews (1954)는 미국 토양보존국(U.S. Soil Conservation Service: SCS)의 여러 시험유역의 강우·유출 및 기타 자료를 바탕으로 직접유출량 Q와 총 강우량 P의 관계를 강우의 초기손실 Ia와 최대잠재보유수량 S의 함수관계를 식 (1)과 같이 제시하였고, SCS에서는 여러 시험유역에 대한 지속적인 연구와 분석을 통하여 초기 손실과 최대잠재보유수량과의 관계를 식 (2)와 같은 경험공식으로 제시하였다(SCS, 1972).

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \tag{1}$$

$$I_a = 0.2S \tag{2}$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 강우-유출모형에 주로 이용되며 최대 잠재 보유수량 S로부터 직접유출량을 쉽게 산정할

수 있는 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)} \tag{3}$$

그리고 최대잠재보유수량 S와 유출곡선지수 CN은 식 (4)(5)와 같은 관계로 표현된다.

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \tag{4}$$

$$CN = \frac{25,400}{S + 254} \tag{5}$$

CN은 0에서 100 사이의 값을 가지며, 미세측 유역인 경우 토양의 종류, 수문학적 조건, 토지피복유형, 토지피복처리상태, 선행합수조건 등을 고려하여 결정된다. 만일 강우-유출 자료가 있는 계측 유역은 식 (3)로부터 유도된 식 (6)을 이용하여 최대잠재보유수량 S를 구하고 이를 식 (7)에 대입하여 CN을 산정할 수 있다. 이에 본 연구에서는 Shin et al. (2011)과 Won et al. (2011)에 의해 선행 연구된 경사도별 인공강우를 이용한 실내/외 빗짚매트+PAM 실험의 실측 자료를 이용하였다. 실내의 실험은 경사도 10%, 20%, 28%에서 이루어졌으며, 10%, 20%는 실내실험, 28%는 실외실험이 실시되었다. 각 실험에서의 설계 강우와 유출량 결과를 식 (7)에 대입하여 경사도별 CN을 산정할 것이며, 이를 통해 빗짚매트+PAM 적용 시험포의 CN 값을 결정하여 유역단위 효과 평가에 활용하였다.

$$S = 5P + 10Q - \sqrt{Q^2 + 1.25QP} \tag{6}$$

$$CN = \frac{25,400}{254 + 5P + 10Q - \sqrt{Q^2 + 1.25QP}} \tag{7}$$

2.3. VFSMOD-w 모형을 이용한 유사 매개변수 산정

2.3.1. VFSMOD-w 모형을 이용한 USLE P 산정

VFSMOD-w 모형은 field-scale 모형으로서 발생원과 초생대로의 유출과 침투 및 유사 저감 효율을 모의한다. 초

생태의 저감효율을 산정하기에 앞서 발생원에서의 유출량과 유사량을 산정하는데, 유출량은 설계 강우에 의한 단위도법을 이용하며, 유사량은 식 (8)과 같은 MUSLE 공식을 이용한다.

$$A = 9.05(V \times Q_p)^{0.56} \times K \times L \times S \times C \times P \quad (8)$$

여기서 V와 Q_p는 유출량(m³)과 침투유량(m³/s)으로 유출량 산정시 산정된 유출량과 침투유량이 활용되고, A는 단일호우에 의한 유사량(kg/m²), K는 토양특성인자, L은 사면길이인자, S는 사면경사인자, C는 식생피복인자, P는 토양보존인자이다.

본 연구에서 벧짚매트 + PAM의 유사 저감 효율을 산정하기 위한 SWAT모형 입력 자료 중 경작 방법 인자인 USLE P 인자는 Won et al. (2011)과 Shin et al. (2011)에 의해 선행 연구된 경사도별 인공강우를 이용한 실내/외 실험 분석 결과와 소규모의 필지에서 강우사상에 따른 유출 및 유사 발생량을 산정 할 수 있는 VFSSMOD-w 모형을 이용하여 산정하였다. 대조군인 벧짚매트 + PAM 적용 전 상태의 USLE P 인자를 1로 가정하여 각 실험조건에 따른 토양침식성 인자 USLE K를 산정하고 이렇게 산정된 USLE K 인자와 CN을 입력자료로 활용하여 시행착오법을 이용하여 모형과 시험포의 실측 유사량 값을 비교하면서 최소 근사값일 때의 USLE P 인자를 벧짚매트 + PAM의 USEL P 인자로 산정하였다.

2.3.2. VFSSMOD-w 모형 입력자료

VFSSMOD-w 모형은 크게 두 부분으로 나뉘어져 발생원에서의 유출과 유사 특성을 모의하는 UH Engine과 발생원으로부터 초생대로 유입되어 저감되는 유출/유사량을 모의하는 VFS Engine으로 구성되어 있다(Fig. 3). 발생원에서의 유출/유사 발생 특성을 모의하기 위한 입력자료에는 강우사상과 유출 관련 인자(강우량, 강우 지속시간, 유출지수곡선 CN, Storm Type), 발생원의 지형 조건(경사장, 경사도,

면적) 그리고 발생원의 토양 관련 인자(토양특성, 토양종류, 유기물 함량, 토양 입자 크기)로 분류할 수 있다. 초생대에 관한 입력자료는 식생 관련 인자(식생 간격, 길이, 조도계수)가 있다. 본 연구에서 USLE P인자를 산정하기 위해 사용한 UH Engine 관련 입력자료로 Won et al. (2011)의 실내 인공강우 실험 조건인 면적 1 m², 토양도 Loamy Sand, 경사장 1 m, 경사도 10%, 20%와 Shin et al. (2011)의 실외 인공강우 실험 조건인 면적 220 m², 토양도 Loamy Sand, 경사장 22 m, 경사도 28%을 이용하였다.

2.4. SWAT 모형을 이용한 유출/유사 모의

2.4.1. SWAT 모형 개요

SWAT모형은 미국 농무부 농업연구소(United States Department of Agriculture Agricultural Research Service, USDA ARS)에 의해 개발된 유역단위(Watershed Scale) 모형으로서 넓고 복잡한 유역에서의 토지이용 및 토지관리 상태, 토양에 따른 수질과 유사 및 농업화학물질 등의 거동 특성을 모의하는 모형이다(Arnold, 1992; Arnold and Srinivasan, 1994; Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2005, 2006). 특히 SWAT 모형은 수문 및 수질을 시/공간적으로 분석할 수 있기 때문에 유출 및 비점오염의 발생 및 거동 특성에 많이 이용되고 있으며(Jeong and Kim, 2008; Park et al., 2010; Ye et al., 2009), 경작 형태나 기후·식생 등의 변화에 따른 수질의 상대적 변화 또는 정량화할 수 있는 것이 특징이다.

2.4.2. SWAT 모형 입력자료

SWAT 모형으로 수문 및 수질을 시/공간적으로 분석하기 위해서 시간적으로 변화하는 기상자료(일 강수량, 기온, 풍속, 일조량, 상대습도)와 공간적으로 다르게 분포하는 토지 이용현황, 토양속성, 그리고 지형자료 등이 필요하다. 본 연구에서는 양구 해안면에 대한 정확한 시/공간적 분석을 위해 독일 Bayreuth University(Department of plant ecology, 2009)에서 양구군 해안면에 설치한 12개의 강우 관측지점

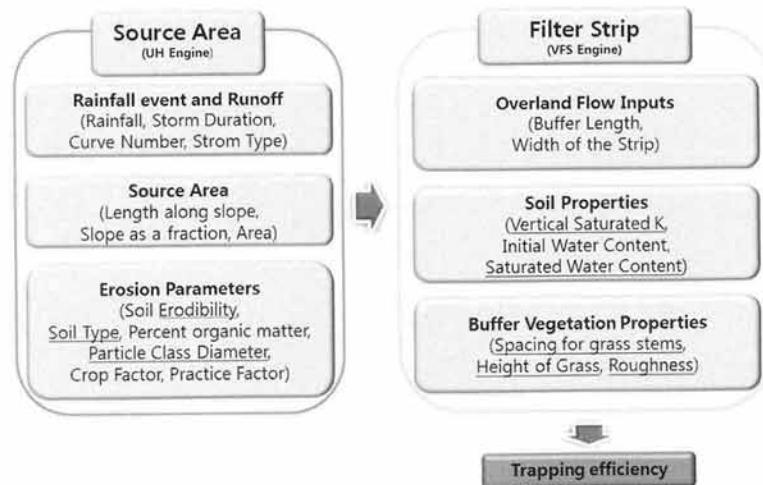


Fig. 3. Overview of VFSSMOD-w (Muñoz-Carpena and Parsons, 2005).

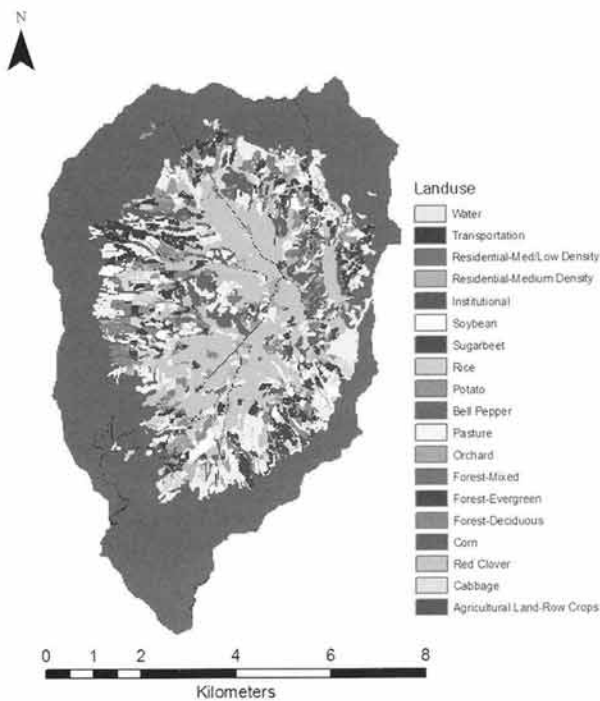


Fig. 4. Landuse in 2009.

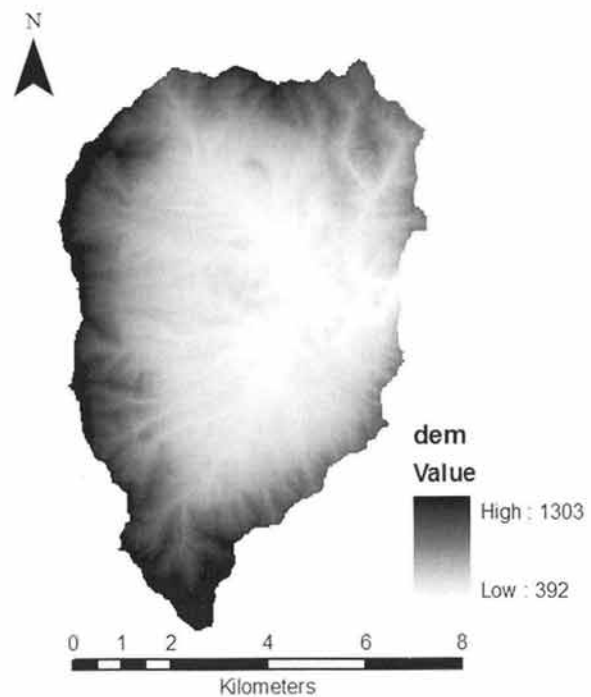


Fig. 6. DEM.

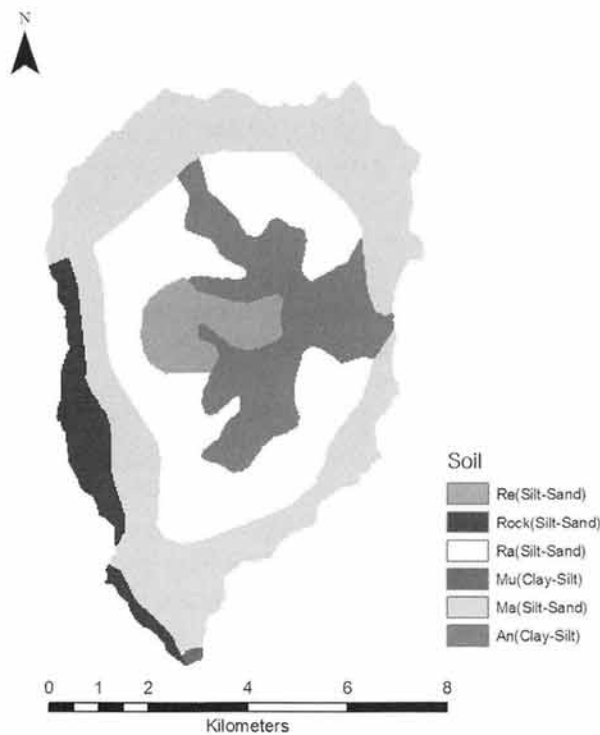


Fig. 5. Major soil types.

의 일강수 자료와 2009년에 조사한 실측 작물지도를 이용하여 토지이용도를 구축하였다(Fig. 4). 토양도는 농촌진흥청 농업과학기술원에서 제공하는 개략토양도(1:50,000)를 사용하였으며(Fig. 5), 국립지리원에서 제공해 주는 수치지도(1:5,000)를 이용하여 Digital Elevation Model(DEM)을 구축하였다(Fig. 6).

2.4.3. SWAT 모형 직접유출량/유사 보정

모의기간은 2007년 1월 1일 ~ 2010년 8월 31일로 SWAT 모형의 보정은 양구군 해안면 물골교에서 독일 Bayreuth University(Department of plant ecology, 2009)에서 2009년 7~10월 사이 실측 조사된 직접유출량 및 유사 자료를 이용하였다. SWAT모형에서 유사량 산정시 MUSLE 공식이 활용되고 있고, MUSLE공식은 USLE 공식과 다르게 R 계수 대신 토사유출량 지배인자와 유출에너지로 나타내는 인자를 이용한다. 토사유출량 지배인자와 유출에너지인자는 유출량과 침투유출량을 이용하여 산정되는데, 유사 매개변수 보정시 이와 관련된 매개변수를 이용하여 보정하게 된다면 직접유출량 산정에 또 다른 오차가 발생하게 된다. 이에 매개변수 조정은 시행착오법을 이용하여 우선 직접유출량에 관련된 매개변수(CN2, ALPHA_BF, SOL_AWC, SOL_Z)를 조정하고 다음 유사에 관련된 매개변수(USLE_C, USLE_K)를 보정하여, 보정 결과가 유출/유사에 서로 영향을 주지 않도록 하였다. 그리고 SWAT 모형의 적용성 평가는 결정계수(R^2)와 유효지수(NSE)를 사용하였고, Ramanarayanan et al. (1977)은 R^2 가 0.5 이상이고 NSE가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것으로 제안하였다. 또한 Donigan and Love (2003)은 일반적인 모형 효율의 범위와 신뢰구간을 Table 1과 같이 제시하였다.

Table 1. Criteria for evaluating model performance

Evaluation	Poor	Fair	Good	Very good
NSE	< 0.6	0.60 ~ 0.70	0.70 ~ 0.80	> 0.80

2.4.4. BMPs 적용에 따른 직접유출량/유사저감 효과 분석

SWAT 모형을 이용한 직접유출량/유사 저감 효과 분석시

Table 2. Various landuse 2009 at Hae-an myeon watershed

Landuse	FRST	CLVR	WATR	PAST	URMD	RICE	UTRN	SOYB	CABG	FRSE
Area (%)	53.23	3.186	0.05	10.05	0.556	14.44	0.693	2.515	2.413	0.058
Landuse	FRSD	UNIS	AGRR	URML	CORN	ORCD	PEPR	POTA	SGBT	-
Area (%)	0.558	0.163	1.772	0.319	0.817	1.457	0.305	3.815	3.606	-

벚짚매트 + PAM의 적용은 해안면의 토지이용(Table 2) 중 작물 재배시 표토가 그대로 드러나 강우 발생시 비탈진 밭에서의 토양유실 현상이 심각한 감자와 무 밭을 대상으로 하였다. 해안면의 전체 토지이용 중 농경지는 약 31%를 차지하고 있으며, 이중 감자와 무 밭은 약 24%를 차지하고 있다.

SWAT 모형의 TablesIn 폴더 내의 .MDB 파일에는 다양한 입력변수들이 위치하는데, 이 중 mgt 파일에 경작, 추수, 관개, 농약 등과 관련된 입력 변수들이 있다. mgt 파일의 다양한 입력 변수 중 CN과 경작방법인자에 해당되는 USLE P 인자를 본 연구에서 산정한 값들로 입력하여 직접유출량/유사저감 효과를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유출곡선지수 산정 결과

다수의 유출 관련 연구에서 경사도를 고려하지 않고 토지 이용과 수문학적 토양그룹을 고려하여 CN을 결정하였다. 하지만 기존에 정의되어 있는 CN은 미국의 중서부 지역과 같이 경사도 5% 미만인 지역에서의 유출량 선정에 적합하기에 Williams (1995)는 경사가 급한 지역에서의 정확한 직접 유출량 모의를 위해 경사도에 따른 CN 산정 방식을 제시하였다. 본 연구에서도 벚짚매트 + PAM에 대한 CN 분석 결과 각 경사도별(10%, 20%, 28%) 74, 80, 93으로 나타나, 경사도에 따라 CN이 증가함을 보였다. 또한 Fig. 7에서 보이는 바와 같이 경사도가 커질수록 CN의 증가 폭이 커지기 때문에 벚짚매트 + PAM의 CN에 대한 지수식(식 (9))을 산정하였고, 결정계수는 0.95를 보였다. 하지만 경사도가 35% 이상일 경우 CN은 100이 넘게 된다. 이에 경사도에 따른 CN이 100 이상이 될 경우 CN은 최대 99로 고정한다.

$$Curve\ Number(Rice\ strawmat + PAM) = 64.586e^{(1.243 \times Slope(fraction))} \quad (9)$$

3.2. USLE P인자 산정 결과

벚짚매트 + PAM의 USLE P 인자를 산정하기 위해 대조군인 벚짚매트 + PAM 적용 전 상태에서의 USLE P인자를

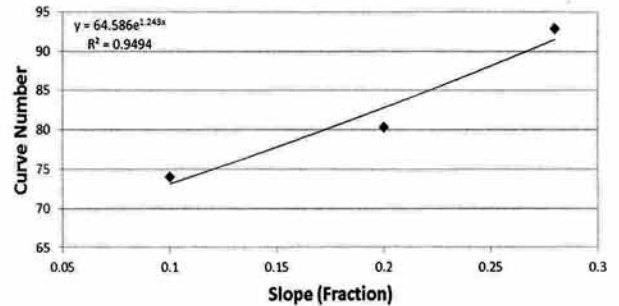


Fig. 7. Regression equation of Curve Number for various slope values.

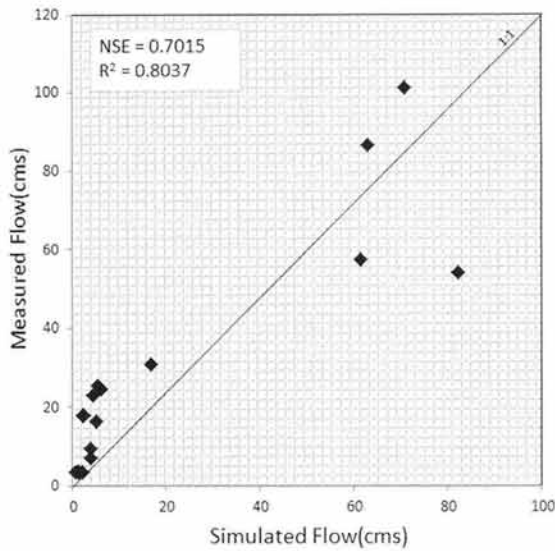
1로 가정하고 USLE K 인자를 우선 산정하였다. 산정 결과 실내 인공 강우 실험(경사도 10%, 20%)에서는 USLE K 인자는 0.012, 0.022, 실외 인공 강우 실험(경사도 28%)에서는 0.03으로 산정되었다. 특히 실외 인공 강우 실험이 시행된 연구 지역의 토양통(예산)에 따른 USLE K 인자(NIER, 2011)와 VFSMOD-w모형을 이용하여 산정한 USLE K 인자가 같은 결과 값을 나타내, VFSMOD-w모형을 이용한 USLE P인자 산정에도 큰 문제가 없을 것으로 판단되었다. 이렇게 산정된 USLE K 인자를 이용하여 벚짚매트 + PAM 적용 후의 경사도별 USLE P 인자를 산정한 결과 0.08 ~ 0.12의 범위로 경사도별 큰 차이가 없기 때문에 벚짚매트 + PAM 적용에 따른 USLE P 인자는 평균 0.1 산정하였다(Table 3).

3.3. 직접유출량 및 유사 보정 결과

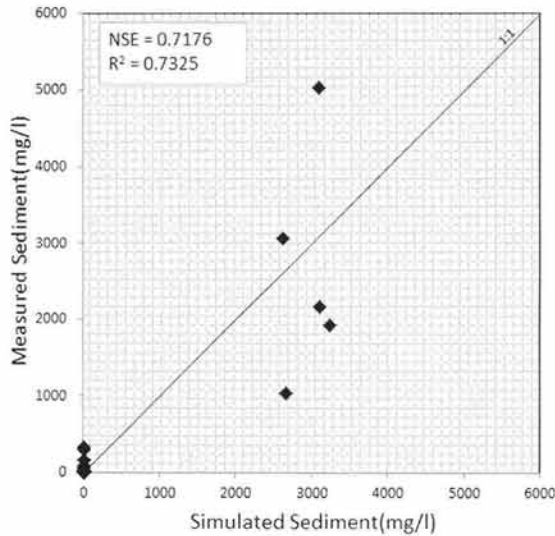
양구군 해안면의 물골교에서 조사된 2009년 7월부터 10월까지의 실측 직접유출량에 대하여 SWAT 모형을 보정하였다. 보정 결과 NSE = 0.70, R² = 0.80로 나타났다(Fig. 8(a)), 직접유출량 보정 후 보정된 매개변수를 이용하여 유사 실측치와 예측치를 보정한 결과 Fig. 8(b)와 같이 NSE = 0.72, R² = 0.73으로 나타났다. 보정 결과 직접유출량 유사 모두 Ramanarayanan et al. (1977)이 제시한 기준에 충족되었고, Donigian and Love(2003)가 제시한 기준에는 Good에 해당되는 매우 좋은 결과를 보였다. Table 4는 본 연구에서 SWAT 모형 보정 시 사용된 매개변수를 나타낸다.

Table 3. Comparison of observed and simulated data to estimate USLE P factor with rice straw mat + PAM

	Slope (%)	Observed Sediment (g)	Simulated Sediment (g)	USLE_K	USLE_P
w/o Rice straw mat + PAM	10	8.9	8.9	0.012	1
	20	28.9	30	0.022	1
	28	322,300	328,600	0.030	1
w/ Rice straw mat + PAM	10	0.079	0.058	0.012	0.080
	20	1.278	1.678	0.022	0.117
	28	28,500	28,900	0.030	0.092



(a) Flow



(b) Sediment

Fig. 8. Scatter plots of simulated and measured flow and sediment.

3.4. 최적관리기법 적용에 따른 저감 효과

보정된 매개변수와 2009년 토지이용 및 기상자료를 이용하여 벧짚매트 + PAM의 적용 전/후의 직접유출량/유사 저감 효과 분석한 결과 직접유출량은 적용 전 65,964,368 m³에서 적용 후 65,637,336 m³으로 2009년 한 해 총 327,031.8 m³의 직접유출량 저감효과를 보였다. 특히 Fig. 9(a)에서 보이

는 바와 같이 집중강우 및 태풍이 빈번히 발생하는 여름철 직접유출량 저감효과 큰 것으로 나타났다. 이는 강우강도가 큰 여름철 강우 사상에 대해 유출수 양을 감소시켜 유출수에 의해 발생하는 토양유실의 방지 효과가 클 것으로 판단된다. 그리고 유사 저감효과 분석 결과 유사량은 적용 전 163,531 ton에서 적용 후 84,779 ton으로 총 78,752.31 ton의 유사 저감효과를 보였다(Fig. 9(b)). 이는 2009년 한 해 약 48%의 유사 저감 효과가 있는 것으로 분석된 것으로 감자와 무 재배지에서 지표피복으로 인한 토양표면의 Seal 형성 차단과 수용성 고분자물질 PAM이 토양 입자간의 결합력을 증가시켜 토양 침투능 증대 효과, 유출수 감소 및 토양유실 감소로 이어진 결과로 사려된다.

4. 결론

본 연구에서는 Shin et al. (2011)과 Won et al. (2011)의 벧짚매트 + PAM의 인공강우를 이용한 실내/외 실험 결과 값을 이용하여 유역단위의 직접유출량 및 유사 저감효과를 분석하였다. 유역 단위 저감 효과를 분석하기 위해, 벧짚매트 + PAM 관련 매개변수를 산정하였다. 우선 SCS 유출곡선지수법을 이용한 CN은 경사가 커질수록 증가하는 경향을 보였으며 경사도별 분석된 CN을 이용하여 식 (9)와 같은 회귀식을 산정하였다. 또한 VFSMOD-w 모형을 이용하여 벧짚매트 + PAM에 의한 유사저감 효과를 SWAT 모형에서 고려할 수 있도록 USLE P 인자를 산정하였다. 산정 결과 벧짚매트 + PAM의 USLE P 인자는 경사도에 따라 0.08 ~ 0.12의 범위를 보였으며, 본 연구에서는 평균값인 0.1을 USLE P인자로 산정하였다.

이렇게 산정된 CN 회귀식과 USLE P인자를 SWAT모형에 적용하여 유량 및 유사 저감 효과를 분석하였다. 해안면의 SWAT 모형 보정 결과 유량과 유사 모두 NSE 0.7 이상으로 SWAT 모형이 해안면의 유량/유사 거동 특성을 잘 모의하는 것으로 판단된다. 2009년 한 해 327,031.8 ton의 유량 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 유사는 약 48%의 저감효과를 보였다. 이는 본 연구에서 벧짚매트 + PAM을 적용한 감자와 무 밭 면적이 전체 해안면의 토지이용 중 약 7%, 농경지 중에서는 약 24%만을 차지하는데, 약 48% 저감효과를 보이는 것은 해안면의 다양한 토지이용 중 감자와 무 밭의 토양유실이 다른 토지이용에 비해 심각했던 것을 알 수 있었다. 특히 강우가 집중되는 여름철 저감효과가 큰 것으로 분석되었는데, 이는 벧짚매트가 지표를 피복함으로써 지표 피복률을 높여 강우 타격에너지에 의한 토양표

Table 4. The parameters used in calibration

Parameter	Description	Variation Method	Value
CN2	SCS runoff curve number for moisture condition II	Multiply by Value	1.2
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	Multiply by Value	1.5
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	Multiply by Value	0.5
SOL_Z	Depth from soil surface to bottom of layer	Add by Value	400
USLE_C	USLE equation Cropping and Management (C) factor	Multiply by Value	2
USLE_K	USLE equation soil erodibility (K) factor	Replace by Value	0.65

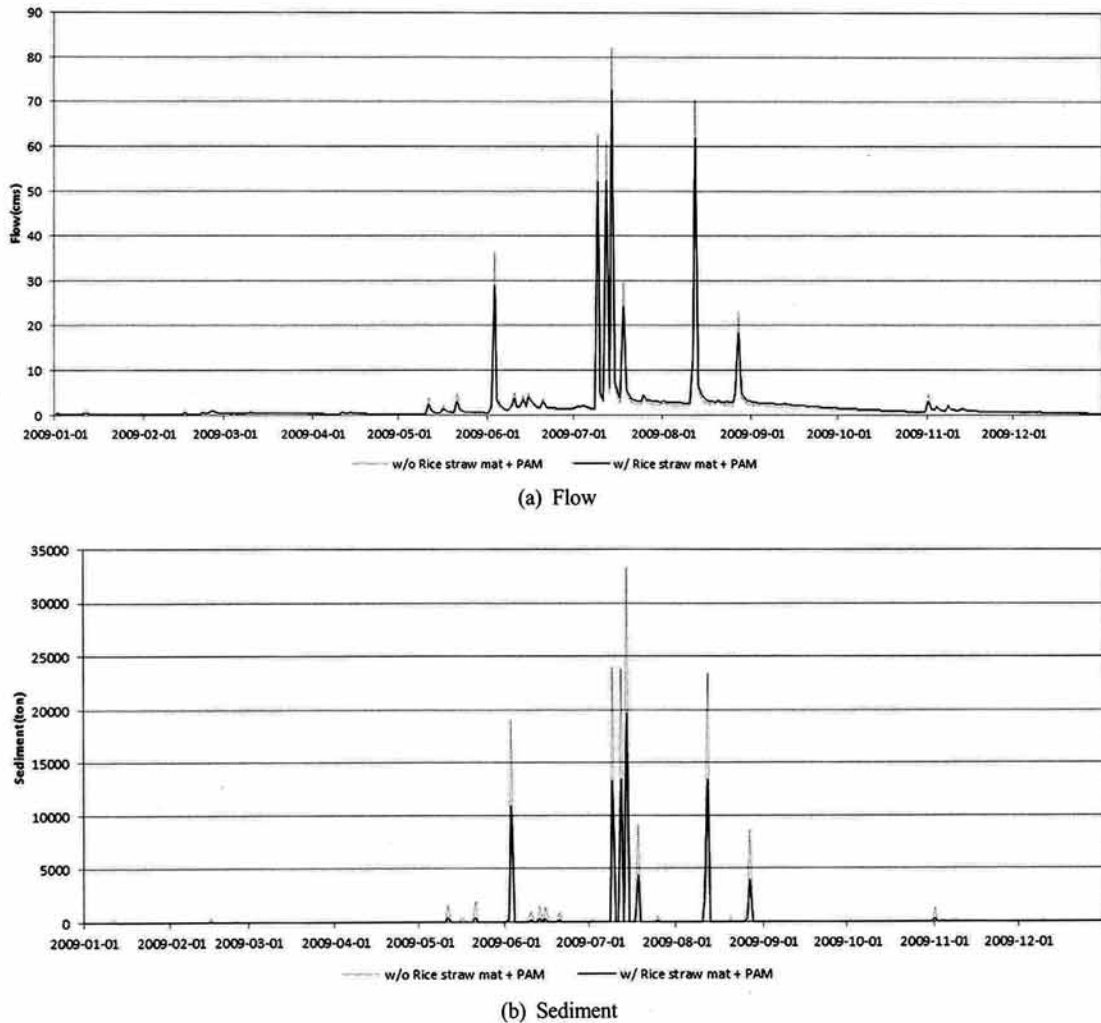


Fig. 9. Flow and Sediment Reduction w/ and w/o rice straw mat + PAM.

면의 Seal 형성을 차단하여 토양의 침투능을 높게 유지하고, PAM이 토양 입자간의 결합력을 증가시켜 강우 및 유출수에 의한 토양 입자 이탈을 감소시킴으로서 유사 발생을 저감시키는 것으로 판단된다. 벧짚매트와 PAM 각각의 효과가 조합되어 상대적 효과가 증가된 것으로 사려된다.

이처럼 벧짚매트와 PAM이 조합된 지표피복재를 이용하여 유량 및 유사량을 저감한다면 장마철 하천범람 등의 자연재해를 줄이며, 과도한 토양유실로 인한 고탁수의 문제를 예방하여 수생태 및 수질 관리에 큰 도움이 될 것이다. 또한 토양의 침투능이 높아져 토양 수분량이 증대되어 생산량 증대 효과가 있을 것으로 판단된다. 벧짚매트 + PAM을 지표피복재로 이용할 경우 유량 및 유사 저감효과에 큰 도움이 되는 것이 본 연구와 선행연구들을 통해 나타났지만 지표피복재로 사용되는 PAM은 자연상태에서 분해가 잘 되지 않고 축적되는 문제가 있다. 이에 최근 들어 PAM 관련 생분해/광분해 연구가 진행되고 있지만 자연 친화적인 BMPs 적용을 위해서는 더욱더 활발한 연구와 지원이 필요하리라 판단된다.

그리고 본 연구는 고랭지 농업지역의 토양유실 저감 방안 연구를 위해 조성된 경사도 10%, 20%, 28%의 시험포

에서 실측된 유출과 유사 자료를 활용하여 지표피복 저감 효과 변수를 결정하고 유역단위 저감효과를 분석하였다. 결정된 매개변수는 경사지의 시험포에서 실측된 자료를 활용하였기 때문에 다른 고랭지 농업지역의 토양유실 저감효과 분석시 이용되기에 적합하리라 사려된다.

사 사

본 연구는 토양지하수오염방지기술개발사업 식생조절방안/공학적저감공법/토지개발사업토양침식저감공법 개발(C100 8680-01-01(120120292))과 2011년 한국연구재단의(No.2011-0032202) 연구비지원을 받아 수행하게 되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

References

- Andrews, R. G. (1954). *The Use of Relative Infiltration Indices in Computing Runoff*. Soil Conservation Service, Fort Worth, Texas.
- Arnold, J. G. (1992). *Spatial Scale Variability in Model Develop-*

- ment 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, 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 American Water Resources Association*, 34(1), pp. 73-89.
- Cho H. R., Ha, S. K., Hyun, S. H., Hur, S. O., Han, K. H., Hong, S. Y., Jeon, S. H., Kim, E. J., and Lee, D. S. (2010). Effect of Red Pepper Canopy Coverages on Soil Loss and Runoff from Sloped Land with Different Transplanting Dates, *Korean Journal of Soil Science & Fertilizer*, 43(3), pp. 260-267. [Korean Literature]
- Choi, Y. B., Choi, B. S., Kim, S. W., Lee, S. S., and Ok, Y. S. (2010). Effects of Polyacrylamide and Biopolymer on Soil Erosion and Crop Productivity in Sloping Uplands: A Field Experiment, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 32(11), pp. 1024-1029. [Korean Literature]
- Department of plant ecology. (2009). *Department Report. Land Use Data at Hae-an, Mandae Watershed in Korea*, Bayreuth University.
- Donigan, A. S. and Love, J. T. (2003). *Sediment calibration procedures and guidelines for watershed modeling, WEFTMDL, WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM*, Chicago, Illinois, USA, pp. 1-20.
- Entry, J. A., Sojka, R. E., Watwood, M., and Ross, C. (2002). Polyacrylamide preparations for protection of water quality threatened by agricultural runoff contaminants, *Environmental Pollution*, 120, pp. 191-200.
- Ghawi, I. and Battikhi, A. (1986). Water melon production under mulch and trickle irrigation in the Jordan valley, *Journal of Agronomy and Crop Science*, 157, pp. 145-155.
- Han Basin Commission. (2008). *Han-kang-soo-gye tak-soo-ju-kam-da-chaek ma-ryeon-eul wi-han yeon-gu*, Han Basin Commission, pp. 152-153. [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]
- Jeong, J. K. and Kim, H. G. (2008). Simulation of the Reduction Effect of Soil Loss Using SWAT Model, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 17(4), pp. 243-253. [Korean Literature]
- Lal, R. (1976). *Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria II effect of mulch rates*, *Geoderma*, 16(5), pp. 377-387.
- Lee, J. M., Ryu, J. C., Kang, H. W., Kang, H. S., Kum, D. H., Jang, C. H., Choi, J. D., and Lim, K. J. (2012). Evaluation of SWAT Flow and Sediment Estimation and Effects of Soil Erosion Best Management Practices, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 54(1), pp. 99-108. [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]
- Muñoz-Carpena, R., Parsons, J. E. and Wendell G, J. (1999). *Modeling Hydrology and Sediment Transport in Vegetative Filter Strips*, *Journal of Hydrology*, 214, pp. 111-129.
- Muñoz-Carpena, R. and Parsons, J. E. (2005). *Vegetative Filter Strips Hydrology and Sediment Transport Modeling System, Model Document & User's Manual*, pp. 1-173.
- 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.
- NIER. (2011). *Gi-hu-byeon-hwa dae-bi to-yang-ja-won bo-jeon yeon-gu*, National institute of environmental research, pp. 89-94. [Korean Literature]
- NIMR. (2010). *Gi-hu-byeon-hwa lee-hae-ha-gi. 8. climate change of Incheon*, National institute of meteorological research, p. 14. [Korean Literature]
- Park, C. W., Sonn, Y. K., Zhang, Y. S., Hong, S. Y., Hyun B. K., Song, K. C., Ha, S. K., and Moon, Y. H. (2010). Soil Erosion Risk Assessment in the Upper Han River Basin Using Spatial Soil Erosion Map, *Korean Journal of Soil Science & Fertilizer*, 43(6), pp. 826-836. [Korean Literature]
- Park, M. J., Shin, H. J., Park, G. A., and Kim, S. J. (2010). Assessment of future hydrological behavior of Soyganggang Dam watershed using SWAT, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 30(4), pp. 337-346. [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, S. D., Lee, J. Y., and Ha, S. R. (2011). Effect of Hydroelectric Power Plant Discharge on the Turbidity Distribution in Dae-Cheong Dam Reservoir, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 20(2), pp. 225-232. [Korean Literature]
- Shin, M. H., Won, C. H., Choi, Y. H., Seo, J. Y., Lee, J. W., Lim, K. J., and Choi, J. D. (2009). Simulation of Field Soil Loss by Artificial Rainfall Simulator -By Varying Rainfall Intensity, Surface Condition and Slope, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(5), pp. 785-791. [Korean Literature]
- Shin, M. H., Won, C. H., Park, W. J., Choi, Y. H., Shin, J. Y., Lim, K. J., and Choi, J. D. (2011). Surface Cover Application for Reduction of Runoff and Sediment Discharge from Sloping Fields, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(6), pp. 129-136. [Korean Literature]
- Soil Conservation Service. (1972). *National Engineering Handbook, Section4, Hydrology*, Chap.10, pp. 1-79.
- Williams, J. R. (1995). Chapter 25. The EPIC Model, In *Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources*

- Publications, Highlands Ranch, CO*, pp. 909-1000.
- Won, C. H., Shin, M. H., Choi, Y. H., Shin, J. Y., Park, W. J., and Choi, J. D. (2011). Applications of Surface Cover Materials for Reduction of Soil Erosion, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 27(6), pp. 848-854. [Korean Literature]
- Xiao, B., Wang, Q., Wang, H., Wu, J., and Yu, D. (2012). The Effects of Grass Hedges and Micro-basins on Reducing Soil and Water Loss in Temperate Regions: A Case Study of Northern China, *Soil and Tillage Research*, 122, pp. 22-35.
- Ye, L., Chung, S. W., Lee, H. S., Yoon, S. W., and Jeong, H. Y. (2009). Sensitivity Analysis of Climate Factors on Runoff and Soil Losses in Daecheong Reservoir Watershed using SWAT, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 25(1), pp. 7-17. [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]