

WEPP 모형을 이용한 우회수로 및 식생수로의 유출 및 토사유출 저감 평가

Evaluation of Runoff and Sediment Yield Reduction with Diversion Ditch and Vegetated Swale Using WEPP Model

최재완 / 신동석** / 김익재*** / 임경재****

Choi, Jaewan / Shin, Dongseok / Kim, Ik Jae / Lim, Kyoung Jae

Abstract

It has been known that soil erosion caused by water has been a serious problem worldwide. Thus various modeling techniques for conservationists, farmers, and other land users have been developed and utilized to estimate effects of numerous site-specific Best Management Practices on soil erosion reduction. The physical process-based WEPP model would provide both temporal and spatial estimates of soil loss within small watersheds and for hillslope profiles within small watersheds. Thus, the WEPP watershed version was applied to study watershed, located at Jawoon-ri, Gangwon to simulate diversion ditch and vegetated swale with detailed input data set. The sediment yield and runoff reduction rates reduced by 5.8% and 29.6% with diversion ditch and 9.8% and 14.5% with vegetated swale. With vegetated diversion ditch, runoff and sediment yield could be reduced by 11.8% and 40.4%, respectively. Based on the results obtained in this study, the WEPP model would be an useful tool to measure runoff and sediment yield reduction and establish site-specific sediment reduction best management plan.

Keywords : diversion ditch, runoff, sediment yield, vegetated swale, WEPP

요지

전 세계적으로 토사유출은 심각한 문제로 알려져 있다. 환경관리자, 농부 및 다른 토지소유자들을 위해 다양한 모델링 테크닉이 개발되어왔고, 토양유실 저감을 위해 다양한 site-specific 최적관리기법의 효용을 산정하여 활용하였다. 물리적기반인 WEPP 모형은 시 공간적으로 작은 유역과 필지에서 발생하는 토양유실을 산정할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 WEPP watershed version을 이용하여 강원도 홍천군 자운리에 위치한 연구지역에 빗물 우회수로와 식생수로를 적용하였다. 우회수로 적용시 유출량과 토사유출량은 각각 5.8%, 29.6% 저감되었으며, 식생수로 적용시 각각 9.8%, 14.5% 저감되었다. 식생수로와 우회수로를 혼합한 식생우회수로는 유출량과 토사유출량이 각각 11.8%, 40.4% 저감되었다. 본 연구의 결과와 같이 WEPP 모형은 유출량과 토사유출량 저감효과를 산정하고, site-specific 토사유출저감 최적관리기법 수립에

* 국립환경과학원 수질총량연구과 전문위원 (e-mail: chlwodhk@dreamwiz.com)
Research Fellow, Water Pollution Load Management Research Division, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Kyunseo-dong, Seo-gu, Incheon-si 404-708, Korea.

** 국립환경과학원 수질총량연구과 연구관
Senior Researcher, Water Pollution Load Management Research Division, National Institute of Environmental Research, Environmental Research Complex, Kyunseo-dong, Seo-gu, Incheon 404-708, Korea.

*** 한국환경정책평가연구원 실장
Director, Division of water and environment, Korea Environment Institute, 290 Jirheungro, Eunpyeong-gu, Seoul, Korea.

**** 교신저자, 강원대학교 지역건설공학과 교수 (e-mail:kjlim@kangwon.ac.kr)
Corresponding Author, Professor, Department of Regional Infrastructures Engrg., Kangwon National University, 1 Kangwondaehakgil, Chuncheon-si, Gangwon-do 200-701, Korea.

유출할 것으로 판단된다.

핵심용어: 우회수로, 식생수로, 유출량, 토사유출, WEPP

1. 서 론

고령지 농업은 1990년대 이후 흙탕물 발생의 원인으로 지적되어 왔고, 최근 집중호우 등으로 소양호 흙탕물 사태가 장기화되면서 고령지 농업이 흙탕물 발생의 주범으로 부각되었다. 토사유출은 농업의 현대화 및 기계화에 의해 경작지가 넓어지고 긴이랑 형태의 경작지 조성, 토양개량 목적이 아닌 연작피해 및 작물의 상품성을 높이기 위한 재도, 하천 및 구거변의 식생대나 밭두렁, 수로 등을 훼손하여 경작지를 조성하는 등 주로 인간의 경작활동으로 인해 발생되고 있다(강원도청, 2010). 특히, 홍천군 자운지구, 인제군 가야지구 및 서화지구, 양구군 해안지구 등의 고령지 농업 지구를 포함하고 있는 소양댐은 매년 고택수 문제가 되풀이되고 있다(전만식, 2007). 정부에서는 '수질 및 수생태계 보전에 관한 법률' 제 54조 제1항에 의거 소양호 유역을 비점오염관리지역으로 지정하여 2008~2017년까지 1,650억 원을 들여 흙탕물 저감시설을 설치하고 있다(강원도청, 2010). 그러나 흙탕물 저감시설의 효과는 정량적으로 예측하기가 어려우며, 현재 탁수저감을 위한 연구 보다는 오염부하나 원단위 산정을 위한 연구가 주로 수행되고 있다(김건하 등, 2003; 여중현과 김건하, 2005; 원철희 등, 2009).

유역 내 토사유출현황 및 저감시설의 효율을 평가하기 위해서는 토지이용별, 지형별, 작물별, 시간별 장기 모니터링을 수행하는 것이 가장 정확한 방법이지만, 큰 유역에서의 장기 모니터링은 수행하기 어려운 경우도 많으며, 인건비와 장비 등 많은 비용이 요구된다. 또한 정부에서는 수질오염총량관리를 위한 개발 사업으로서 비점오염원 최적관리지점, 비점오염원관리지역 평가 등 비점오염원관리를 위해 다양한 지침 및 계획을 수립하고 있으나, 실제로 사·군에서 비점오염원 저감시설에 대한 효율을 정량적으로 산정하기 어려운 실정이다. 이는 저감시설의 저감률 산정에 대한 기초 데이터의 부족 때문이다. 따라서 유역 내 토양유실 발생과 저감시설을 정확히 평가할 수 있는 시 공간적 평가 시스템이 필요하다.

그동안 토사유출량의 산정을 위하여 범용토양손실공식(Universal Soil Loss Equation, USLE; Wischmeier and Smith, 1987), USLE 기반 Sediment Assessment Tool

for Effective Erosion Control (SATEEC; Lim et al., 2005; Park et al., 2010), 그리고 범용토양손실공식을 수정한 개정범용토양손실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE; Renard et al., 1997)이 전 세계적으로 널리 이용되어 왔다. 또한 단일강우에 따른 토사량을 산정하기 위한 수정 범용토양손실 공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE; Williams, 1975)이 개발되어 널리 이용되고 있으나, site-specific 토사유출 저감에 사용하기에는 적절하지 못하였다. 미국 농무성 농업연구센터(USDA) Agricultural Research Service(ARS), Forest Service, NRCS 연구자들에 의해서 개발된 물리적 기반 모델인 WEPP(Water Erosion Prediction Project; Flanagan and Livingston, 1995) 모형은 USLE와 달리 연속적인 모의가 가능하며 다양한 토사유출 저감방식을 적용할 수 있다(최재환 등, 2009).

따라서 본 연구의 목표는 연구대상 유역에 대해 적용성이 평가된 WEPP 모형을 이용하여 우회수로와 식생수로 적용에 따른 토사유출 저감효과를 정량적으로 평가하여, 향후 비슷한 환경을 가진 유역에서의 토사 유출 저감 최적관리 기법 적용 및 효율 평가의 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 지역의 선정 및 모니터링

홍천군 내면 지역의 인구는 365가구 1,215명이고, 경작면적은 1,234필지, 4,646,938 m²이다. 주요 작물은 무, 배추, 감자인데, 통상 무와 감자를 연작하고 있었다. 홍천군 내면 지역은 해발 650~700m 고지대에 위치해 있으며, 연평균 강우량은 1,163mm로서 여름철에 많은 강우가 집중되는 특성을 나타내고 있다(최재환 등, 2009). 밭 토양은 모래가 많은 사질 토양이고 농작물의 품질을 높이기 위해서 2~3년에 1회 성토(30~60cm)를 실시하고 있었다. 본 연구에서는 홍천군 내면 자운 4리, 8,485m²의 고령지 밭을 연구지역으로 선정하였으며 현근우 등(2008)에 의해서 측정된 유출 및 토양유실량 자료를 활용하여 WEPP 모형의 정확성을 평가하였다. 현근우 등(2008)은 대상지에 깊이 60cm 폭 60cm의 콘크리트 배수로로 설치하였고(Fig. 1), 유출수와 함께 유실되는 토양유실량을 측정하기 위하여 11.3m² 용량

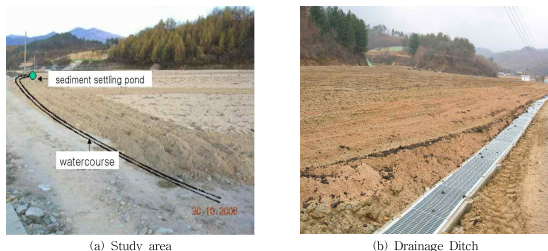


Fig. 1. Study area and drainage ditch installed at the edge of the fields (Hyun et al., 2008)

Table 1. Rainfall, Surface Runoff and Sediment Yield for 2007 (Hyun et al., 2008)

Date	Rainfall (mm)	Runoff volume (m ³)	Total sediment (ton)
7.19	40.5	13.0	0.10
8.1~8.2	65.0	164.0	1.95
8.4~8.5	93.0	168.0	2.45
8.8	67.0	141.1	2.05
8.9	137.0	596.0	11.68
8.10	38.0	80.1	1.21
8.19	34.5	52.0	0.48
8.27	52.0	153.0	1.16
9.6	27.0	37.3	0.17
9.14~9.15	92.0	265.0	4.00
9.18	52.0	175.0	1.71

Table 2. Rainfall, Surface Runoff and Sediment Yield for 2008 (Hyun et al., 2008)

Date	Rainfall (mm)	Runoff volume (m ³)	Total sediment (ton)
6.18	41.5	21.0	0.50
7.13	23.0	14.0	0.45
7.15~16	29.0	30.0	0.74
7.19~20	75.0	88.0	2.01
7.24	215.0	649.0	11.06
8.2	24.0	16.0	0.24
8.3	27.0	58.0	0.91
8.12	31.0	32.0	0.33
8.18	39.5	67.0	0.90
8.22	77.0	119.0	1.96

의 침사지 2기를 설치하였다. 밭 경사도는 5.5%로서 자운 4리 일대를 대표할 수 있는 경사도이다. Tables 1 and 2는 현근우 등 (2008)이 모니터링한 강우사상별 유출 및 토사 유출량이다.

2.2 WEPP 모형의 기본 이론

2.2.1 유출관련 이론

WEPP 모형은 세류와 세류사이에서의 유출을 구분하며, 면상류보다는 세류의 흐름과 세류의 수리를 바탕으로 전단응력을 계산한다 (Page, 1988). WEPP 모형에서 유출은 침투와 지표유출로 구분할 수 있는데 침투는 비정상 간헐 강우 (unsteady intermittent rainfall)를 위한 Green-Ampt Mein-Larson (GAML) 모형을 이용해 계산하며, 지표유출은 강우강도가 침투율을 초과할 경우 발생하며 Kinematic wave 방정식을 사용하여 계산한다.

침투량은 Green-Ampt Mein-Larson (GAML)식 (Mein and Larson, 1973)을 비정상상태 강우와 담수개시시간을 적용할 수 있도록 Chu (1978)가 수정한 식을 사용하며, 평균 침투율 (f_t)은 Eq. (1)과 같다.

$$f_t = k_c \left(1 + \frac{N_s}{F}\right) \quad (1)$$

여기서 f_t 는 침투율 (mm/h), k_c 는 유효포화수리전도도 (cm/h), N_s 는 유효 매트릭포텐셜 (cm), F 는 누가침투량 (cm)을 나타낸다.

침투율을 초과하는 경우 Eq. (2)와 같이 Kinematic wave 방정식을 사용하여 계산한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = V \quad (2)$$

여기서 h 는 흐름의 수심 (m), q 는 평면의 단위폭당 유량 (cm²/h), x 는 평면의 정점으로부터의 거리 (m), 그리고 V 는 초과강우량 (cm/h)이다.

2.2.2 토사유출관련 이론

WEPP 모형의 토양유실부모형에서 사용하는 침식능 (erodibility)은 Lafen et al. (1987)과 Simanton et al.

(1987)에 의한 팽뿔위한 현장 조사 연구들을 기반으로 개발하였다. 경사지에서의 토양유실은 유사 연속성 (sediment continuity), 분리 (detachment), 퇴적 (deposition), 세류에서의 전단응력 (shear stress in rill), 유사운송능 (sediment transport capacity) 등을 고려하였다.

경사지에서 세류내의 유사거동을 Eq. (3)과 같은 정상상태 유사방정식을 이용하여 사용하였다.

$$\frac{dG}{dx} = D_j + D_r \quad (3)$$

여기서 x 는 경사거리 (m)이고, G 는 단위시간, 단위폭당 유사량 (kg/s m), D_r 는 세류침식에 의한 토양분리율 (세류간 유사전달률) (kg s⁻¹ m⁻²)이고, D_j 는 세류침식률 (kg s⁻¹ m⁻²)이다. 모형의 보정을 위하여 D_r , D_j 는 각 세류에 따라 계산되고, 그에 따라 G 는 단위 세류폭에 따라 계산된다. 각 세류에 따른 계산이 끝난 후 각 단위 면적당 토양유실량이 계산된다.

2.3 WEPP 모형 적용성 평가

현근우 등 (2008)의 연구에서 측정된 실측 유출 및 토사유출량을 이용하여 최재완 등 (2009)은 WEPP 모형의 정확성을 평가하였다. 최재완 등 (2009)는 세류 침식능, 세류간 침식능, 유효수리전도도, 한계 전단응력 (Table 3)과 같은 매개변수를 이용하여 보정하였고, 실측된 유출과 토사유출량을 이용하여 WEPP 모형의 정확성을 평가하였는데, 결과는 Figs. 2 and 3과 같다. Donigian and Love (2003)의 기준 (Table 4)에 의하면 WEPP 모형의 예측치가 실측치를 전반적으로 “좋은 (good)” 이상으로 평가하는 것으로 나타났다.

Table 3. Calibration Parameters for WEPP Model (Choi et al., 2009)

Calibrated parameters	Value
Interrill erodibility (kg s/m ⁴)	2.01e+7
Rill erodibility (s/m)	7.001e-4
Effective hydraulic conductivity (Pa)	04.091
Critical hydraulic shear stress (mm/h)	10

Table 4. Criteria for Evaluating Model Performance (Donigian and Love, 2003)

	Poor	Fair	Good	Very Good
Daily flows	<0.60	0.60~0.70	0.70~0.80	>0.80
Monthly flows	<0.65	0.65~0.75	0.75~0.85	>0.85

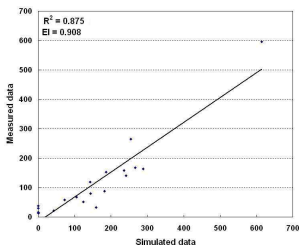


Fig. 2. R^2 and Nash-Sutcliffe of Runoff Estimation (Choi et al., 2009)

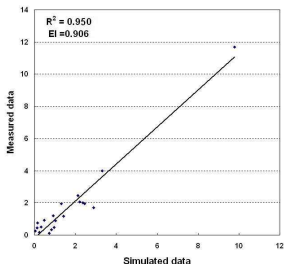


Fig. 3. R^2 and Nash-Sutcliffe of sediment estimation (Choi et al., 2009)



Fig. 4. Example of Diversion Ditch

2.4 WEPP 모형을 이용한 빗물우회수로 구축

고령지밭은 인근 산림의 빗물이 경작지로 유입되거나, 밭의 상부에서 하부로 갈수록 유출이 증가함에 따라 말단에서 토사발생량이 급증하게 된다. 이러한 프로세스에서 토사발생을 저감시키기 위해 주로 설치되는 시설이 빗물 우회수로이다. 빗물 우회수는 다른 비점오염저감 시설에 비해 가격이 저렴하고 설치지역에 제한을 받지 않아 많이 이용되고 있다. 강원도청(2007)은 빗물 우회수로의 사업효과가 크므로 소양호 비점오염원관리지역에서 다른 비점저감시설 보다 우선적으로 설치하고 있다. Fig. 4는 빗물 우회수로가 설치된 예시이다. 본 연구에서는 WEPP 모형을 이용하여 연구지역의 40m 지점에 우회수를 설치하여 토사유출 저감효과를 평가하였다 (Fig. 5).

2.5 WEPP 모형을 이용한 식생수로 구축

과거에는 자연적으로 형성된 물길 형태의 식생도랑, 측구 등이 존재했으나, 기계식 영농과 경작지를 확장하는 과정에서 대부분 훼손되어 이를 복원해야 할 곳이 많아지고 있다. 최근에는 콘크리트 수로를 신규 설치하여 수로 침식을 방지할 수 있었다. 그러나 고령지밭에서는 여전히 수로경비가 부족하고 농업활동 중 식생도랑의 식생이 제거되어 다량의 토사가 발생하고 있다. 본 연구에서는 최재완 등(2009)에 의해서 연구지역에 대해 정확성이 검 보정된 WEPP 모형의 Channel Management 기능을 이용하여 식생수로를 모의하였다. 식생수로는 건식(dry swale)과 습식(wet swale)으로 구분되는데 습식 식생수로는 습지의 조건을 갖추도록 설계되므로 WEPP 모형에서 구현하기에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 건식 식생수

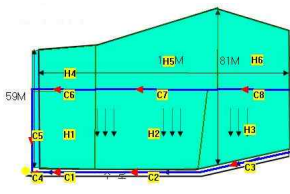


Fig. 5. Simulation of Diversion Ditch In WEPP Model

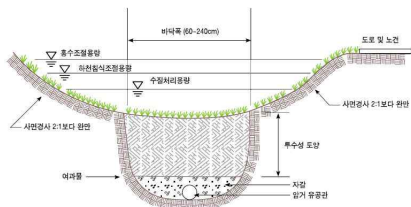


Fig. 6. Dry Swale Design (MOE, 2008)

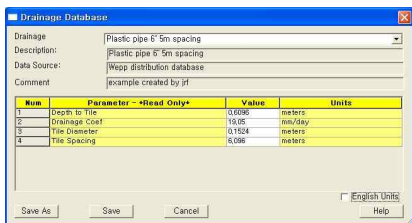


Fig. 7. Drainage Database Interface

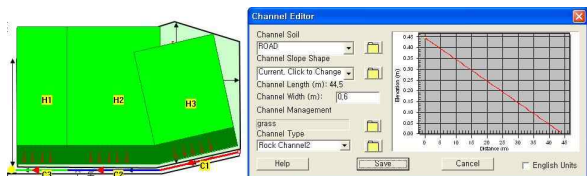


Fig. 8. Application of Vegetated Swale In Hillslope and Channel

로를 모의하였으므로 배수로를 설정하였다. Fig. 6은 환경부에서 제공하는 “비점오염저감시설의 설치 및 관리운영 매뉴얼 (환경부, 2008)”에서 제시된 건식 식생수로의 설계이다. 보통 건식 식생수로의 경우 48시간 이내에 배수되지 않으면 식생이 훼손되게 된다 (환경부, 2008). 따라서 본 연구에서는 암거유공관을 WEPP 모형에 적용하였다. 암

거유공관을 설정하는 방식은 Channel Management에서 Drainage Database 기능을 이용해 배수로를 추가하였다 (Fig. 7). 또한 Hillslope에 Break point 기능을 이용하여 5 m, 10 m로 구분한 후에 초지를 구성하여 토사유출시 퇴적이 발생하도록 하였다 (Fig. 8).

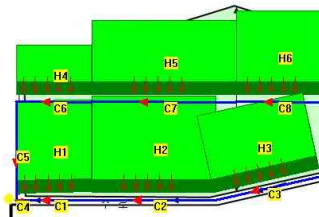


Fig. 9. Simulation of Diversion Ditch and Vegetated Swale in WEPP Model

2.6 WEPP 모형을 이용한 식생우회수로 구축

강원도청 (2010)은 소양호 비점오염원관리지역 관리대책 시행계획에서 우회수로 설치시 식생수로와 연계하여 설치하도록 권장하고 있다. 본 연구에서는 WEPP 모형을 이용하여 식생우회수로 효과를 모의하였는데, 이때 대상 지역에 총 8개의 수로와 6개의 경사지를 구축하는 것으로 분석하였다. 식생은 상부 (H4~H6)와 하부 (H1~H3)에 각각 5m를 적용하였고, 수로 (C1~C3, C6~C8)는 식생수로와 동일한 방식으로 적용하였다. 기존 Hillslope 3개와 Channel 3개로 구축된 WEPP 모형을 Hillslope 6개와 Channel 8개로 구성하여 식생우회수로를 구축한 것이다. 새로운 Hillslope과 Channel 구축 후 기존의 고령지발과 비교하여 토사유출 저감효과를 평가하였으며, 연간 퇴적률을 비교하였다 (Fig. 9).

3. 결과 및 고찰

3.1 WEPP 모형을 이용한 빗물우회수로 평가

연구지역에 대해서 검 보정된 WEPP 모형을 이용하여 빗물우회수로 효과를 모의한 결과 총 유출이 2,601.9m³, 토사유출이 20,905.2kg으로 나타났다. 총 유출은 우회수로를 적용하기 전보다 5.8% 저감되었으며, 총 토사유출은 29.6% 저감되었다. 우회수로는 유출 저감률이 크지 않았으나, 토사유출 저감률은 높은 것으로 나타났다. 가장 많이 저감된 것은 8월 2일 24mm 강우시 63%가 저감되었으며, 8월 3일 27mm 강우시 2.7%로 가장 적게 저감되는 것으로 나타났다. 강우 크기는 크게 차이하지 않으나 24mm 강우시 240kg의 토사가 발생, 27mm 강우시 910kg의 토사가 발생한 것으로 측정되어, 선행무강우시간에 따라 토사발생량이 큰 차이를 보이며, 선행무강우시간이 짧

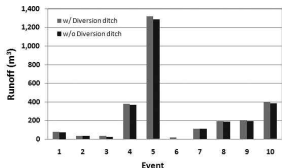


Fig. 10. Comparison of Runoff w/ and w/o Diversion Ditch Condition

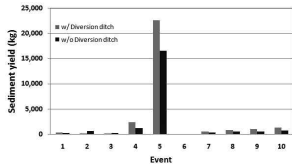


Fig. 11. Comparison of Sediment Yield w/ and w/o Diversion Ditch Condition

은 경우를 고려하여 우회수로의 충분한 폭과 깊이를 결정하고, 잦은 토사제거를 통하여 적절한 우회수로 관리가 필요하다 (Figs. 10 and 11).

3.2 WEPP 모형을 이용한 식생수로 평가

WEPP 모형을 이용하여 식생수로 5m를 적용하여 평가한 결과 총 유출이 2,635.5m³, 토사유출이 27,435.8kg으로 나타났다. 총 유출은 식생수로 5m를 적용하기 전보

다 5.9% 저감되었으며, 총 토사유출은 6.3% 저감되었다. 식생수로 10m를 적용하여 평가한 결과 총 유출이 2,326.9 m³, 토사유출이 25,050.5 kg으로 나타났다. 폭 10m의 식생수로를 조정하여 모의한 결과 총 유출은 9.8%, 총 토사유출은 14.5% 저감되었다. 식생수로 폭은 5m에서 10m로 2배 증가시키면 토사유출 저감률은 2배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 각 강우이벤트에서 저감률을 산정한 결과 식생수로 5m, 10m 모두 8월 2일 24mm 강우시 가장 많이 저감되는 것으로 나타났다. 우회수로와 비교한 경우 총 유출 저감률은 식생수로가 더 큰 것으로 나타났다.

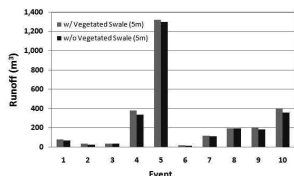


Fig. 12. Comparison of Runoff w/ and w/o Vegetated Swale of 5m

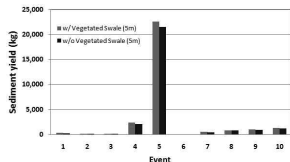


Fig. 13. Comparison of Sediment Yield w/ and w/o Vegetated Swale of 5m

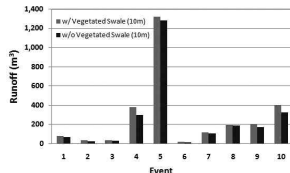


Fig. 14. Comparison of Runoff w/ and w/o Vegetated Swale of 10m

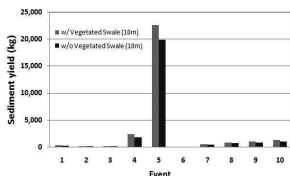


Fig. 15. Comparison of Sediment Yield w/ and w/o Vegetated Swale of 10m

총 토사유출 저감률은 우회수로에서 더 큰 것으로 나타났다 (Fig. 12~15). 이는 식생수로에서 저류 및 증발효과로 인해 유출이 저감되었으나, 식생수로의 침식으로 인해 토사유출 저감률은 우회수로에 비해 크지 않은 것으로 판단된다.

3.3 WEPP 모형을 이용한 식생우회수로 평가

본 연구에서는 식생수로와 우회수로를 혼합한 형태인 식생우회수로를 적용하여 유출 및 토사유출의 저감률을

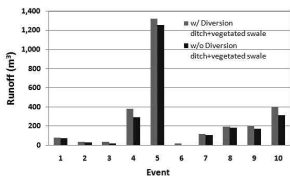


Fig. 16. Comparison of Runoff w/ and w/o Vegetated Diversion Ditch

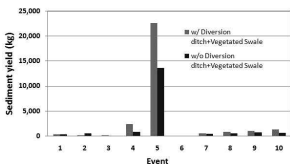


Fig. 17. Comparison of Sediment Yield w/ and w/o Vegetated Diversion Ditch

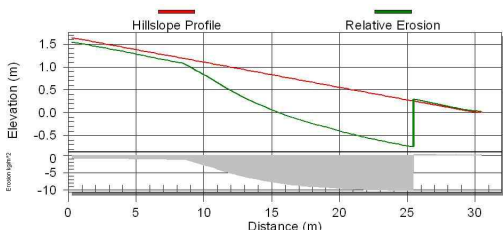


Fig. 18. Erosion and Deposition Graphs with Vegetated Diversion Ditch

평가하였다. 평가결과 총 유출은 11.8% 저감되었고, 총 토사유출은 40.4% 저감되었다. 총 유출 저감량은 331.6 m³, 총 토사 저감량은 11,821.2 kg으로 저감되는 것으로 나타났다. 유출 저감률은 크게 증가하지 않았으나 토사유출 저감률은 크게 증가하는 것으로 나타났다 (Figs. 16 and 17). Fig. 18은 H2의 토양침식 그래프이다. 그래프에서 Hillslope Profile이 나타내는 것은 설정된 H2의 표면높이를 나타내며, Relative Erosion은 연간 발생된 토양침식 후 표면높이를 나타낸다. 토양침식 그래프에서 보면 9m 지점에서 토양침식(erosion)이 급격히 증가하다 식생부분에서 퇴적(deposition)이 발생한다 (Fig. 18). 이러한 그래프를 통해 비점저감시설 설치 시 적절한 위치와 용량을 산정할 수 있다.

4. 결론

본 연구의 목적은 고랭지 밭에서 발생하는 유출 및 토사유출을 저감시키기 위해 설치하는 비점오염 저감시설인 우회수로와 식생수로의 저감효과를 평가하는데 있다. 본 연구의 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 우회수로를 평가한 결과 총 유출이 2,691.9 m³, 토사유출이 20,905.2 kg으로 나타났다. 우회수로 적용 후 총 유출은 5.8% 저감되었으며, 총 토사유출은 29.6% 저감되었다. 빗물우회수로 적용시 토사유출 저감률이 유출 저감률에 비해 높은 것으로 나타났다. 밭 면적이 크거나 경사가 급한 지역의 경우 우회수로의 수를 증가시키는 적절한 토사유출관리가 필요하다.
- 2) WEPP 모형의 break point 기능으로 초지를 구성하고, Channel에 식생 및 배수로를 설정하여 폭 5m,

10m의 식생수로를 적용하였다. 식생수로 5m를 적용하여 평가한 결과 총 유출이 2,635.5 m³, 토사유출이 27,435.8 kg으로 나타났다. 폭 5m의 식생수로 적용 후 총 유출은 5.9% 저감되었으며, 총 토사유출은 6.3% 저감되었다. 식생수로 10m를 적용하여 평가한 결과 총 유출이 2,536.9 m³, 토사유출이 25,050.5 kg으로 나타났다. 식생수로 10m 적용 후 총 유출은 9.8%, 총 토사유출은 14.5% 저감되었다. 식생수로 는 빗물우회수로에 비해 많은 시공비용 및 토지매입비용이 요구되므로 설치 시 생산성을 고려하여 적절한 규모를 선정해야할 필요가 있다.

- 3) 식생수로와 우회수로를 혼합한 형태인 식생우회수로를 적용하여 유출 및 토사유출의 저감률을 평가한 결과 총 유출은 11.8% 저감되었고, 총 토사유출은 40.4% 저감되었다. 저감량은 총 유출이 331.6 m³, 총 토사유출이 11,821.2 kg으로 나타났다. 유출 대비 토사유출의 저감률이 기존의 우회수로나 식생수로를 설치하는 경우보다 큰 것으로 나타나 고랭지 밭에 식생우회수로를 적용하는 경우 효과적으로 토사유출을 저감시킬 수 있다.

본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 WEPP 모형은 경작지 토사유출 방지를 위한 우회수로 및 식생수로 설계 및 저감효과를 평가하는데 유용하게 활용될 수 있다. 고랭지 밭의 토사유출 저감방안을 수립하기 위하여 정량적인 저감을 산정할 필요가 있다. 또한 영농조건이 불리하여 생산성이 낮은 농경지, 특히 중산간 지역에 산재되어 있는 경사도 15% 이상이거나 집단화 규모가 2 ha 미만인 한계농지(농어촌정비법 제2조 제9항; 한경수 등, 2006)의 경우 식생수로와 우회수로를 혼합하여 사용하는 경우 토사유출 저감과 농업 생산성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단

된다. WEPP 모형은 아직 모든 BMP에 대한 평가를 하기 에 한계를 가지고 있으며, 매개변수에 대한 연구가 부족 하다. 본 연구는 연구지역에서 발생하는 토사유출과 저감 효과를 산정하는 방식을 제시하고자 하는 것이 목적이며, 절대적 저감효율을 제시하고자 하는 것은 아니다. 향후 WEPP 모형의 개선 (BMP 시설 모의)과 매개변수에 대한 연구가 이루어진다면 다양한 환경에서 비점 및 저감시설 의 효율 산정이 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 Eco-Star Project (과제번호: EW32-07-10, 부명: 생태호 조성기술 및 생태복원 기술개발)의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

강원도청 (2010). 소양호 비점오염관리지역 관리대책 시행계획. 강원도청 보고서.

김건하, 김영철, 이동률, 정하영, 여중현 (2003). "우리나라 농지-임야유역으로부터의 강우유출수 EMC 부하 분석 및 추정." **대한환경공학회지**, 대한환경공학회, 제25권, 제6호, pp. 760-770.

여중현, 김건하 (2005). "도시, 농촌 및 임야유역으로부터 배출되는 비점원 오염부하의 특성비교." **수질보전 한국물환경학회지**, 수질보전 한국물환경학회, 제21권, 제2호, pp. 184-189.

원철희, 최용훈, 서지연, 김기철, 신민환, 최중대 (2009). "산림과 밭 지역 강우 유출수의 EMC 및 원단위 산정." **수질보전 한국물환경학회지**, 수질보전 한국물환경학회, 제25권, 제4호, pp. 615-623.

전만식 (2007). 소양강댐 흙탕물저감대책. 강원도발전연구원 연구보고서.

최재완, 현근우, 이재운, 신동석, 김기성, 박윤식, 김종진, 임경재 (2009). "WEPP Watershed Version을 이용한 홍천군 자운리 농경지 토양유실 예측 및 경사도에 따른 토양유실량 평가." **수질보전 한국물환경학회지**, 수질보전 한국물환경학회, 제25권, 제3호, pp. 441-451.

한경수, 김영주, 최수명 (2006). "한계농지개발사업의 개발전망과 활성화 방안." **한국농촌계획학회지**, 한국농촌계획학회, 제12권, 제4호, pp. 33-42.

환경부 (Ministry of Environment: 2008). 비점오염저감 시설의 설치 및 관리 운영 매뉴얼.

현근우, 허병녕, 허인량, 정원구, 고상열, 이석중, 이태욱, 박성민, 김영진, 김성석 (2008). 이종원통형침사지를 이용한 고랭지밭 흙탕물 농도 저감에 관한 연구. 강원도 보건환경연구원 보고서.

Chu, S.T. (1978). "Infiltration during unsteady rain." *Water Resources Research*, Vol. 14, No. 3, pp. 461-466.

Donigan, A.S., and Love, J.T. (2003). Sediment Calibration Procedures and Guidelines for Watershed Modeling. WEF TMDL 2003, November 16-19, WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM, Illinois, Chicago.

Flanagan, D.C., and Livingston, S.J. (1995). WEPP User Summary. NSERL Report 11, USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, Indiana.

Lafien, J.M, Thomas, A., and Welch, R. (1987). Cropland experiments for the WEPP project. ASABE Paper, Chicago, IL, pp. 87-2544.

Lim, K.J., Sagong, M., Engel, B.A., Tang, Z., Choi, J.D., and Kim, K.S. (2005). "GIS-based sediment assessment tool." *CATENA*, Vol. 64, No. 1, pp. 61-80.

Mein, R.G., and Larson, C.L. (1973). "Modeling infiltration during a steady rain." *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 384-394.

Page, D.I. (1988). Overland flow partitioning for rill and interrill erosion modeling. Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, AZ, pp. 112

Park, Y.S., Kim, J., Kim, N.W., Kim, S.J., Jeon, J.H., Engel, B.A., Jang, W., and Lim, K.J. (2010). "Development of new R, C and SDR modules for the SATEEC GIS system." *Computers & Geosciences*, Vol. 36, pp. 726-734.

Renard, R.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and Yoder, D.C. (1997). Predicting soil erosion by water, a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE), Agric. Handbook no. 703 USDA-ARS, Washington, D.C., pp. 384.

Simanton, J.R., West, L.T., Weltz, M.A., and Wingate, G.D. (1987). Rangeland Experiments for Water Erosion Prediction Project. Proc. Rainfall Simulator Workshop, Tucson, AZ, pp. 68.

Williams, J.R. (1975). Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources, Proceedings of the sediment yield workshop, pp. 244-252.

Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1987). Predicting

Rainfall Erosion Losses, A Guide to Conservation Planning, Agric. Handbook no. 537, USDA-ARS, Washington, D.C., pp. 85.

논문번호: 11-074	접수: 2011.07.14
수정일자: 2011.10.04/10.12	심사완료: 2011.10.12