

WEPP Watershed Version을 이용한 흥천군 자운리 농경지 토양유실 예측 및 경사도에 따른 토양유실량 평가

최재완 · 현근우* · 이재운 · 신동식** · 김기성*** · 박윤식*** · 김종건*** · 임경재***,†

금강물환경 연구소
*강원도 보건환경연구원
**국립환경과학원
***강원대학교 지역건설공학

Evaluation of Sediment Yield Prediction and Estimation of Sediment Yield under Various Slope Scenarios at Jawoon-ri using WEPP Watershed Model

Jaewan Choi · Geunwoo Hyun* · Jae Woon Lee · Dong Suk Shin** · Ki-Sung Kim*** ·
Younshik Park*** · Jonggun Kim*** · Kyoung Jae Lim***,†

Geun River Environment Research Center
*Gangwondo Government Public Institute of Health & Environment
**National Institute of Environmental Research
***Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University
(Received 2 January 2008, Revised 15 April 2009, Accepted 24 April 2009)

Abstract

To evaluate the soil erosion best management practices, many computer models has been utilized over the years. Among those, the USLE and SWAT models have been widely used. These models estimate the soil erosion from the field using empirically-based USLE/MULSE in it. However, these models are not good enough to estimate soil erosion from highland agricultural watershed where severe storm events are causing soil erosion and muddy water issues at the receiving watersheds. Thus, physically-based WEPP watershed version was applied to a watershed, located at Jawoon-ri, Gangwon with very detailed rainfall data, rather than daily rainfall data. Then it was validated with measured sediment data collected at the sediment settling ponds and through overland flow. In this study, very detailed rainfall data, crop management data, soil data reflecting soil reconditioned for higher crop production were used in the WEPP runs. The R^2 and the EI for runoff comparisons were 0.88 and 0.91, respectively. For sediment comparisons, the R^2 and the EI values were 0.95 and 0.91. Since the WEPP provides higher accuracies in predicting runoff and sediment yield from the study watershed, various slope scenarios (2%, 3%, 5.5%, 8%, 10%, 13%, 15%, 18%, 20%, 23%, 25%, 28%, 30%) were made and simulated sediment yield values were analyzed to develop appropriate soil erosion management practices. It was found that soil erosion increase linearly with increase in slope of the field in the watershed. However, the soil erosion increases dramatically with the slope of 20% or greater. Therefore special care should be taken for the agricultural field with slope greater than 20%. As shown in this study, the WEPP watershed version is suitable model to predict soil erosion where torrential rainfall events are causing significant amount of soil loss from the field and it can also be used to develop site-specific best management practices.

keywords : Runoff, Sediment yield, Slope, Soil erosion, WEPP

1. 서론

북한강의 최대수역인 소양댐 유역에서 지난 몇 년간 계속된 고탁수 문제는 매년 연례행사처럼 되풀이되고 있다. 특히 소양댐 유역 내에는 흥천군 자운지구, 인제군 가아지구 및 서화지구, 양구군 해안지구 등의 고령지 농업지구가 분포되어 있다. 이러한 농업지구를 중심으로 발생한 토양

유실이 소양강댐 유역 탁수 문제의 가장 직접적인 원인으로 지적되고 있다(전만식, 2007). 유사는 강우에 따라 발생하는 비점오염 물질 중에서도 모든 지표면에서 가장 넓게 발생하여 유출되는 오염물질이다. 일반적으로 토양구조로부터 분리되어(detached) 수생태계에 영양원을 공급하는 유사 전달은 자연에서 필요한 프로세스이지만, 급경사지 농경지에서 토지피복 보호 등의 적절한 유사관리 없이 발생한 유사의 과대 유입은 하천의 수생태계 건전성을 파괴하는 주요 요인이 되고 있다(김익재 등, 2007). 수생태계 환경을 파괴시키는 가속화된 토양유실을 막기 위해서는 먼저 유역

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

내 토양유실 발생 현황을 파악하는 것이 필요하다. 유역 내 토양유실 발생 현황을 파악하기 위해서 유역 내 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. 따라서 유역 내 토양유실 발생 현황 및 유사 거동을 정확히 평가할 수 있는 시·공간적 평가 시스템이 필요하다. 그동안 토양유실 및 유사유출량을 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), 그리고 범용토양손실공식을 수정한 개정범용토양손실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE; Renard et al., 1997)이 전 세계적으로 널리 이용되어 왔다. 단일강수에 따른 유사량을 산정하기 위한 수정 범용토양손실 공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE; Williams, 1975)이 개발되어 널리 이용되고 있으나, 이러한 공식들은 미국의 중동부 지역 농지의 사용 용도에 따른 유사유출량의 변화 및 조절을 주목적으로 개발된 경험공식으로, 공식의 각종 독립인자 및 계수가 미국의 일부지역에 적합하도록 개발되어 우리나라에 대하여는 적용 시 설계자의 주관적 판단이 요구되는 경우가 많다(김민석, 2006). MUSLE 모형을 이용하여 유역에 HRU별 유사발생량을 산정하는 SWAT 모형의 경우 일강수량을 이용하여 HRU의 유출 및 침투유량, 그리고 HRU 발생 유사량을 산정한다. 그러나 일강수량 자료를 이용하여 토양유실 및 유사발생은 모의하는데 한계가 있고, 토양유실 및 유사발생은 일강수량보다는 강우강도에 의해서 많은 영향을 받는다. 따라서 일강수량보다는 상세한 강수 자료, 예를 들면 분단위 강수 자료를 이용하여 유사발생량을 평가하는 것이 필요하다. 그러나 기존의 다른 모형은 이러한 분석을 적용하기에는 모형 자체의 제한으로 인해 정확한 강우강도를 반영하기가 어려웠다. 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 분단위 강수, 단일 강우사상에 대해서도 유출 및 토양유실 모의가 가능하다. 하지만 국내는 물론이고 세계적으로도 분단위 강수량을 장기 모니터링하여 토양유실을 모의한 연구사례가 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구의 목표는 1) WEPP 모형을 이용하여 대상 지역의 토양유실량 및 유출량을 모의하여 실측 토양유실량 및 유출량과의 비교 평가를 통해서 WEPP 모형의 정확성을 평가하는데 있으며, 2) WEPP 모형을 이용하여 다양한 경사지 조건하에서 토양유실 발생량을 평가하여 농경지에서 발생하는 토양유실량을 줄일 수 있는 정책 수립과 지형조건에 따른 침사지 설계의 기초 자료를 제시하고자 한다.

1.1. WEPP 모형

1.1.1. WEPP모형의 개요

WEPP 모형은 물리적 방법에 기초한 토양 침식모델로 토양구조, 기후, 토지이용도, 지표 상태에 따른 토양침식과 퇴적량의 추정이 가능하다. 이 WEPP 모형은 여러 개의 부모형들로 구성되어 있는데 이들을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, 추계학적 방법으로 여러 기상자료를 생성해 내는 1) 기상 생성 부모형(Weather Generation Component), 토양의 동해, 눈의 축적과 해빙을 다루는 2) 강설-융설 부모형(Winter process Component), 고정된 스프링쿨러나 고랑 관개 시스템에 의한 토양 유실량 추정을 위한 3) 관개 부모형(Irrigation Component), 지표면에서의 침투 등을 다루는 4) 지표 수문학 부모형(Surface Hydraulics Component), 근근역(root zone)에서의 토양수분과 증발산량을 계산하는 5) 물수지 부모형(Water Balance Component), 작물 성장과 그에 따른 수문 및 토양유실 과정에 대한 영향을 고려하기 위한 6) 작물성장 부모형(Plant Growth Component), 작물 잔류물질의 분해 및 처리효과를 고려하는 7) 잔류물질분해 부모형(Residue Decomposition Component), 수문학 및 침식에 영향을 미치는 여러 토양특성을 다루는 8) 토양인자 부모형(Soil Parameters Component), 사면에서의 강우에 의한 토립자의 분리 및 이송, 그리고 퇴적을 다루는 9) 사면침식과 퇴적 부모형(Hillslope Erosion and Deposition Component), 복합사면과 수로로 이루어진 유역에서의 수문학과 침식과정을 다루는 10) 유역수문학 및 침식과정 부모형(Watershed Channel Hydrology and Erosion Processes Component), 유역에서 여러 수공구조물에서의 침전효과를 고려하는 11) 수공구조물 부모형(Water Impoundment Component) 등 이상의 여러 독립적인 부모형으로 이루어져 있다(Flanagan and Livingston, 1995).

1.1.2. WEPP 모형의 입력 DB

WEPP 모형의 기상자료는 최대 및 최소기온, 태양복사량, 풍속, 및 풍향, 이슬점 온도 등의 기후자료와 강우량, 지속 시간, 5분 최대 강우강도 및 시간 등의 강우자료로 구분될 수 있다. WEPP 모형의 기상자료는 크게 일별모의를 위한 일별 강우자료와, 강우사상별 모의를 위한 시간대별 강우자료를 입력하는 Break point 방법이 있다. 기상자료는 실측 자료로부터 모의자료까지 다양하게 이용할 수 있다(Flanagan and Livingston, 1995). WEPP 모형은 CLIGEN이라는 기상생성 부모형을 이용해 일 기상자료를 생성하지만 이를 이용할 경우 특별한 형식으로 이루어진 월단위의 통계자료가 필요하다. 현재 미국전역에 대해서는 CLIGEN 입력 데이터베이스가 제공되지만, 그 밖의 국가에서는 입력 데이터베이스 부재로 인해 CLIGEN을 이용하는데 한계가 있다. 따라서 직접 관측된 기상자료 값을 이용하여야 하며 이를 위해서는 함께 제공되는 Breakpoint Climate Data Generator(BPCDG) 프로그램을 이용하여 관측된 기상자료 값을 WEPP 모형에서 필요한 입력 자료로 생성해줘야 한다(Geete et al., 2000). 지형자료는 경사지의 길이, 폭, 경사도에 관련된 자료이며, 실제 측량 성과나 지형도를 이용하여 입력한다. 단일 경사지에서 토성이나 작물체계가 다르면 몇 개

의 지표유출요소(Overland Flow Element, OFE)로 구분하여 지형자료를 입력한다. 토양자료는 모래, 점토, 유기물, 암석 파편 함유율, 이온치환능(Cation Exchange Capacity, CEC) 등의 토양조성에 관련된 자료와 세류간, 세류 침식능, 한계 전단응력 등의 토양침식능에 관련된 자료, 토양의 유효수리 전도도 등의 자료이다. 작물 및 재배관리 자료는 경운장비 및 일시, 작물재배 기간, 재배작물 종류, 수확일시, 잔류물 처리 등에 관련된 포장운영에 대한 정보를 포함한다. WEPP 모형에서는 재배작물에 관련된 주요 매개변수를 데이터베이스화하여 제공하고 있으며, 이들 작물에 관련된 매개변수는 평균수준의 수확량으로 재배되는 경우에 적용되는 값들이다. 유역구조자료는 WEPP 모형을 유역규모의 경사지에 적용할 경우 경사지, 수리구조물, 하천 등의 연결에 관한 정보를 제공하며, 대상유역의 지형 및 유출특성에 따라 경사지, 수로, 수리구조물간의 연결이 달라지게 된다. 수로자료는 WEPP 모형을 유역규모의 경사지에 적용할 경우, 수로경사, 토성, 관리상태, 기상, 수리특성 등에 관련된 정보를 제공하며, 각 유역이나 수로 매개변수가 달라지기 때문에 유역 내 각 수로마다 입력 자료를 만들어준다(손정호, 2002).

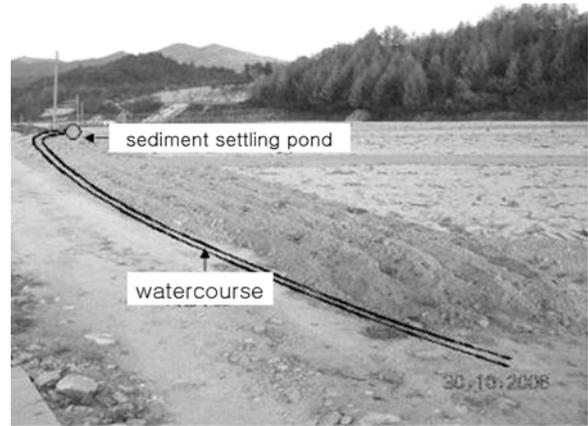
2. 연구방법

2.1. 연구 대상 지역의 선정

홍천군 내면 지역의 인구는 365가구 1,215명이고, 경작면적은 1,264필지, 4,646,938 m³이다. 주요 작물은 무, 배추, 감자인데, 통상 무와 감자를 연작하고 있었다. 홍천군 내면 지역은 해발 650~700 m 고지대에 위치해 있으며, 연평균 강우량은 1,163 mm로서 여름철에 많은 강우가 집중되는 특성을 나타내고 있다. 밭 토양은 모래가 많은 사질 토양이고 농작물의 품질을 높이기 위해서 2~3년에 1회 성토(30~60 cm)를 실시하고 있었다. 본 연구에서는 홍천군 내면 자운 4리, 8,485 m²의 고랭지 밭을 연구지역으로 선정하였으며 현근우 등(2008)에 의해서 측정된 유출 및 토양 유실량 자료를 활용하여 WEPP 모형의 정확성을 평가하였다. 현근우 등(2008)은 대상지에 깊이 60 cm, 폭 60 cm의 콘크리트 배수로를 설치하였고(Fig. 1(a), (b)), 유출수와 함께 유실되는 토양유실량을 측정하기 위하여 11.3 m³ 용량의 침사지를 2기를 설치하였다(Fig. 2). 밭 경사도는 5.5%로서 자운 4리 일대를 대표할 수 있는 경사도이다.

2.2. 실측 유출량 및 유사량

본 연구에서는 앞에서 언급된 바와 같이 현근우 등(2008)에 의해 측정된 유출 및 유사량 자료를 활용하여 WEPP 모형을 평가하였다. 현근우 등(2008)은 유역 면적 8,485 m²인 고랭지밭을 대상으로 유출수량 및 유사량을 측정하기 위하여 침사지를 설치하였다(Fig. 3). 집중강우 시 발생하는 다량을 유사를 효율적으로 측정하기 위하여 침사지의 체류 시간에 여유 용량을 충분히 고려하여 체류시간 5분으로 침사지 용량을 설계하였다. 또한 실시간으로 정확한 자료를



(a) Study area



(b) Drainage ditch

Fig. 1. Study area and sediment settling pond (Hyun et al., 2008).

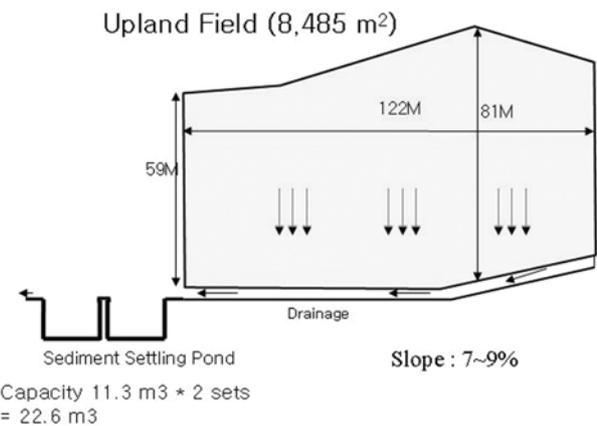


Fig. 2. Sediment settling pond (Hyun et al., 2008).

습득하기 위하여 유입 유량, SS(Suspended Sediment), 강수량 등을 원격지에서 모니터링 할 수 있는 PLC(Power Line Communication) 시스템을 도입하였다.

현근우 등(2008)은 실험 초기 침사지를 설계함에 있어서 시간당 최대 50mm의 강우량을 기초로 용량을 계산했다. 실험 결과 분당 최대 강수량과 그 강도의 지속 여부가 표면 유출량을 결정하는 것으로 나타났다. 8월 8일 초기 강

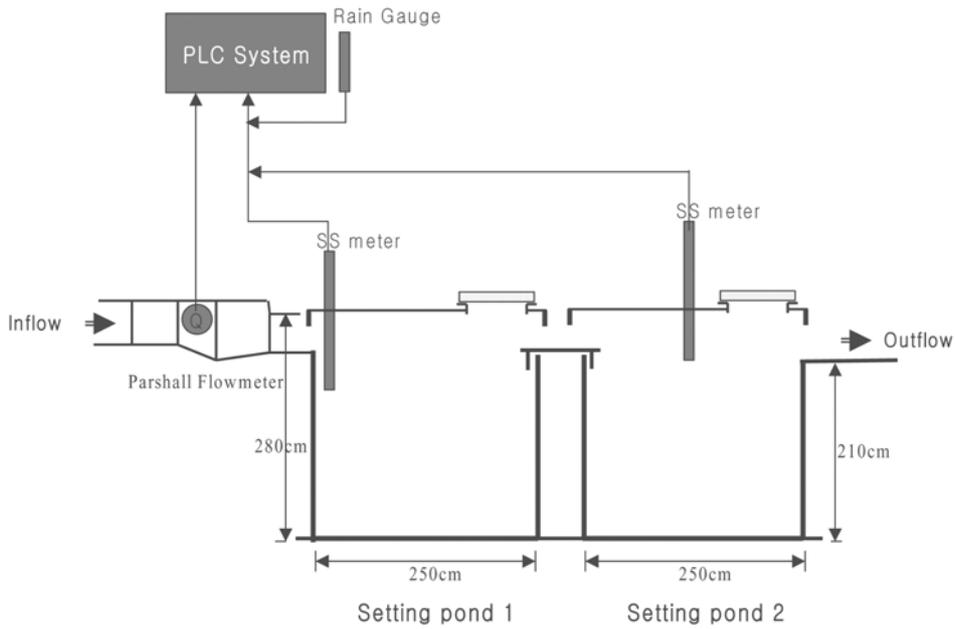


Fig. 3. Settling pond design (Hyun et al., 2008).

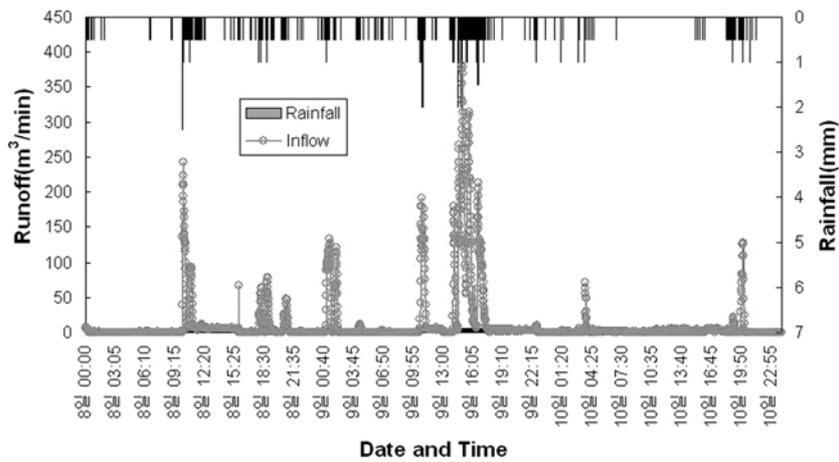


Fig. 4. Runoff and Rainfall per minute (Hyun et al., 2008).

우 13 mm까지는 흙탕물이 발생하지 않았지만, 분당 강우량이 1 mm 이상인 시점, 그리고 그러한 강우량이 집중되는 시점에서 흙탕물의 표면 유출량이 급격하게 증가하는 경향을 보였다(Fig. 4).

Table 1과 Table 2는 현근우 등(2008)에 의해서 측정된 1분 단위 강우량 및 유출량 자료이다. 2007년과 2008년 측정된 자료를 분석해보면 20 mm/day 이상의 강우가 발생할 경우 홍천군 내면에 위치한 시험포에서 유출이 발생하여 토양유실이 발생하기 시작하였다. Table 3과 Table 4는 2007년과 2008년 강우에 따른 총 토양유실량을 나타낸다. 현근우 등(2008)은 농경지에서 발생한 토양유실량을 침사지에 퇴적된 퇴적량과 유출수를 통해 유실된 부유 유사량으로 구분하여 실측하였다. 2007년 침사지에 퇴적된 총 유사량은 31.09 ton이며, 부유유사형태로 유실된 토양은 총 9.02 ton으로 분석되었다. 2008년 침사지에 퇴적된 총 유사량은 21.80 ton이며, 부유유사형태로 유실된 토양은 총

Table 1. Rainfall, total rainfall in field, surface runoff, surface runoff ratio for 2007 (Hyun et al., 2008)

Date	Rainfall (mm)	Rainfall volume (m ³ /d)	Runoff volume (m ³ /d)	Runoff coefficient (%)
7.19	40.5	343.6	13.0	3.8
8.1~8.2	65.0	632.1	164.0	25.9
8.4~8.5	93.0	789.1	168.0	21.3
8.8	67.0	568.0	141.1	24.8
8.9	137.0	1,162.4	596.0	51.3
8.10	38.0	322.4	80.1	24.8
8.19	34.5	292.7	52.0	17.8
8.27	52.0	441.2	153.0	34.7
9.6	27.0	229.1	37.3	16.3
9.14~9.15	92.0	780.6	265.0	33.9
9.18	52.0	441.2	175.0	35.8

Table 2. Rainfall, total rainfall in field, surface runoff, surface runoff ratio for 2008 (Hyun et al., 2008)

Date	Rainfall (mm)	Rainfall volume (m ³ /d)	Runoff volume (m ³ /d)	Runoff coefficient (%)
6.18	41.5	352.1	21.0	6.0
7.13	23.0	195.2	14.0	7.2
7.15~16	29.0	246.1	30.0	12.2
7.19~20	75.0	636.4	88.0	13.8
7.24	215.0	1,824.3	649.0	35.6
8.2	24.0	203.6	16.0	7.9
8.3	27.0	229.1	58.0	25.3
8.12	31.0	263.0	32.0	12.2
8.18	39.5	335.2	67.0	20.0
8.22	77.0	653.3	119.0	18.2

Table 3. Observed sediment yield for 2007 (Hyun et al., 2008)

Date	Rainfall (mm)	Coarse sediment outflow (ton)	Suspended sediment (ton)	Total sediment (ton)
7.19	40.5	0.08	0.02	0.10
8.1~8.2	65.0	1.43	0.52	1.95
8.4~8.5	93.0	1.82	0.63	2.45
8.8	67.0	1.46	0.59	2.05
8.9	137.0	7.96	3.73	11.68
8.1	38.0	0.96	0.25	1.21
8.19	34.5	0.36	0.12	0.48
8.27	52.0	0.83	0.33	1.16
9.6	27.0	0.13	0.04	0.17
9.14~9.15	92.0	3.2	0.80	4.00
9.18	52.0	1.27	0.44	1.71
etc.		2.57	1.56	4.13
Total		22.07	9.02	31.09

Table 4. Observed sediment yield for 2008 (Hyun et al., 2008)

Date	Rainfall (mm)	Coarse sediment outflow (ton)	Suspended sediment (ton)	Total sediment (ton)
6.18	41.5	0.47	0.03	0.50
7.13	23.0	0.42	0.04	0.45
7.15~7.16	29.0	0.65	0.09	0.74
7.19~7.20	75.0	1.66	0.34	2.01
7.24	215.0	7.67	3.39	11.06
8.02	24.0	0.23	0.01	0.24
8.03	27.0	0.78	0.13	0.91
8.12	31.0	0.23	0.10	0.33
8.18	39.5	0.78	0.12	0.90
8.22	77.0	1.61	0.34	1.96
etc.		1.30	0.78	2.08
Total		15.81	5.37	21.80

5.37 ton으로 분석되었다. 현근우 등(2008)은 강수량이 약 100 mm/day 이상이 될 경우 유사 침전량이 급격히 증가한다고 보고하였다. 즉, 흔히 게릴라성 집중 호우라고 불리는 성격의 강우가 급격한 토양유실량 증가로 이어진다고 분석

**Fig. 5.** Sand pack installed at the tip of furrow to reduce soil erosion.

하였다(현근우 등, 2008).

현근우 등(2008)은 2008년 여름 연구 대상 농경지에서의 과도한 토양유실이 발생한 이래로 Fig. 5에서와 같이 모래주머니를 각 고랑 끝단에 설치(2008년 7월 24일 강우)하여 유사가 배수로로 유입되지 않도록 하였다. 이러한 모래주머니 설치를 통해 상당량의 유사가 저감되는 것으로 나타났다. 하지만 모래주머니 설치에 따른 유사 저감효과는 WEPP 모형에 적용하기 어렵기 때문에 2008년 7월 24일 유사, 유량 데이터는 WEPP 모형의 정확성 평가 시 제외하였다.

2.3. WEPP 기상 DB 구축

현근우 등(2008)은 케릴라성 집중 강우에 의해서 토양유실이 가속화 된다고 보고하였다. 이러한 이유로 강우강도를 고려하여 토양유실량을 평가하기 위하여 분단위 강수 모의가 가능한 WEPP을 이용하여 농경지에서 발생한 전체 토양유실을 평가하였다. 이를 위해 먼저 현근우 등(2008)에 의해 측정된 분단위 강수량 자료와 결측된 자료는 물 관리 정보 시스템(Water Management Information System) 자료를 이용하여 2007년 1월 1일부터 2008년 9월 30일까지 WEPP 모형의 기상자료 DB(Fig. 6와 Fig. 7)를 구축하였다. 2007년 총 강수량은 1,308 mm이며, 이 중 7월, 8월, 9월에 내린 강수량이 전체 강수량의 17.4%, 29.3%, 그리고 22.2%를 차지한다. 2008년 9월까지 총 강수량은 1,085.7 mm이며, 이 중 7월, 8월, 9월에 내린 강수량이 전체 강수량의 42.9%, 17.4%, 그리고 8.8%를 차지한다.

2.4. WEPP 토양, 작물, 그리고 유역관련 DB 구축

WEPP 모형을 이용하여 토양유실량을 예측하기 위해서는 정확한 토양 속성 DB를 구축해야 한다. 그동안 많은 연구자들은 기존에 구축된 토양 DB를 이용하여 다양한 토양유실 모의 평가를 수행하였다(김종진 등, 2007; 유동선 등, 2007; 이근상 등, 2003). 그러나 허성구 등(2007)은 고령농경지에서 원지반 토양이 대부분 유실되어 작물 생산성 향상을 위해 2~3년에 한번씩 30~50 cm 가량 객토를 하는 것을 반영하기 위해 객토 토양 샘플 분석을 통해 객토 토양

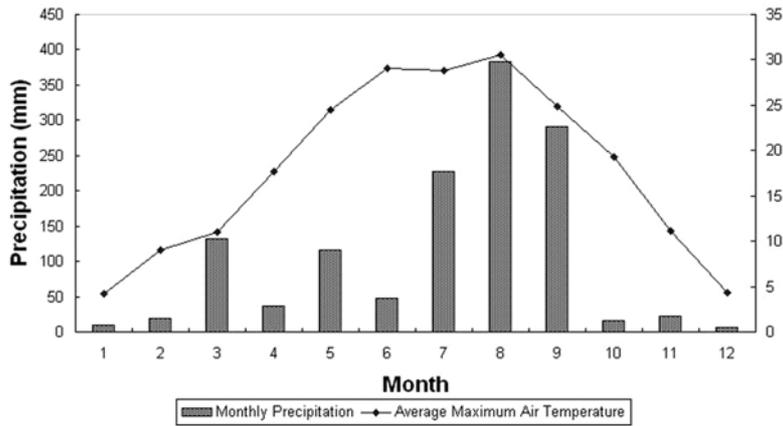


Fig. 6. Monthly rainfall and average maximum air temperature in 2007.

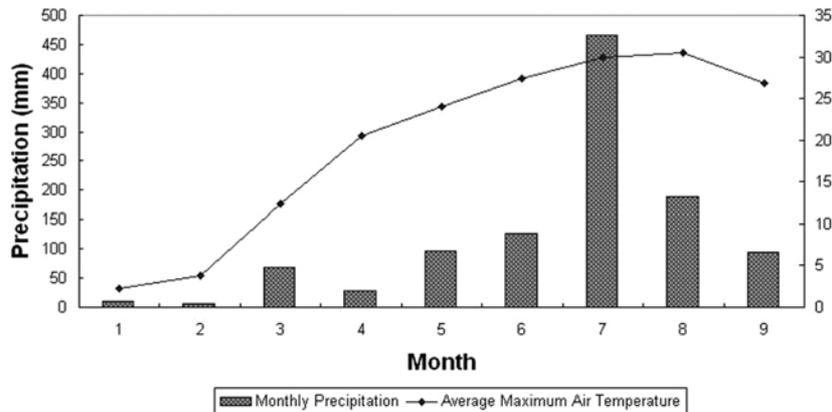


Fig. 7. Monthly rainfall and average maximum air temperature in 2008.

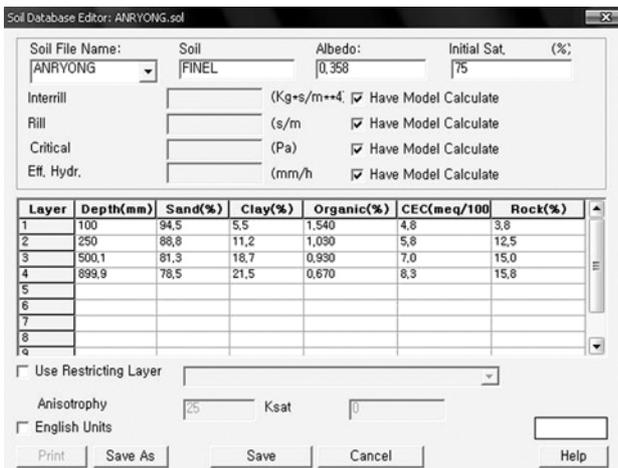


Fig. 8. WEPP soil database.

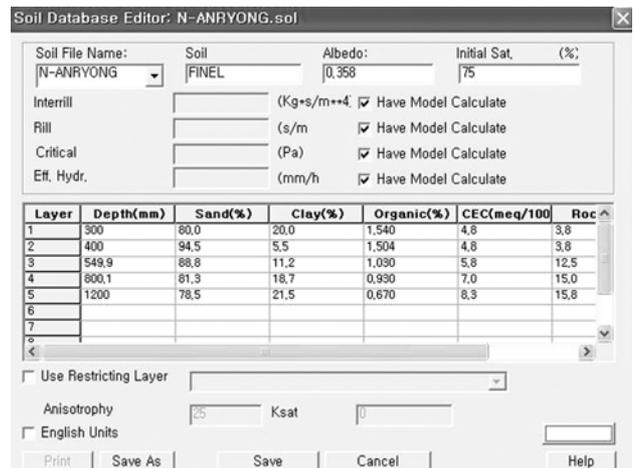


Fig. 9. WEPP soil database of surface reconditioned soil.

DB를 구축하여 SWAT 모형의 정확성을 향상시켰다. WEPP 모형의 경우 연구 대상 지역의 정확한 토성을 고려하여 토양 DB를 구축해야 보다 정확한 토양유실 평가가 가능하다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 8과 같이 대상 지역의 “ANRYONG” 토양을 이용하였으며, 2008년 객토된 토양의 토성을 반영하기 위하여 기존 토양DB 표층에 30 cm의 사질토 속성 객토 레이어를 추가하였다(Fig. 9). 본 연구에서는 W

EPP 모형의 자동 산정 옵션을 이용하여 세류간 침식능, 세류 침식능, 유효수리 전도도, 한계 전단응력을 산정하였다.

WEPP 모형을 이용하여 토양유실량을 평가할 때 가장 중요한 입력자료 중의 하나가 작물인자이다. 따라서 본 연구에서는 다음에 보이는 바와 같이 감자(2007) (Fig. 10 and 11) 및 무(2008) (Fig. 12 and 13) 작물 DB를 구축하여 WEPP 모형의 입력 DB를 구축하였다.



Fig. 10. Potato.

Num	Date	Operation Type	Name
1	3/1/1	Initial Conditions	fallow
2	2/15/1	Tillage	Disk plow Depth: 1.97 in. Type: Sec
3	4/14/1	Tillage	Harrow-packer roller Depth: 1.97 in. Type: Sec
4	4/25/1	Tillage	Plow, Moldboard, 8" Depth: 1.97 in. Type: Sec
5	5/7/1	Plant - Annual	potato Row Width: 30.00 in
6	8/30/1	Harvest - Annual	potato
7	9/4/1	Tillage	Harrow-roller harrow (cultipacker) Depth: 1.97 in. Type: Sec
8			
9			
10			

Fig. 11. Potato management database (2007) for WEPP.



Fig. 12. Radish.

Num	Date	Operation Type	Name
1	3/1/1	Initial Conditions	fallow
2	2/15/1	Tillage	Disk plow Depth: 1.97 in. Type: Sec
3	5/27/1	Tillage	Harrow-packer roller Depth: 1.97 in. Type: Sec
4	6/2/1	Tillage	Plow, Moldboard, 8" Depth: 1.97 in. Type: Sec
5	7/1/1	Plant - Annual	radish Row Width: 30.00 in
6	9/10/1	Harvest - Annual	radish
7			
8			
9			
10			

Fig. 13. Radish management database (2008) for WEPP.

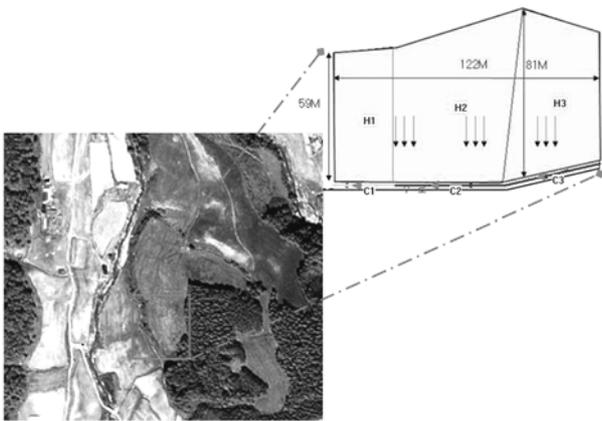


Fig. 14. Watershed configuration of the study watershed.

연구 대상 지역에 WEPP 모형을 적용하기 위해서 고려해야 할 부분이 각 농경지에서의 유출수가 어떻게 합류되는지 유역구분을 정확하게 하는 것이다. 본 연구에서는 Fig. 14에 보이는 바와 같이 3개의 경사지와 3개의 수로를 만들어 연결되도록 유역 연결 구조를 생성하였다. 대상 지역의 실측 농경지 경사도인 5.5%와 배수로 경사도 1%(현근우 등, 2008)를 모형의 입력자료로 구축하였다.

2.5. WEPP 모형 유출량 및 유사량 예측 정확성 평가

본 연구에서 앞서 기술된 WEPP 모형의 입력 DB를 구축한 후 실측 유출량 및 유사량을 측정된 기간에 대해 WEPP 모형을 이용하여 유출량 및 유사량을 평가하였다. 유출량의

경우 2007년 7월 19일부터 2008년 8월 22일까지의 예측 유출량을 실측 유출량과 비교하였다. 유사량의 경우 침사지에 퇴적된 양과 부유되어 유실된 양을 합산하여 WEPP 모형에 의한 예측치와 비교 평가하였다. 앞서 기술된 바와 같이 2008년 7월 24일 농경지 고랑 끝부분에 모래주머니를 설치하였기 때문에 유출량 및 유사발생량에 많은 차이를 나타내어 모형의 정확성 평가 시 이 자료를 제외하고 평가하였다. WEPP 모형은 사면에서 강우에 의한 토립자의 크기, 중량 등에 따라 분리 및 이송을 계산하여 토양유실량을 산정하므로 유역출구로 유출되는 토양유실량을 산정한다.

2.6. 다양한 경사 조건하에서의 토양유실량 예측

본 연구에서는 WEPP 모형을 이용하여 강원도 홍천군 자운 4리 지역의 유출량 및 토양유실량을 예측하였으며 정확성 평가를 수행하였다. 이렇게 보정된 자료를 활용하여 대상 지역에 대하여 다양한 경사도에 따른 토양유실량 비교, 분석이 가능할 것으로 판단되어 본 연구에서는 연구대상지역의 경사도를 각각 2%, 3%, 5.5%, 8%, 10%, 13%, 15%, 18%, 20%, 23%, 25%, 28%, 30%로 변화시켜 대상 지역에서의 발생 토양유실량을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. WEPP 모형 보정

Ashish Pandey 등(2008)은 세류 침식능, 세류간 침식능, 유효수리전도도, 한계 전단응력과 같은 매개변수를 변화시

Table 5. Calibrated parameters for WEPP model

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

켜 WEPP 모델을 보정 및 민감도 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 Table 5에서와 같이 매개변수를 변화시켜 WEPP 모델을 보정하였다.

3.2. WEPP 모형 유출량 예측 정확성 평가

본 연구에서는 연구대상 지역에서 2007년 7월 19일부터 2008년 8월 22일까지 실측된 유출량 자료를 이용하여 WEPP 모형 예측 유출량 자료와 비교분석하였다. Fig. 15는 실측 유출량과 예측 유출량을 비교 평가한 것이다. Fig. 15에서 보이는 바와 같이 예측치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다. 2007년 9월 6일과 2008년 7월 15일~16일 WEPP 모형 예측 유출량은 0.005 m^3 이하로 매우 작게 발생하였다.

WEPP 모형에 의한 예측 유출량과 실측 유출량 비교한 결과 결정계수는 0.88, 유효지수는 0.91(Fig. 16)로 높은 수치를 나타냈다. Donigan와 Love(2003)의 기준에 의하면 WEPP 모형의 예측치가 실측치를 전반적으로 “좋음(good)” (Table 6) 이상으로 평가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 평가해 볼 때 객토 토성을 고려한 WEPP 모형은 농경지에서의 유출량을 잘 모의하는 것으로 나타났다.

3.3. 모형 예측치와 실측치와의 비교 평가 - 유사량

본 연구에서는 연구대상 지역에서 2007년 7월 19일부터 2008년 8월 22일까지 실측된 토양유실량 이용하여 WEPP 모형 예측 토양유실량 자료와 비교분석하였다. Fig. 17은 실측 토양유실량과 예측 토양유실량을 비교 평가한 것이다. Fig. 18에서 보이는 바와 같이 예측치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

WEPP예측 토양유실량과 실측 토양유실량을 비교한 결과 결정계수와 유효지수는 각각 0.95와 0.91(Fig. 18)로 상당히 높게 나와(매우 좋음(very good), Donigan and Love, 2003)

Table 6. Criteria for evaluating model performance(Donigan 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

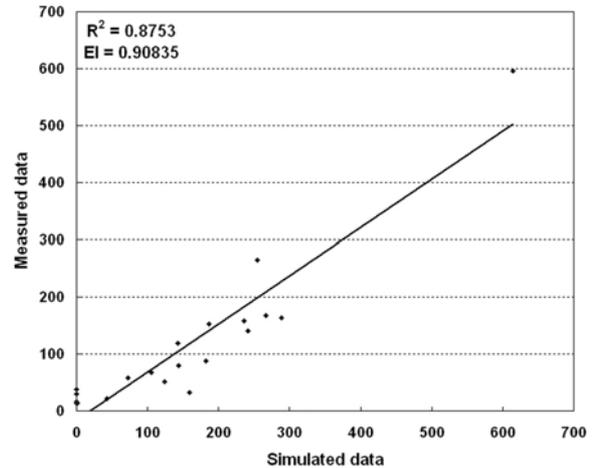


Fig. 16. R^2 and Nash - Sutcliffe of runoff estimation.

WEPP 모형을 이용하여 농경지 구역에서의 토양유실량을 정확히 평가할 수 있는 것으로 나타났다.

3.4. 다양한 경사도 조건하에서의 토양유실량 비교 평가

위에 기술된 바와 같이 WEPP 모형은 농경지 구역에서의 유출량 및 유사량을 평가하는데 매우 유용한 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 다양한 경사도 조건하에서 토양유실량을 평가하였다. Quirijn de Jong van Lier 등(2005)은 WEPP 모형을 최고 경사도 59%인 지역에 적용하였으며, Ashish Pandey 등(2008)은 WEPP 모형을 22% 이상의 경사진 지역에 적용하여, 실측치와 비교 분석한 결과 유효지수가 0.9정도로 WEPP 모형이 상당히 실측치를 잘 평가하는 것으로 나타났다. 따라서 다양한 경사 조건(2%, 3%, 5.5%, 8%, 10%, 13%, 15%, 18%, 20%, 23%, 25%, 28%, 30%)에 따른 토양유실량을 WEPP 모형을 이용하여 산정한

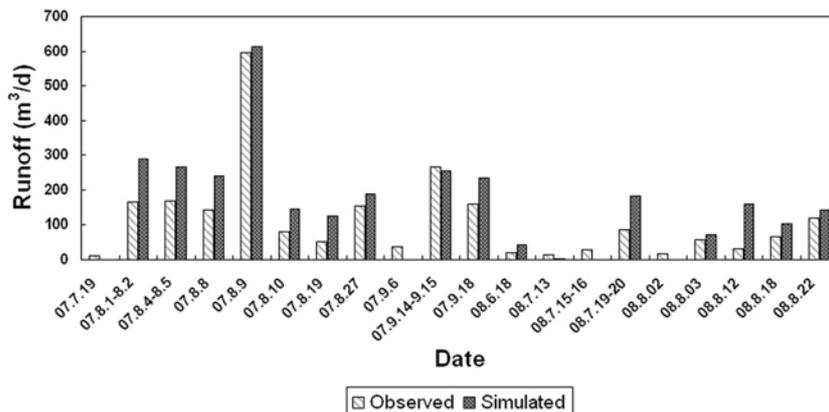


Fig. 15. Comparison of simulated and measured runoff volume from study watershed.

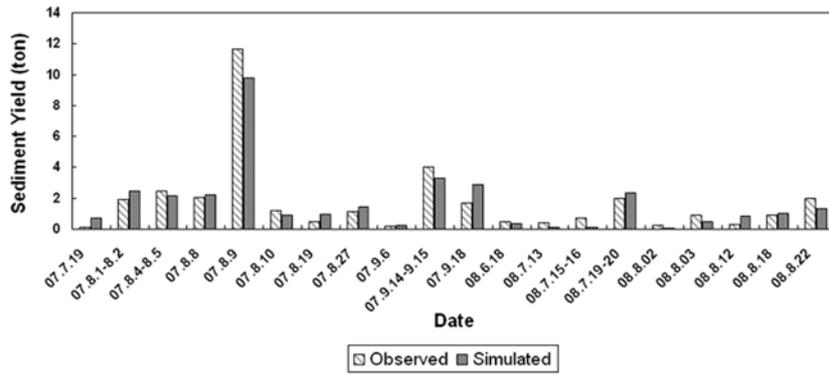


Fig. 17. Comparison of simulated and measured sediment yield from study watershed.

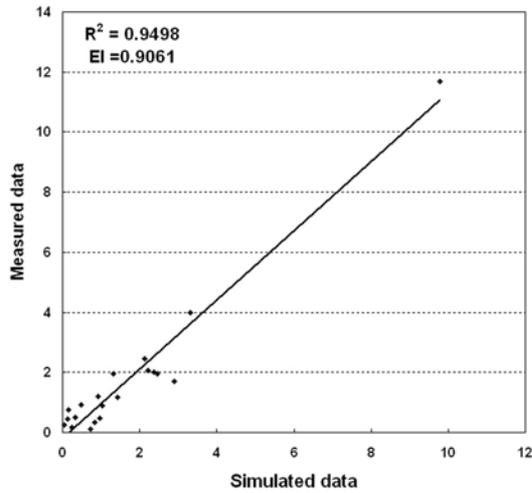


Fig. 18. R² and Nash-Sutcliffe of sediment estimation.

결과는 Table 6~Table 7과 Fig. 19와 같다. 각 경사도별 본 연구에서 사용된 실측 강우 사상별 발생한 유사 유출량의 총량은 경사도가 증가 할수록 증가하는 경향을 보였다. 경사도를 8%에서 15%로 증가시키면 발생 토양유실량이 총 37.367 ton으로 78.7% 증가했다. 경사도가 20% 이상이 될 경우 토양유실량이 급격하게 증가되므로 이러한 급경사지 농경지에서는 토지 매입을 통한 초생대 및 산림 조성을 하던지 침사지와 같은 구조적 최적관리 기법을 도입하는 것이 필요할 것이다. 영농조건이 불리하여 생산성이 낮은 농경지, 특히 중산간지역에 산재되어 있는 경사도 15% 이상 이거나 집단화 규모가 2ha 미만인 한계농지(농어촌정비법 제2조 제9항; 한경수 등, 2006)의 경우 정비나 용도변경을 통하여 토양유실 저감과 생산성을 향상시킬 수 있는 방안을 모색해야 할 것이라 판단된다.

Table 7. Comparison of sediment generation under various slope conditions (2%~15%)

Date	2% (kg)	3% (kg)	5.5% (kg)	8% (kg)	10% (kg)	13% (kg)	15% (kg)
07.7.19	318.4	347.0	717.6	813.1	862.9	955.4	997.2
07.8.1~8.2	1725.5	1880.7	2464.5	3041.1	3864.9	4681.2	5185.7
07.8.4~8.5	1772.9	1843.3	2135.1	2644.8	3070.1	3933.9	4551.9
07.8.08	1319.9	1619.3	2220.1	3024.0	3513.0	4623.6	5212.9
07.8.09	5133.5	5695.8	9775.7	15149.4	19451.6	25458.8	29252.9
07.8.10	730.8	800.0	911.9	997.0	1066.6	1159.9	1199.6
07.8.19	819.5	873.2	971.4	1059.1	1134.3	1271.6	1404.2
07.8.27	1081.8	1156.3	1433.0	1685.1	1931.1	2427.1	2725.7
07.9.06	133.7	154.5	242.6	266.1	277.9	294.6	279.4
07.9.14~15	2922.1	3044.2	3307.3	3945.6	4495.6	5364.8	5911.9
07.9.18	2414.1	2452.8	2885.0	3377.0	3744.6	4296.0	4618.8
08.6.18	45.2	216.3	335.2	494.7	647.2	911.1	1,111.6
08.7.13	21.0	66.8	136.3	229.1	298.4	406.1	504.5
08.7.15~16	16.1	21.9	143.3	243.5	345.8	557.3	738.1
08.7.19~20	455.6	1,237.7	2,367.5	3,416.2	4,229.9	5,442.6	6,305.4
08.8.02	5.0	11.8	42.6	119.3	182.6	302.6	339.1
08.8.03	299.8	440.1	486.3	700.8	884.9	1,165.9	1,307.5
08.8.12	618.1	565.9	833.3	1,153.2	1,410.9	1,802.0	2,042.1
08.8.18	322.2	709.8	1,038.6	1,482.6	1,843.2	2,417.9	2,736.2
08.8.22	448.9	497.6	1,307.6	3,629.7	5,219.3	7,274.1	8,414.2
Total	20604.1	23635.0	33754.9	47471.4	58474.8	74746.5	84838.9
Event Avg.	1030.2	1181.7	1687.7	2373.5	2923.7	3737.3	4241.9

Table 8. Comparison of sediment generation under various slope conditions (18~30%)

Date	18% (kg)	20% (kg)	23% (kg)	25% (kg)	28% (kg)	30% (kg)
07.7.19	1141.6	1246.9	1394.9	1487.7	1619.6	1704.9
07.8.1~8.2	5918.6	6388.8	7063.0	7496.4	8138.6	8553.0
07.8.4~8.5	5463.0	6025.6	6818.9	7306.8	7979.9	8397.3
07.8.08	5933.7	6403.6	7137.2	7568.0	8176.5	8556.2
07.8.09	34599.2	37984.2	42762.3	45884.4	50356.7	53201.3
07.8.10	1306.5	1397.6	1535.0	1623.2	1748.9	1828.2
07.8.19	1608.2	1728.8	1925.4	2042.5	2209.0	2314.1
07.8.27	3152.5	3428.7	3821.4	4073.1	4432.6	4662.0
07.9.06	258.0	244.7	240.5	252.5	270.5	281.9
07.9.14~15	1014.0	7257.7	8008.2	8486.2	9165.8	9598.5
07.9.18	5169.3	5551.0	6097.0	6443.4	6926.9	7232.1
08.6.18	1,625.7	1,809.9	2,031.4	2,174.1	2,380.6	2,513.3
08.7.13	679.9	739.7	826.7	883.7	967.0	1,020.9
08.7.15~16	854.6	923.0	1,020.8	1,088.9	1,189.3	1,255.3
08.7.19~20	7,352.5	8,042.7	9,066.8	9,728.1	10,688.3	11,317.9
08.8.02	391.0	424.1	471.5	501.5	545.4	573.6
08.8.03	1,510.2	1,639.0	1,828.7	1,953.5	2,137.9	2,257.6
08.8.12	2,392.1	2,620.0	2,952.5	3,167.4	3,480.1	3,681.0
08.8.18	3,194.9	3,489.2	3,913.9	4,186.7	4,579.4	4,831.4
08.8.22	10,008.9	11,015.2	12,460.6	13,383.1	14,687.3	15,521.0
Total	93574.4	108370.4	121376.7	129731.2	141680.3	149301.5
Event Avg.	4678.7	5418.5	6068.8	6486.5	7084.0	7465.0

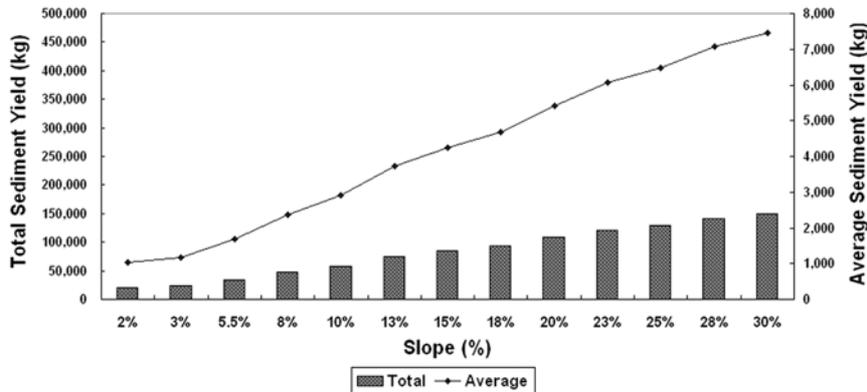


Fig. 19. Total and average sediment yield from study watershed under various slope scenarios.

4. 결론

본 연구의 목적은 물리적 기반 모델인 WEPP 모형을 이용하여 연구 대상 지역에서의 유출량과 토양유실량 예측 정확성을 평가하는 것이며, 모형의 예측 정확성이 확보될 경우 다양한 경사도(2%, 3%, 5.5%, 8%, 10%, 13%, 15%, 18%, 20%, 23%, 25%, 28%, 30%)에 따른 토양유실량 변화를 비교·분석하는데 있다.

본 연구의 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 연구 대상 지역에 대한 유출 정확성을 평가해 본 결과 결정계수는 0.88, 유효지수는 0.91이고, 토양유실량 예측 결정계수와 유효지수는 각각 0.95과 0.91으로 상당히 높게 나와 WEPP 모형이 유출량 및 토양유실량을 매우

정확하게 예측할 수 있다고 판단된다.

- 2) 경사도(2%, 3%, 5.5%, 8%, 10%, 13%, 15%, 18%, 20%, 23%, 25%, 28%, 30%)별 토양유실량을 평가해 본 결과, 경사도가 가장 낮은 2%에서 총 20.6 ton이고, 경사도가 가장 큰 30%에서는 149.3 ton의 유사량이 발생하여 7배 정도의 차이가 발생하였다. WEPP 모형의 이용으로 침사지 또는 초생대 설계 시 지형 변화에 따라서 크기와 처리효율 등을 고려하여 설계하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 WEPP 모형을 이용하여 유출량 및 유사량을 평가하였으나, 큰 유역에 적용할 경우 정확한 유역 구분 및 속성 DB를 추구하는데 한계가 있다. 따라서 GIS 기반의 WEPP 모형인 ArcGeoWEPP을 이용한다면 보다 큰 유역에서의 토양유실량을 정확하게 평가할 수 있을 것으로

기대된다. 물리적 모형에 적용되는 입력 자료의 구축과 GIS를 활용한 공간 데이터 구축이 많아지게 되면 GeoWEPP을 이용한 유수량 및 유출량의 예측이 원활할 것으로 판단된다.

본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 WEPP 모형은 기존의 USLE 모형이 할 수 없었던 분단위 강수량을 고려하여 강우량 변화에 따른 토양유실량을 정확히 예측할 수 있다. 따라서 이러한 WEPP 모형을 이용하게 되며, 다양한 조건하에서의 토양유실량 예측이 가능해지며, 이를 통해 유역의 지형, 토성, 작물, 강수강도 등을 고려한 site-specific 토양유실 저감 대책을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 강원도 보건환경연구원과 강원대학교 농업생명과학연구원의 지원으로 수행되었습니다. 이에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

참고문헌

- 김민석(2006). 산지 유사유출 산정을 위한 GeoWEPP Model의 적용 연구. 석사학위논문, 충남대학교.
- 김익재, 이병국, 최지용, 한대호(2007). 수생태계 보호를 위한 유사관리 방안. 한국환경정책평가연구원 연구보고서.
- 김종건, 임경재, 박윤식, 허성구, 박준호, 안재훈, 김기성, 최중대(2007). 경사도에 따른 CN보정에 의한 L-THIA 직접 유출 모의 영향 평가. 한국수질보전학회지, **23**(6), pp. 897-905.
- 손정호(2002). WEPP 모형을 이용한 토양유실량 추정. 석사학위논문, 서울대학교.
- 유동선, 안재훈, 윤정숙, 허성구, 박윤식, 김종건 임경재, 김기성(2007). SATEEC 시스템을 이용한 객토 토양의 토성 고려에 따른 도암댐 유역의 토양유실 및 유수량 분석. 한국수질보전학회지, **23**(4), pp. 518-526.
- 이근상, 장영률, 조기성(2003). 토양침식량 산정에서 토양도축적에 따른 적정 해상도 분석에 관한 연구. 한국지리정보학회지, **6**(3), pp. 1-10.
- 전만식(2007). 소양강댐 흙탕물저감대책. 강원도발전연구원 연구보고서.
- 한경수, 김영주, 최수명(2006). 한계농지개발사업의 개발전망과 활성화 방안. 한국농촌계획학회지, **12**(4), pp. 33-42.
- 허성구, 김재영, 유동선, 김기성, 안재훈, 윤정숙, 임경재(2007). 객토 농경지의 토양특성을 고려한 도암댐 유역에서의 수문 및 유사 거동 모의. 한국농공학회지, **49**(2), pp. 49-60.
- 현근우, 허범녕, 허인량, 정원구, 고상열, 이석중, 이태욱, 박성빈, 김영진, 김성석(2008). 이중원통형침사지를 이용한 고랭지밭 흙탕물 농도 저감에 관한 연구. 강원도보건환경연구원 보고서.
- Ashish Pandey, Chowdary, V. M., Mal, B. C., Billib, M. (2008). Runoff and Sediment Yield Modeling from a Small Agricultural Watershed in India Using the WEPP Model. *Journal of Hydrology*, **348**, pp. 305-319.
- Donigian, 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.
- Gete, Z., Winter, T. and Flanagan, D., BPCDG: Breakpoint Climate Data Generator for WEPP Using Observed Standard Weather Data Sets (2000). <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/BPCDG.html>.
- Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J. D. and Kim, K. S. (2005). GIS-based sediment assessment tool. *CATENA*, **64**(1), pp. 61-80.
- Quirijn de Jong van Lier, Gerd Sparovek, Dennis C. Flanagan, Elke M. Eloem, Ewald Schnug. (2005). Runoff Mapping Using WEPP Erosion Model and GIS Tools, *Computers & Geosciences*, **31**, pp. 1270-1276.
- 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.
- 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 sedimentyield 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.