

다양한 강우강도 및 패턴에 따른 WEPP 모형의 유출·침투유출·토양유실량 평가

Evaluation of Runoff·Peak Rate Runoff and Sediment Yield under Various Rainfall Intensities and Patterns Using WEPP Watershed Model

최재완* / 류지철** / 김익재*** / 임경재****

Choi, Jaewan / Ryu, Ji Chul / Kim, Ik Jae / Lim, Kyoung Jae

Abstract

Recently, changes in rainfall intensity and patterns have been causing increasing soil loss worldwide. As a result, the water ecosystem becomes worse and crops yield are reduced with soil loss and nutrient loss with it. Many studies have been proposed to estimate runoff and soil loss to predict or decrease non-point source pollution. Although the USLE has been used for many years in estimating soil losses, the USLE cannot reflect effects on soil loss of changes in rainfall intensity and patterns. The WEPP, physically based model, is capable of predicting soil loss and runoff using various rainfall intensity. In this study, the WEPP model was simulated for sediment yield, runoff and peak runoff using data of 5, 10, 30, 60 minute term rainfall, Huff's method and design rainfall. In case of rainfall interval of 5 minutes and 60 minutes, the sediment and runoff values decreased by 24% and 19%, respectively. The peak rate runoff values decreased by 16% when rainfall interval changed from 5 minutes to 60 minutes, indicating the peak rate runoff values are affected by rainfall intensity to some degrees. As a result of simulating using Huff's method, all values (sediment yield, runoff, peak runoff) were found to be the greatest at third quartile. According to the analysis under various design rainfall conditions (2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300 years frequency), sediment yield, runoff, and peak runoff of 906.2%, 249.4% and 183.9% were estimated using 2 year to 300 year frequency rainfall data.

Keywords : rainfall intensity, runoff, sediment yield, peak runoff, WEPP

요 지

최근 강우강도 및 패턴이 변화함에 따라 전세계적으로 토양유실이 증가하고 있다. 그 결과, 수생태계 건전성이 악화되고, 농업작물이 피해를 입어 수확량이 감소된다. 그동안 유출 및 토양유실을 예측하거나 비점오염원을 감소시키는 연구가 많이 수행되어왔다. USLE는 수년간 토양유실을 산정하는데 사용되어왔으나, 강우강도나 패턴변화를 적용하기에는 적절하

* 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 전문위원

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

*** 한국환경정책평가연구원 실장

Director, Division of Water and Environment, Korea Environment Institute, 290 Jinheungro, Eunpyeong-gu, Seoul, Korea

**** 교신저자, 강원대학교 지역건설공학과 교수 (e-mail: kjlim@kangwon.ac.kr)

Corresponding Author, Prof., Dept. of Regional Infrastructures Engrg., Kangwon National University, 1 Kangwondaehakgil, Chuncheon-si 200-701, Korea

지 못했다. 물리적 기반인 WEPP 모형은 다양한 강우강도 및 패턴변화를 적용하는데 적절하다. 본 연구에서는 WEPP 모형을 이용하여 Huff의 4분위, 다양한 강우간격, 설계강우에 따른 토양유실, 유출, 침투유출을 산정하였다. 5분간격 강우 데이터와 60분 간격 강우 데이터를 비교한 결과 토양유실은 24%, 유출은 19%, 침투유출은 16%가 차이 나는 것으로 나타났다. 유출 및 토양유실이 5분 간격 강우량에서 실측치와 가장 유사한 것으로 나타나 강우데이터의 간격이 짧을수록 더 정확하게 모의할 수 있는 것으로 나타났다. Huff의 4분위를 이용하여 토양유실량, 유출량, 침투유출량을 산정한 결과 토양유실량, 유출량, 침투유출량 모두 3분위에서 가장 높게 발생하는 것으로 나타났다. 강원도 홍천지역 빈도별 확률강우를 이용하여 토양유실량, 유출량, 침투유출량의 변화를 모의하였다. 2년 빈도와 300년 빈도에서 강우량은 167% 증가하였다. 유사량과 유출량, 침투유출량은 각각 906.2%, 249.4%, 183.9% 증가하여 유사량의 증가율이 가장 큰 것으로 나타났다. 본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 WEPP 모형을 이용하여 향후 기후변화에 따른 유출 및 토양유실의 예측이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강우강도, 유출, 침투유출, 토사유출, WEPP

1. 서론

우리나라의 경우 강우의 계절적 분포가 여름철에 집중되어 있고 최근의 기상이변에 의해 수해가 반복적으로 일어나고 있는 실정이다. 1987년 태풍 쉘마(Thelma), 1995년 재니스(Janis), 1998년 야니(Yanni), 2002년 루사(Rusa), 2003년 매미(Maemi) 그리고 2006년의 에위니아(Ewiniar)에 이르기까지 과거 20년 동안의 지속적인 수해피해를 들 수 있으며, 특히 90년대 중반 이후 국지성 집중호우에 의한 홍수피해 발생빈도가 급격히 증가하는 추세이다. 이러한 강우량의 증가는 총 유출량의 증가와 더불어 침투유출을 증가시키고, 홍수도달시간을 짧게 하여 침수 등의 홍수재해를 유발한다(김상민 등, 2009). 이러한 재해증가 추세는 도시지역 뿐만 아니라 농업지역 특히, 경사가 급한 고랭지 농업지역에서 농작물 피해와 수생태계 환경을 악화시키는 요인이 된다. 강우패턴의 변화로 인한 국지성 집중호우의 증가는 농경지 내 토양유실을 증가시켜 하천의 탁수문제를 가속화시킨다. 이렇게 발생한 탁수환경은 수서생물에 영양분을 공급하는 역할을 하기도 하지만 자연재해의 원인이 되기도 하고 수질을 악화시키기도 한다. 따라서 물속에 분포하는 부유성 물질의 종류와 양, 공간적 분포 파악은 수질문제와 재난 예방 및 생물의 서식환경 문제를 파악하고 해결하는데 매우 중요하다(신형섭 등, 2009). 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(최재완 등, 2009). 기존에 토양유

실 모의를 위한 범용토양손실공식(Universal Soil Loss Equation, USLE; Wischmeier and Smith, 1987), USLE 기반 Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC; Lim et al., 2005), 범용토양손실공식을 수정한 개정범용토양손실공식(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE; Renard et al., 1997), 단일강우에 따른 유사량을 산정하기 위한 수정 범용토양손실 공식(Modified Universal Soil Loss Equation, MUSLE; Williams, 1975) 등이 사용되었으나, 이러한 모형들은 사용자 편의성을 위해 총 강우량을 이용한 추계학적 방법을 사용하기 때문에 단일강우 내의 패턴 및 강도변화에 따른 토양유실량 추정이 어려웠다. 토양분리과정은 과거에 강우로 인한 지하수 위 상승으로 간극수압이 증가하고 이로 인해 전단강도가 감소하여 토양이 지면으로부터 분리되는 것으로 가정하였으나 최근에는 불포화상태의 지반에서는 강우에 의한 침윤 전선의 진행에 의해 모관흡수력이 감소되고 이로 인해 전단강도가 감소하는 현상이 원인으로 알려져 있다(Fredlund and Rahardjo, 1995). 이에 따라 침윤전선의 진행에 영향을 미치는 강우강도와 패턴변화에 따른 토양유실량 추정이 필요하다. 미국 농무성 농업연구센터(USDA-ARS), 산림 연구센터(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. 국내의 WEPP 모형을 이용한 연구를 보면, 박상덕과 신승숙(2011)이 산불사면에 WEPP, RUSLE, SEMMA 3가지 모형을 적용하여 비교·평가하였고, 홍종선(2009)은 WEPP과 SEMMA를 이용하여 산지유역의 토사유출량을 분석하고, 소유역 분할에 대한 효과를 분석하였으며, 최재완 등(2009)이 고

랭지밭에 WEPP 모형을 적용하여 경사도별 토사유출량의 변화를 분석한 연구가 있다.

따라서 본 연구의 목표는 다양한 확률강우, 강우강도 및 Huff 4분위를 이용한 유출·침투유출·토양유실량의 변화를 비교·평가하는 것이며, 본 연구의 결과를 통해 수생태계 건전성 향상을 위한 정책 수립과 집중호우시의 피해를 예방하기 위한 대책수립의 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 연구 대상 지역의 선정

본 연구에서는 홍천군 내면 자운 4리, 8,485 m²의 고랭지 밭을 연구지역으로 선정하였으며 현근우 등(2008)에 의해서 측정된 유출 및 토양유실량 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 토양유

실량을 측정하기 위하여 11.3 m³ 용량의 침사지를 2기를 설치하였다(Fig. 2). 밭 경사도는 5.5%이다.

2.2 실측 유출량 및 유사량

현근우 등(2008)은 2007년과 2008년에 분단위 강우량과 유출량, 토사유출량을 측정하였다. 2007년과 2008년 측정된 자료를 분석해보면 20 mm/day 이상의 강우가 발생할 경우 홍천군 내면에 위치한 시험포에서 유출이 발생하여 토양유실이 발생하기 시작하였다. Tables 3 and 4는 2007년과 2008년 강우에 따른 총 토양유실량을 나타낸다. 2007년 침사지에 퇴적된 총 유사량은 31.09 ton이며, 부유 유사형태로 유실된 토양은 총 9.02 ton으로 분석되었다. 2008년 침사지에 퇴적된 총 유사량은 21.80 ton이며, 부유 유사형태로 유실된 토양은 총 5.37 ton으로 분석되었다.

2.3 WEPP 모형의 개요

WEPP 모형의 기상자료는 최대 및 최소기온, 태양복사

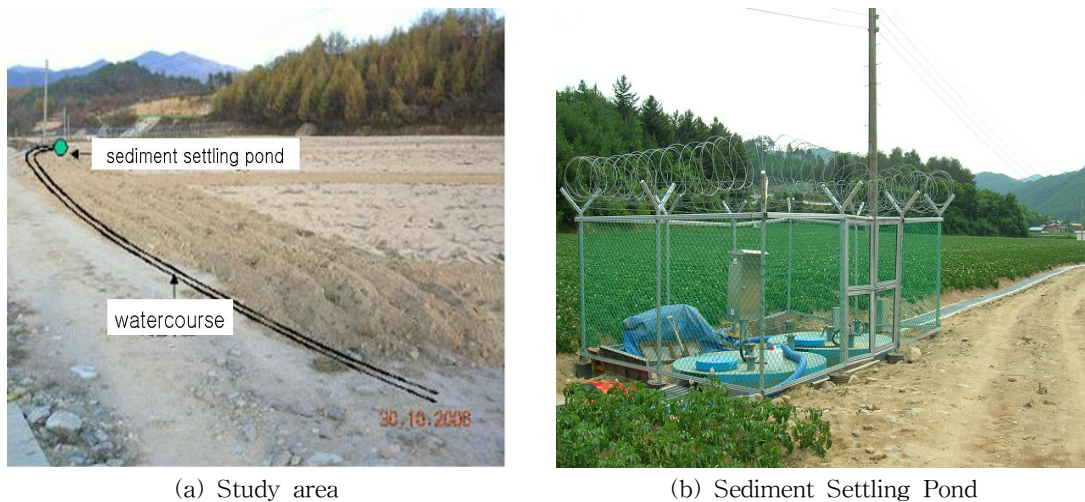


Fig. 1. Study Area and Sediment Settling Pond (Hyun et al., 2008)

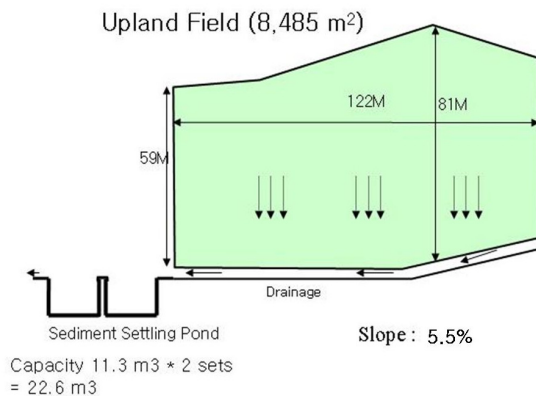


Fig. 2. Sediment Settling Pond (Hyun et al., 2008)

량, 풍속, 풍향, 이슬점 온도 등의 기후자료와 강우량, 지속시간, 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 실측자료로부터 모의자료까지 다양하게 이용할 수 있다 (Flanagan and Livingston, 1995). 지형자료는 경사지의 길이, 폭, 경사도에 관련된 자료이며, 실제 측량 성과나 지형도를 이용하여 입력한다. 단일 경사지에서 토성이나 작부체계가 다르면 몇개의 지표유출요소(Overland Flow Element, OFE)로 구분하여 지형자료를 입력한다. 토양자료는 모래, 점토, 유기물, 암석파편 함유율, 이온치환능(Cation Exchange Capacity, CEC) 등의 토양조성에 관련된 자료와 세류간, 세류 침식능, 한계전단응력 등의 토양 침식능에 관련된 자료, 토양의 유효수리전도도 등의 자료이다. 작물 및 재배관리 자료는 경운장비 및 일시, 작물재배 기간, 재배작물 종류, 수확일시, 잔류물 처리 등에 관련된 포장운영에 대한 정보를 포함한다(손정호, 2002).

2.4 WEPP 토양, 작물, 그리고 유역관련 DB 구축

WEPP 모형을 이용하여 토양유실량을 예측하기 위해서는 정확한 토양 속성 DB를 구축해야 한다. WEPP 모형의 경우 연구 대상 지역의 정확한 토성을 고려하여 토양 DB를 구축해야 보다 정확한 토양유실 평가가 가능하다. 최재완 등(2009)은 대상 지역의 “ANRYONG” 토양을 이용하였으며, 2008년 객토된 토양의 토성을 반영하기 위하여 기존 토양DB 표층에 30cm의 사질토 속성 객토 레이어를 추가하였다. 또한 WEPP 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 최재완 등(2009)은 2007년에는 감자, 2008년에는 무를 작물 DB에 구축하였다.

연구 대상 지역에 WEPP 모형을 적용하기 위해서 고려해야 할 부분이 각 농경지에서의 유출수가 어떻게 합류되는지 유역구분을 정확하게 하는 것이다. 최재완 등(2009)은 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 유시량 예측 정확성 평가

최재완 등(2009)은 연구대상 지역에서 2007년 7월 19일부터 2008년 8월 22일까지 실측된 유출량 자료를 이용하여 WEPP 모형 예측 유출량 자료와 비교분석하였다. WEPP 모형의 정확성 평가시 사용된 유출관련 매개변수는 유효수리전도도로서 10 mm/h를 사용하였고, 토양유실 관련 매개변수는 세류 침식능과 세류간 침식능으로서 각각 0.0007 s/m, 0.000002 kg·s/m⁻¹를 사용하였다. WEPP 모형에 의한 예측 유출량과 실측 유출량 비교한 결과 결정계수는 0.88, 유효지수는 0.91 (Fig. 3)로 높은 수치를 나타냈다. 또한 최재완 등(2009)은 연구기간동안 실측된 토양유실량을 이용하여 WEPP 모형 예측 토양유실량 자료와 비교분석하였다. Fig. 4는 실측 토양유실량과 예측 토양유실량을 비교 평가한 것이다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 예측치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

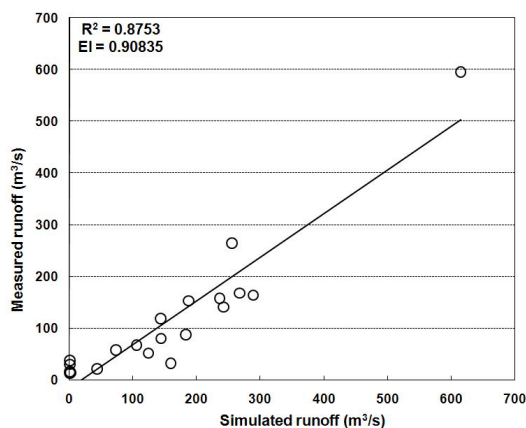


Fig. 3. R² and Nash-Sutcliffe of Runoff Estimation (Choi et al., 2009)

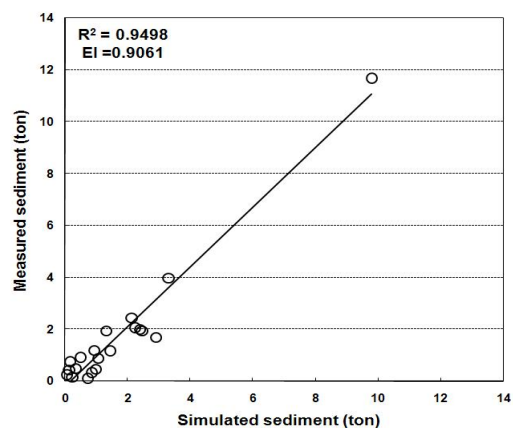


Fig. 4. R² and Nash-Sutcliffe of Sediment Estimation (Choi et al., 2009)

2.6 다양한 강우단위별 비교 평가- 유사·유출·침투 유출량

WEPP 모형을 이용하여 연구기간 동안 유사·유출·침투 유출량 모의를 위하여 분단위 강우량 자료를 5분, 10분, 30분, 1시간 간격으로 설정하여 새로운 기상자료를 생성하였다. 40.5 mm의 강우가 발생한 2007년 7월 19일의 평균 강우강도를 비교해보면 5분단위 강우량에서 6.8 mm/h, 10분단위 강우량에서 4.2 mm/h, 30분단위 강우량에서 2.7 mm/h, 1시간단위 강우량에서 2.2 mm/h로 산정되어, 5분 단위 강우량과 1시간단위 강우량의 강우강도가 4.6 mm/h 차이나는 것으로 나타났다. 이렇게 생성된 기상자료를 WEPP 모형에 적용하여 유사·유출·침투 유출량을 비교·평가하였다.

2.7 Huff 4분위법을 이용한 유사, 유출, 침투 유출량 모의

지금까지 설계 강우의 시간분포 방법에는 여러 가지 방법들이 개발되어 사용되어오고 있다. 그 중에서 국내에서 주로 이용하고 있는 방법에는 Mononobe 방법, Keifer와 Chu 방법, Yen과 Chow 방법, 교호 블록 방법, Huff의 4분위법 등이 있다. 그 중에서 본 연구에서 이용한 Huff의 4분위법의 이론적 배경을 살펴보면 다음과 같다(이정규와 추현재, 2006).

2.7.1 Huff 4분위법

1967년 Huff는 미국 Illinois주의 강우기록을 통계학적으로 분석하여 강우량의 시간적 분포를 나타내는 무차원 시간분포곡선을 제시하였다. 이는 강우의 누가곡선을 이용하여, 전 지속시간을 4등분 하였을 때 최대강우가 각 분류된 구간의 어느 부분에서 나타나는지 조사하였다. 즉, 강우지속시간을 4등분 하였을 때 강우 초기에 해당하는 처음 1/4구간을 제1구간 호우(First-quartile storm), 2/4구간에 있으면 제2구간호우(Second-quartile storm), 3/4구간에 있으면 제3구간 호우(Third-quartile storm), 그리고 마지막 구간일 경우에는 제 4구간 호우(Fourth-quartile storm)로 분류하였다.

이와 같이 4개 그룹으로 분류된 강우를 시간적으로 무차원화시키기 위하여 각각 강우의 누가 지속시간과 이에 따른 강우량을 각각 백분율로 표시하고, 이를 나타내면 다음 식과 같다.

$$PT(i) = \frac{T(i)}{T_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$PR(i) = \frac{R(i)}{R_0} \times 100\% \quad (2)$$

여기서,

PT(i) : 임의시간 T(i)에서의 강우지속시간 비

T(i) : 강우시작 후 i번째 시각의 경과시간

T₀ : 총 강우지속시간

i : 단위증분횟수

PR(i) : 임의시간 T(i)에서의 강우량 비

R(i) : 임의시간 T(i)까지의 누가강우량

R₀ : 지속시간 T₀의 총 우량

이와 같이 무차원 누가곡선을 이용하여 각 그룹에 속한 호우들을 분리하여 분석한다. 먼저, 제1구간 호우의 분석일 경우 각 지속시간 증분회수별로 각 확률을 추정하고 각 확률별로 시간분포를 추정한다. 동일한 방법으로 제2구간, 3구간, 4구간 호우를 차례로 분석한다. 이때 확률 누가곡선은 10%의 확률간격으로 작성하는 것이 일반적이다(이정규와 추현재, 2006).

2.8 확률강우에 의한 유사량, 유출량, 침투 유출량 변화

확률홍수량 산정, 수공구조물의 설계, 중소하천 정비기본계획 등에 사용되는 확률강우량은 실제 강우사상 자체뿐만 아니라 과거 자료를 이용하여 빈도 해석한 결과를 가지고 지점별로 작성하여 실무에 이용하여 왔다. 토양 유실 및 비점오염원 관리를 위한 대책과 저류지·침사지 설계시 확률강우량은 반드시 필요하지만, 현재 환경부(2008)의 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼에 따라 비점오염저감시설 설계시 설계강우량 5mm를 사용하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 건설교통부(2000)에서 제공하는 강원도 홍천군 지역의 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300년 빈도 확률강우량을 이용하여 유사·유출·침투 유출량의 변화를 모의하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 다양한 강우단위별 비교 평가- 유사량

총 18개의 Event에 대한 1분단위 강우량을 5분, 10분, 30분, 1시간 간격으로 설정하여 유사량의 변화를 비교·평가하였다. Table 1은 각 강우단위별 유사량을 정리한 것이다. 총 Event 발생 유사량은 5분간격 강우량에서 30.488 톤이고, 1시간 간격 강우량에서는 23.157톤으로 24%가 감소하는 것으로 나타났다. 실측치와 비교시 상대오차는 10분 간

Table 1. Simulated Sediment Yield with Various Interval Rainfall

Date	Rainfall (mm)	Observed sediment	5 min (kg)	10 min (kg)	30 min (kg)	1 hr (kg)
07.7.19	40.5	100.0	677.4	546.6	477.1	199.2
07.8.1~8.2	65.0	1950.0	1,930.5	1,912.2	1,857.1	1,840.8
07.8.4~8.5	93.0	2450.0	1,967.7	1,856.1	1,460.9	1,290.7
07.8.08	67.0	2050.0	1,819.7	1,772.8	1,739.7	1,687.4
07.8.09	137.0	11680.0	9,664.0	9,735.6	9,412.2	8,786.0
07.8.10	38.0	1210.0	727.6	686.8	681.5	285.2
07.8.19	34.5	480.0	886.4	856.7	769.9	525.2
07.8.27	52.0	1160.0	1,289.4	1,192.7	943.5	375.3
07.9.14~15	92.0	4000.0	2,821.4	2,848.7	2,057.3	1,751.4
07.9.18	52.0	1710.0	2,707.2	2,706.5	2,158.7	1,993.5
08.6.18	41.5	500.0	344.2	396.9	329	205.8
08.7.15~16	29.0	450.0	145.1	146.0	144.8	140.1
08.7.19~20	75.0	740.0	2,344.8	2,341.6	2,562.1	2,262.1
08.8.02	24.0	240.0	28.2	20.3	9.4	5.0
08.8.03	27.0	910.0	462.1	456.8	327.9	275.5
08.8.12	31.0	330.0	815.7	813.4	787.4	43.6
08.8.18	39.5	900.0	703.3	679.5	693.8	670.7
08.8.22	77.0	1960.0	1,153.6	1,128.6	974.6	819.5

격 강우량에서 0.12로 가장 작았고, 1시간 간격 강우량에서 0.34로 가장 크게 나타났다. 상대오차율은 측정값의 정밀도를 알 때 유용하며 작은 값이 더 정밀함을 나타낸다.

3.2 다양한 강우단위별 비교 평가-유출량

총 18개의 Event에 대한 1분단위 강수량을 5분, 10분 30분, 1시간 간격으로 설정하여 유출량의 변화를 비교·평가하였다. Table 2는 각 강우단위별 유출량을 정리한 것이다. 총 Event 발생 유출량은 5분 간격 강우량에서 2,312.5 m³ 이고, 1시간 간격 강우량에서는 1,873.8 m³으로 약 19%가 감소하는 것으로 나타났다. 실측치를 이용하여 상대오차 비교시 5분 간격 강우량에서 0.02로 가장 작았고 1시간 간격에서 0.18로 가장 높아 유사량 분석 결과와 같이 강수량 설정 간격이 작을수록 예측치가 실측치를 잘 반영하는 것으로 나타났다.

3.3 다양한 강우단위별 비교 평가-침투유출량

총 18개의 Event에 대한 1분단위 강수량을 5분, 10분 30분, 1시간 간격으로 설정하여 침투유출량의 변화를 비교·평가하였다(Table 3). 침투유출량은 유사량 및 유출량

에 비해 강우강도에 대한 영향을 많이 받았다. 2007년 8월 1~2일 65 mm의 강수량에서 0.40144 m/s의 침투유출이 발생하는데 비해 2007년 8월 4~5일 93 mm의 강수량에서는 0.31335 m³/s의 침투유출이 발생하였다. 2008년 8월 12일 5분단위 강수량과 1시간 단위 강수량의 차이는 66.6%로 가장 많은 차이를 보였다.

3.4 Huff 4분위법을 이용한 유사, 유출, 침투유출량 모의

강원도 홍천군 지역의 2007년, 2008년 최대 강우는 2008년 7월 24일에 기록된 215.0 mm이다. 이날 기록된 강우량을 Table 4와 같이 건설교통부(2000)의 Huff 4분위(Table 4)를 이용하여 각각의 분위별 유사량, 유출량, 침투유출량을 산정하였다. 산정 결과 유사량, 유출량, 침투유출량 모두 3분위에서 가장 높게 발생하였다(Table 5).

3.5 확률강우에 의한 유사량, 유출량, 침투유출량 변화

WEPP 모형으로 건설교통부(2000)의 강원도 홍천지역 2, 3, 5, 10, 20, 30, 50, 100, 200, 300년 빈도 확률강우를 이

Table 2. Simulated Runoff with Various Interval Rainfall

Date	Rainfall (mm)	Observed runoff	5 min (m ³)	10 min (m ³)	30 min (m ³)	1 hr (m ³)
07.7.19	40.5	13.0	62.91	44.54	40.68	37.06
07.8.1~8.2	65.0	164.0	186.81	184.61	180.38	180.01
07.8.4~8.5	93.0	168.0	209.68	189.70	155.33	138.58
07.8.08	67.0	141.1	176.08	173.07	172.35	172.00
07.8.09	137.0	596.0	404.47	399.44	398.17	384.20
07.8.10	38.0	80.1	59.37	57.70	52.36	46.28
07.8.19	34.5	52.0	85.95	82.10	74.75	43.82
07.8.27	52.0	153.0	130.81	121.21	92.39	70.10
07.9.14~15	92.0	265.0	207.50	187.30	174.37	151.34
07.9.18	52.0	175.0	151.31	149.29	143.68	137.55
08.6.18	41.5	21.0	37.51	37.98	35.23	24.70
08.7.15~16	29.0	30.0	18.04	17.97	17.94	17.93
08.7.19~20	75.0	88.0	175.72	175.14	166.24	165.64
08.8.02	24.0	16.0	6.52	5.38	3.23	2.40
08.8.03	27.0	58.0	52.31	51.62	38.59	34.64
08.8.12	31.0	32.0	90.26	90.22	84.88	70.32
08.8.18	39.5	67.0	74.25	73.77	70.87	69.62
08.8.22	77.0	119.0	183.01	171.87	140.46	127.59

Table 3. Comparison of Simulated Peak Runoff under Various Interval Rainfall

Date	Rainfall (mm)	5 min (m ³ /s)	10 min (m ³ /s)	30 min (m ³ /s)	1 hr (m ³ /s)
07.7.19	40.5	0.16196	0.12143	0.11259	0.10418
07.8.1~8.2	65.0	0.40144	0.39749	0.38989	0.38921
07.8.4~8.5	93.0	0.31335	0.30978	0.31096	0.31254
07.8.08	67.0	0.38211	0.37665	0.37536	0.37472
07.8.09	137.0	0.76459	0.75664	0.75463	0.73249
07.8.10	38.0	0.15910	0.15432	0.15068	0.12537
07.8.19	34.5	0.21010	0.20221	0.18701	0.11978
07.8.27	52.0	0.29822	0.27986	0.22314	0.18937
07.9.14~15	92.0	0.36172	0.34784	0.32124	0.28119
07.9.18	52.0	0.33672	0.33297	0.32250	0.31098
08.6.18	41.5	0.10520	0.10630	0.09984	0.07425
08.7.15~16	29.0	0.05713	0.05696	0.05687	0.05683
08.7.19~20	75.0	0.38038	0.38144	0.36419	0.36309
08.8.02	24.0	0.02445	0.02082	0.01507	0.01063
08.8.03	27.0	0.13885	0.13732	0.10773	0.09845
08.8.12	31.0	0.21884	0.21875	0.20791	0.07309
08.8.18	39.5	0.18594	0.18494	0.17885	0.17622
08.8.22	77.0	0.39460	0.39207	0.37446	0.31645

Table 4. Huff's Quartile Storm Rate (Ministry of Construction & Transportation, 2000)

Quartile	10 (%)	20 (%)	30 (%)	40 (%)	50 (%)	60 (%)	70 (%)	80 (%)	90 (%)	100 (%)
1st	17.9	41.8	58.5	66.7	73.3	79.5	84.8	90.4	95.5	100
2nd	4.6	12.2	29.1	47.7	65.4	80.0	89.2	93.4	96.9	100
3rd	3.8	9.1	14.4	21.5	35.2	54.4	74.9	87.6	95.6	100
4th	6.8	13.6	20.0	25.0	30.1	34.6	43.8	60.0	83.1	100

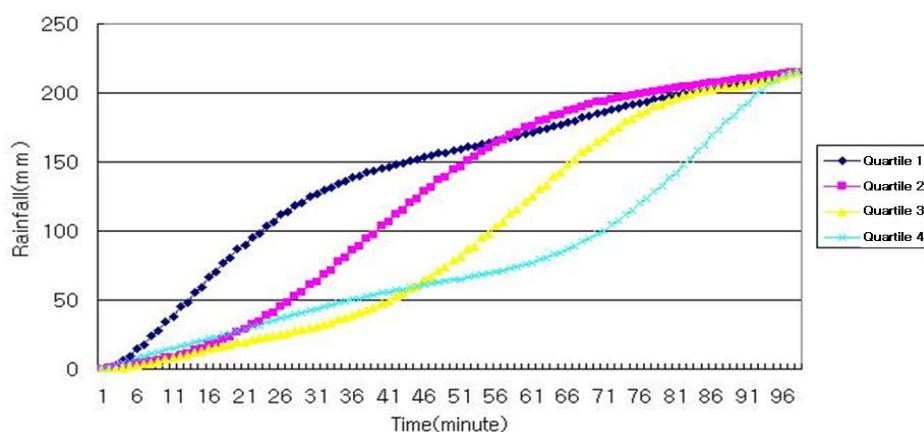


Fig. 5. Measured Rainfall Using Huff's Method at Hong-Cheon

Table 5. Comparison of Sediment, Runoff, Peak Runoff Generation Estimated Using Huff's Method

Quartile	Sediment Yield (kg)	Runoff (m ³)	Peak runoff (m ³ /s)
1st	24,659.0	1,269.48	1.04012
2nd	25,141.6	1,262.78	1.03554
3rd	25,375.4	1,280.58	1.04770
4th	24,642.9	1,269.62	1.04021

Table 6. Comparisons of Sediment, Runoff, Peak Runoff Generation under Various Design Rainfall

Frequency (year)	Probability Rainfall (mm)	Sediment Yield (kg)	Runoff (m ³)	Peak Runoff (m ³ /s)
2	98.4	2,486.2	529.98	0.50199
3	114.9	4,531.4	656.74	0.60031
5	133.3	6,642.0	810.90	0.71573
10	156.5	9,761.6	998.87	0.85166
20	178.6	12,740.1	1,175.77	0.97572
30	191.3	14,363.2	1,278.03	1.04601
50	207.3	16,930.2	1,406.18	1.13278
100	228.8	19,662.0	1,578.82	1.24764
200	250.3	23,286.2	1,751.60	1.36053
300	262.8	25,016.2	1,851.93	1.42522

용하여 유사량, 유출량, 침투유출량의 변화를 모의하였다. 2년 빈도 강우량에서 300년 빈도까지 강우량은 167% 증가하였다. 유사량과 유출량, 침투유출량은 각각 906.2%, 249.4%, 183.9% 증가하여 유사량의 증가율이 가장 큰 것으로 나타났다(Table 6). 위의 동일한 강우량에서 강우단위별 평가는 침투유출량의 가장 크게 변화하는 것으로 나타났다으나, 확률강우의 경우 강우량이 변화함에 따라 유사량이 가장 크게 변화한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구의 목적은 물리적 기반 모델인 WEPP 모형을 이용하여 정확성이 평가된 연구 대상 지역에서의 실측 분단위 강우량을 다양한 강우강도 조건 하에서의 유출량과 토양유실량 모의와 집중호우시 유출, 침투유출 및 토양유실의 변화를 평가, 빈도 별 유출 및 침투유출의 변화를 비교·평가하는데 있다.

본 연구의 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 정확성이 평가된 연구지역의 다양한 강우단위(5분, 10분, 30분, 1시간)별 산출된 결과를 비교하였다. 총 Event 발생 토양유실량은 5분 간격 강우량에서 31톤이고, 1시간 간격 강우량에서는 23톤으로 약 24%가 감소하는 것으로 나타났다. 유출량은 5분간격 강우량에서 2312.5 m³이고, 1시간 간격 강우량에서는 3,860.75 m³으로 약 19%가 감소하였다. 침투유출량은 토양유실량 및 유출량에 비해 강우강도에 대한 영향을 많이 받았다. 2007년 8월 1~2일 65mm의 강수량에서 0.40144 m³/s의 침투유출이 발생하는데 비해 2007년 8월 4~5일 93mm의 강수량에서는 0.31335 m³/s의 침투유출이 발생하였다. 유출 및 토양유실이 5분간격 강우량에서 실측치와 가장 유사한 것으로 나타나 강우데이터의 간격이 짧을수록 더 정확히 모의할 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 강원도 홍천군 지역 Huff의 4분위를 이용하여 2007, 2008년에 지역 내 발생한 최대 강우량인 215mm에 대한 토양유실량, 유출량, 침투유출량을 산정하였다. 산정 결과 토양유실량, 유출량, 침투유출량 모두 3분위에서 가장 높게 발생하는 것으로 나타났다.
- 3) 건설교통부(2000)의 강원도 홍천지역 빈도별 확률강우를 이용하여 토양유실량, 유출량, 침투유출량의 변화를 모의하였다. 2년 빈도와 300년 빈도에서 강우량은 167% 증가하였다. 유사량과 유출량, 침투유

출량은 각각 906.2%, 249.4%, 183.9% 증가하여 유사량의 증가율이 가장 큰 것으로 나타났다.

현재 비점오염저감시설 설계시 환경부(2008)에 따라 누적유출고로 환산한 설계강우량(5mm 이상)을 이용하여 수질처리용량을 산정하도록 되어있다. 많은 시설들이 설계강우량을 5mm로 적용하여 설계하고 있기 때문에 초기우수에 다량의 비점오염원이 발생하지 않는 발지역의 경우 이러한 기준이 모호한 경우가 많다. 본 연구의 결과에서 보이는 바와 같이 WEPP 모형을 이용하여 다양한 강우조건에서의 토양유실량, 유출량, 침투유출량의 예측이 가능하다. 본 연구의 결과와 도출과정을 통해 비점오염저감을 위한 정책과 기준을 마련하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 Eco-Star Project (과제번호: EW32-07-10, 부담(생태호 조성기술 및 생태복원 기술개발)의 연구비 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부 (2000). 수자원 관리기법개발연구조사 보고서 : 지역적 설계 강우의 시간적 분포. 한국건설기술연구원.
- 김상민, 임상준, 이상호, 김형호, 마호섭, 정원옥 (2009). "국립공원내 홍수피해 저감을 위한 미계측 산림지역의 설계 홍수량 추정." **한국농공학회논문집**, 한국농공학회, 제51권, 제5호, pp. 107-113.
- 박상덕, 신승숙 (2011). "산불사면에 대한 토양침식모형의 적용 평가-RUSLE, WEPP, SEMMA." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제31권, 제3B호, pp. 221-238.
- 손정호 (2002). WEPP 모형을 이용한 토양유실량 추정. 석사학위논문, 서울대학교.
- 신형섭, 이규호, 박종화 (2009). "모래와 실트의 탁수에 대한 분광특성 분석." **한국농공학회논문집**, 한국농공학회, 제51권, 제3호, pp. 37-43.
- 이정규, 추현재 (2006). "Huff의 4분위법을 이용한 지속기간별 연 최대치 강우의 시간분포 특성연구." **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제5B호, pp. 519-528.
- 최재완, 현근우, 이재운, 신동석, 김기성, 박윤식, 김종건, 임경재 (2009). "WEPP Watershed Version을 이용한 홍천군 자운리 농경지 토양유실 예측 및 경사도에 따른 토양유실량 평가." **수질보전 한국물환경학회지**, 수질

보전 한국물환경학회, 제25권, 제3호, pp. 441-451.

홍종선 (2009). WEPP과 SEMMA를 이용한 산지유역 토사유출량 예측과 소유역 분할 효과. 석사학위논문, 강릉대학교.

환경부 (2008). 비점오염저감시설의 설치 및 관리·운영 매뉴얼. 환경부.

현근우, 허범녕, 허인량, 정원구, 고상열, 이석중, 이태욱, 박성빈, 김영진, 김성석 (2008). 이중원통형침사지를 이용한 고랭지밭 흙탕물 농도 저감에 관한 연구. 강원도보건환경연구원 보고서.

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

Fredlund, D.G., and Rahardjo, H. (1995). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley and Sons, INC.

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.

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 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: 11-125	접수: 2011.11.26
수정일자: 2012.01.04/05.23	심사완료: 2012.05.23