

GeoWEPP을 이용한 침엽수림 지역 유출특성 예측 및 다양한 식생 피도에 따른 유출량 평가

최재완 · 신민환* · 천세익 · 신동석 · 이성준 · 문선정 · 류지철* · 임경재*†

국립환경과학원 수질총량연구과

*강원대학교 지역건설공학과

Evaluation of Runoff Prediction from a Coniferous Forest Watersheds and Runoff Estimation under Various Cover Degree Scenarios using GeoWEPP Watershed Model

Jaewan Choi · Min Hwan Shin* · Se Uk Cheon · Dongseok Shin · Sung Jun Lee · Sun Jung Moon · Ji Cheol Ryu* · Kyoung Jae Lim*†

National Institute of Environmental Research

*Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

(Received 24 February 2011, Revised 3 May 2011, Accepted 20 May 2011)

Abstract

To control non-point source pollution at a watershed scale, rainfall-runoff characteristics from forest watersheds should be investigated since the forest is the dominant land use in Korea. Long-term monitoring would be an ideal method. However, computer models have been utilized due to limitations in cost and labor in performing long-term monitoring at the watersheds. In this study, the Geo-spatial interface to the Water Erosion Prediction Project (GeoWEPP) model was evaluated for its runoff prediction from a coniferous forest dominant watersheds. The R^2 and the NSE for calibrated result comparisons were 0.77 and 0.63, validated result comparisons were 0.92, 0.89, respectively. These comparisons indicated that the GeoWEPP model can be used in evaluating rainfall-runoff characteristics. To estimate runoff changes from a coniferous forest watershed with various cover degree scenarios, ten cover degree scenarios (10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%) were run using the calibrated GeoWEPP model. It was found that runoff increases with decrease in cover degree. Runoff volume was the highest (206,218.66 m³) at 10% cover degree, whereas the lowest (134,074.58 m³) at 100% cover degree due to changes in evapotranspiration under various cover degrees at the forest. As shown in this study, GeoWEPP model could be efficiently used to investigate runoff characteristics from the coniferous forest watershed and effects of various cover degree scenarios on runoff generation.

keywords : Cover degree, Forest, GeoWEPP, Runoff

1. 서론

오염원은 크게 점오염원(Point Source: PS)과 비점오염원(Non Point Source: NPS)으로 구분한다. 점오염원은 공장, 가정하수, 산업폐수, 축산 농가 등 일정한 구역에서 발생하는 오염원을 말하며, 비점오염원은 논, 밭, 임야 등 강우시 배출구역이 일정하지 않은 광범위한 유역에서 배출경로를 통해 발생하는 오염원을 말한다. 과거 우리나라는 수질개선을 위해 도시하수, 산업폐수 등과 같은 점오염원을 중심으로 하수관거 및 처리시설 확충 등의 시설처리를 확충하였으나 수질개선의 큰 효과를 나타내지 않자, 비점오염원으로 시선을 전환하여 수질개선을 위한 노력을 하고 있다(환경부, 2006).

현재 비점오염원의 정량화를 위하여 정부에서는 지목별 모니터링을 통하여 원단위를 산정하고 있으며, 이를 이용해 수질개선을 위한 수질오염총량관리를 더욱 효과적으로 운영·평가하기 위한 노력을 하고 있다. 비점오염원의 정량화를 위해 가장 중요한 것은 강우시 유출특성을 파악하는 것이다. 특히, 전 국토의 70% 이상을 차지하고 있는 산림에서 발생하는 유출수는 하천과 호소의 원천지이므로(오종민과 신동엽, 1999) 산림유역에서의 강우에 따른 유출특성을 파악하는 것이 중요하다.

산림지역 유출수는 하천이나 호소 등과 비교하여 폭이 좁고, 경사가 급해서 체류시간이 짧고, 강우나 주변 토지이용도, 하상구조성분 및 산림의 임상에 따라 많은 영향을 받는다(Hutchinson et al., 1986). 이러한 산림 유출 특성은 장기적인 모니터링을 수행하여 파악하는 것이 가장 정확한 방법이다. 하지만 지형·작물·시간·강우 패턴 등의 다양한 조건에서 모니터링을 수행하는 것이 어려우며, 지점 선정·

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

장비구입·인건비 등 많은 비용이 요구되어 모델링을 통해서·공간적으로 유출 특성을 평가하고자 하는 연구들이 활발히 진행 중이다. 그동안 유출 특성 예측을 위해 전 세계적으로 미국 토양보존국(U.S. Soil Conservation Service: SCS), 현재 미국 자연자원보호청(Natural Resources Conservation Service: NRCS)에서 제안한 유출곡선지수를 이용한 유출량 산정방식이 널리 사용되고 있다(SCS, 1972). 그러나 유출곡선지수를 이용한 유출량 산정방식 모델들(SWAT, WMS, HEC-HMS, L-THIA 등)은 일강수량을 사용하여 유출 특성을 예측하기 때문에 정확한 강우강도를 반영하기가 어려웠다.

미국 농무성 농업연구센터(USDA) Agricultural Research Service (ARS), Forest Service, NRCS 연구자들에 의해서 개발된 물리적 기반 모델인 Water Erosion Prediction Project (WEPP; Flanagan and Livingston, 1995) 모형은 연속적인 모의가 가능하며 분단위 강수, 단일 강우사상에 대해서도 유출 특성 예측이 가능하다. 더욱이 Geographic Information System (GIS)와 연계하여 WEPP의 구동이 가능하게 된 GeoWEPP (Renschler, 2003)이 개발됨에 따라 복잡한 유역에서의 WEPP 모형의 입력 데이터 구축이 쉬워졌다. 최근 들어 ArcGIS 9.x 버전 WEPP 모형의 GIS 인터페이스가 개발되었다(Renschler, 2007). 강수량과 강우강도 및 패턴의 변화가 산림지역의 유출경로와 체류시간에 영향을 주기 때문에 다양한 강우 조건에서 GeoWEPP 모형 적용성을 평가하는 것이 필요하다.

따라서 본 연구의 목표는 1) GeoWEPP 모형을 이용하여 침엽수림의 유출량을 모의하여 실측 유출량과의 비교·평가를 통해서 GeoWEPP 모형의 적용성을 평가하는데 있으며, 2) 식생 피도에 따른 유출 특성을 평가하여 비점오염원 저감기법 개발과 수질오염총량관리제 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. WEPP 모형

2.1.1. 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-용설 부모형(Winter process Component), 고정된 스프링클러나 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) 사면 침식과 퇴적 부모형(Hillslope Erosion and Deposition Component), 복합사면과 수로로 이루어진 유역에서의 수문학 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).

2.1.2. WEPP 모형의 입력 자료

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 실측자료로부터 모의자료까지 다양하게 이용할 수 있다(Flanagan and Livingston, 1995). WEPP 모형은 CLIGEN이라는 기상 생성 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(Gete et al., 2000). 지형자료는 경사장의 길이, 폭, 경사도에 관련된 자료이며, 실제 측량 성과나 지형도를 이용하여 입력한다. 단일 경사지에서 토성이나 작부체계가 다르면 몇 개의 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 토양침식능에 관련된 자료, 토양의 유효수리전도도 등의 자료이다. 작물 및 재배관리 자료는 경운장비 및 일시, 작물재배기간, 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(손정호, 2002; Flanagan and Livingston, 1995).

2.2. 연구 대상 지역의 선정

본 연구의 대상 지역은 전북 진안군 진안읍 연장리에 위

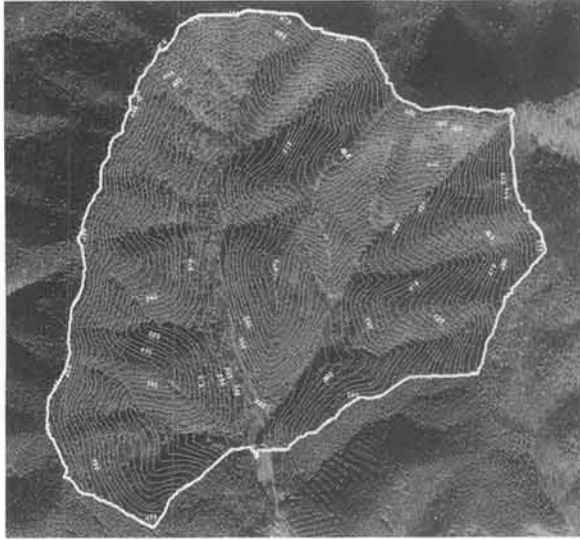


Fig. 1. The coniferous forest watershed.

치하고 있으며, 리기다 소나무가 주종으로 3영급 인공림에 해당한다. 유역면적은 0.377 km²의 유역경계 면적이 두개의 산지하천으로 이루어져서 측정지점으로 유입된다. 표고는 330~540 m, 경사는 15~40°의 범위이다. 토성은 주로 사양토이며, 모암은 사암과 혈암으로 구성되어있다. Fig. 1은 침엽수림 유역을 나타내며, Fig. 2는 유역 출구에 설치된 저류조 및 유량관측용 120° V-notch 위어의 모습이다 (금강물환경연구소, 2008).

2.3. 강우량 및 유량 측정

본 연구에서는 침엽수림에서 강우시 발생하는 강우-유출 관계를 분석·평가하기 위하여 현장에 모니터링 장비를 설치하였다. 수위 측정을 위한 부자식 수위계(Thalimedes)와 샘플 채취를 위하여 ISCO 6712 sampler를 설치하였고, 정확한 강우패턴을 조사하기 위해 전도형 강우계와 중량 측정



Fig. 2. 120° V-notch weir.

형 자기유량계, 우설량 계수기, 강수기록계를 설치하여 강우량을 조사하였다(Fig. 3).

2.4. GeoWEPP 기상 자료 구축

본 연구에서는 GeoWEPP을 이용하여 임상별 강우-유출 관계를 분석하기 위하여 현지에서 실측한 자료와 기상청의 지역별 상세 관측자료(AWS)를 이용하여 기상자료를 구축하였다. 일반적으로 기상 자료는 최대 및 최소기온, 태양복사량, 풍속, 풍향, 이슬점 온도 등 기후자료와 강우량, 지속시간, 5분 최대 강우강도 및 시간 등의 강우자료를 이용하여 구축하지만, 본 연구에서는 더욱 정확한 강우강도를 반영하기 위하여 Break Point Climate Data Generator (BPCDG)를 이용하여 Breakpoint data 형태의 시강우 데이터를 구축하였다. Fig. 4는 침엽수림 지점의 2009년 1월 1일부터 2009년 10월 31일까지의 최고·최저온도 및 강우량을 나타낸다.



(a) Rainfall and snow gauge



(b) Rainfall gauge and flow meter

Fig. 3. Monitoring equipment.

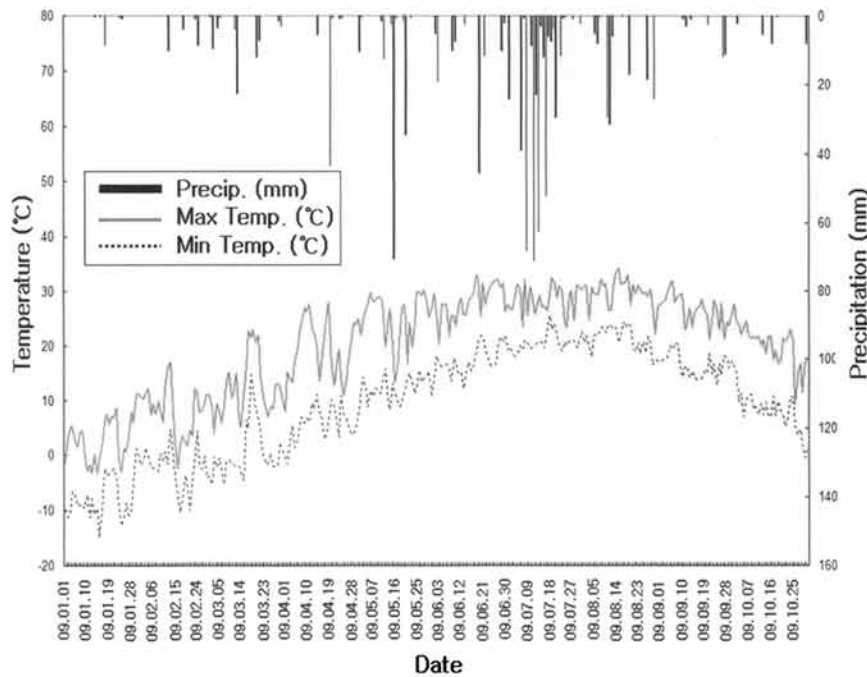


Fig. 4. Precipitation, maximum and minimum temperature at the coniferous forest watershed.

2.5. GeoWEPP 지형, 토양, 식생/관리 자료 구축

2.5.1. 지형자료 입력

기존 WEPP 모형의 경우 대상 지역에 대한 입력자료를 모두 입력해야 하지만, GIS 기반의 GeoWEPP 모형은 GIS 공간자료로부터 지형, 경사, 유로 등과 같은 입력정보를 자동으로 추출하여 입력자료로 활용한다. 본 연구에서는 대상 유역의 수치지도를 이용하여 DEM (Digital Elevation Model)을 구축한 후, 이를 ASCII 파일 형식으로 변환하여 WEPP 모형의 입력자료로 활용하였다. 국립지리정보원에서 구축한 1:25,000 수치지도를 이용하여 각 임상별 연구지역에 대해 구축한 DEM (5 m×5 m)은 Fig. 5와 같다.

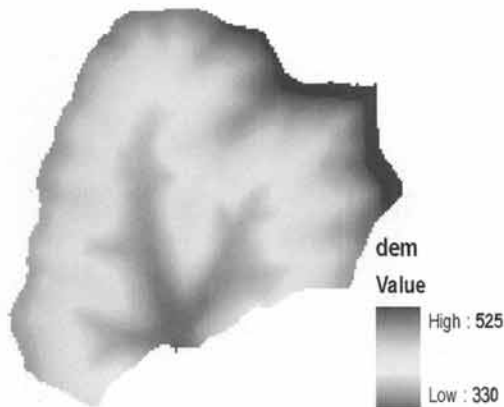


Fig. 5. DEM of the coniferous Forest Watersheds.

2.5.2. 토양자료 입력

WEPP 모형의 입력자료로 사용되는 토양자료는 한국토양정보시스템(2005)의 자료를 이용하여 구축하였다. 토양 입력자료에는 토양분류, Albedo, 초기 포화도, 세류간 침식능,

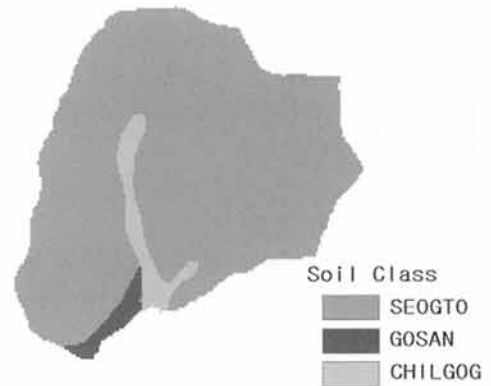


Fig. 6. Soil map of the coniferous Forest Watersheds.

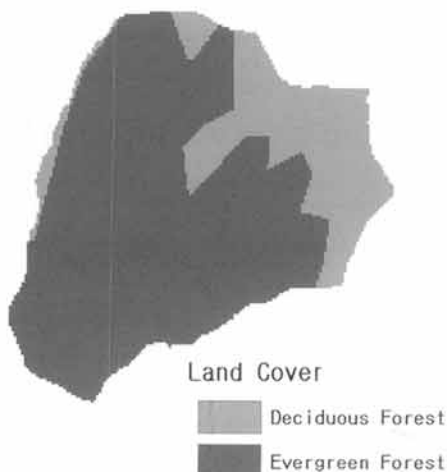
세류 침식능, 한계 수리전단응력, 유효수리전도도, 토양(모래, 점토, 유기물, 양이온 치환능, 암석)비율 등이 포함된다. GeoWEPP 모델에서는 ASCII 파일 형식의 토양도를 이용하여 WEPP에서 구축된 토양 자료를 불러들인다. Fig. 6은 GeoWEPP에서 사용된 각 연구지역 토양도이다.

2.5.3. 식생·관리자료 입력

식생 및 관리 자료는 WEPP 인터페이스를 이용하여 구축한 후 GeoWEPP 모형에서 사용하였다. WEPP에서 식생/관리자료 자료구축 시 초기조건, 식생성장, 경작활동, 관개, 배수 등 식생피복에 관련된 매개변수가 필요하다. 본 연구에서는 WEPP에서 제공하고 있는 매개변수를 이용하여 침엽수와 활엽수의 기본 자료를 구축하였다(Table 1, Fig. 7). WEPP 모델에서 식생 매개변수는 6가지(식물 성장과 수확 매개변수, 온도와 태양복사 매개변수, 엽면적지수와 뿌리 매개변수, 노화 매개변수, 잔류물 매개변수 그리고 기타 매개변수)로 구성되어 있다.

Table 1. Parameters of deciduous and coniferous forest

Parameter	Units	Deciduous forest	Coniferous forest
Biomass energy ratio	kg/MJ	150	5
Growing degree days to emergence	°C.days	5	5
Growing degree days for growing season	°C.days	0	0
In-row plant spacing	cm	500	500
Plant stem diameter at maturity	cm	50	50
Height of post harvest standing residue; Cutting height	cm	50	50
Harvest Index (dry plant yield/total above ground dry biomass)	%	0	0
Base daily air temperature	°C	5	5
Optimal temperature for plant growth	°C	25	25
Maximum temperature that stops the growth of a perennial plant	°C	30	30
Critical freezing temperature for a perennial plant	°C	0	-40
Radiation extinction coefficient		0.65	0.65
Canopy cover coefficient		14	14
Canopy height coefficient		23	23
Maximum canopy height	cm	3000	3000
Maximum leaf area index		12	12
Maximum root depth	cm	500	500
Root to shoot ratio (root biomass/above ground biomass)	%	25	25
Maximum root mass for a perennial plant	kg/m ²	50	50
Percent of growing season when leaf area index starts to decline (0-100%)	%	0	0
Period over which senescence occurs	days	0	0
Percent canopy remaining after senescence (0-100%)	%	0	0
Percent of biomass remaining after senescence (0-100%)	%	0	0
Flat residue cover coefficient	m ² /kg	2	2
Standing to flat residue adjustment factor (Wind, Snow, Etc.)	%	99	99
Decomposition constant to calculate mass change of above-ground biomass		0.009	0.009
Decomposition constant to calculate mass change of below-ground biomass		0.009	0.009
Fragile or nonfragile residue		N	N
Plant specific drought tolerance (% of soil porosity)	%	25	25
Critical live biomass value below which grazing is not allowed	kg/m ²	0	0
Maximum darcy weisbach friction factor for living plant		0	0
Harvest units		WeppWillSet	WeppWillSet
Optimum yield under no stress conditions	kg/m ²	0	0

**Fig. 7.** Land cover maps of coniferous Forest Watersheds.

2.6. GeoWEPP 모형 임상별 유출 정확성 평가

Pandey 등(2008)은 세류간 침식능, 세류 침식능, 한계전

단응력, 유효수리전도도와 같은 토양 매개변수를 이용하여 모델 보정 및 매개변수 변화에 따른 민감도 분석을 하였다. 따라서 본 연구에서도 토양 매개변수(세류간 침식능, 세류 침식능, 한계전단응력, 유효수리전도도)를 이용하여 모델을 보정하였다. 본 연구에서는 앞서 기술된 GeoWEPP 모형의 입력 자료를 구축한 후 실측 유출량을 측정된 기간에 대해 보정 및 검증된 GeoWEPP 모형을 이용하여 유출량을 평가하였다. GeoWEPP 모델 비교·평가시 결정계수(R²)와 유효지수(Effective Index)를 이용하였다. 유효지수산정은 Nash-Sutcliffe model efficiency (NSE; Nash and Sutcliffe, 1970)를 이용하였다. 식 (1)은 R² 산정 공식이며, 식 (2)는 NSE 산정 공식이다.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (2)$$

여기서 O_i 는 각 이벤트 별로 산정된 유출량(m^3)이고, P_i 는 모델에서 예측된 각 이벤트 별 유출량(m^3)이고, \bar{O}_i 는 모든 이벤트의 산정된 유출량(m^3)의 평균이다. R^2 의 값과 NSE의 값이 1에 가까울수록 모델의 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다.

2.7. 다양한 식생 피도(Cover degree)에 따른 유출량 비교·평가

본 연구에서는 침엽수림 유역에 대해서 보정된 GeoWEPP 모형을 이용하여 다양한 식생 피도(10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%)에 따른 유출량을 비교·평가하였다. WEPP에서 식생·관리자료에 식물이 표면에 덮인 비율, 잔재물(Residue)이 세류간 내에 덮인 비율, 잔재물(Residue)이 세류흐름 내에 덮인 비율을 입력하여 다양한 지표피복 분포비율에 따른 유출량을 모의하였다. WEPP에서 입력된 식생·관리자료는 GeoWEPP과 연동되어 유출량 모의시 사용된다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 침엽수림 지역에서 측정된 유출량을 GeoWEPP 모델을 이용하여 모의하였다. 유출량은 2009년 4월 20일부터 2009년 8월 12일까지 14회 측정하였다. 유출량 비교·평가지 Donigian (2000)이 제안한 R^2 와 NSE의 기준을 토대로 하였다. Donigian (2000)은 과거 10년 이상의 모델의 적용사례와 연구 자료를 바탕으로 일반적인 모델효율의 범위와 신뢰 구간을 Table 2와 같이 제시하였다 (Donigian, 2000).

3.1. GeoWEPP 모형 유출량 평가

침엽수림 지역에서는 연구기간 중 총 14회의 강우 이벤트 발생시 유출량을 측정하였다. 보정시 4월에서 7월까지 실측한 자료, 검증시 7월부터 8월까지 실측한 자료를 이용하였다. Table 3과 같이 토양 매개변수를 입력하여 GeoWEPP 모델을 보정 및 검증을 수행한 후, 실측 유출량과 예측 유출량의 R^2 , NSE를 산정하였다. 보정시 R^2 는 0.77, NSE는 0.63으로 나타나, Donigian (2000)이 제시한 기준으로 Good과 Fair에 해당하며, 검증시 R^2 는 0.92, NSE는 0.89로 나타나, Donigian (2000)이 제시한 기준으로 모두 Very good을 해당하는 것으로 나타났다(Fig. 8, 9). 따라서 GeoWEPP 모델을 이용하여 침엽수림에서 발생하는 유출량을 적절하게 평가할 수 있는 것으로 판단된다.

Table 3. Calibration of GeoWEPP for coniferous forest watershed

Calibrated parameters	Value
Interrill erodibility ($kg \cdot s/m^4$)	2.01e+7
Rill erodibility (s/m)	9.00e-2
Effective hydraulic conductivity (Pa)	1.0
Critical hydraulic shear stress (mm/h)	1.0

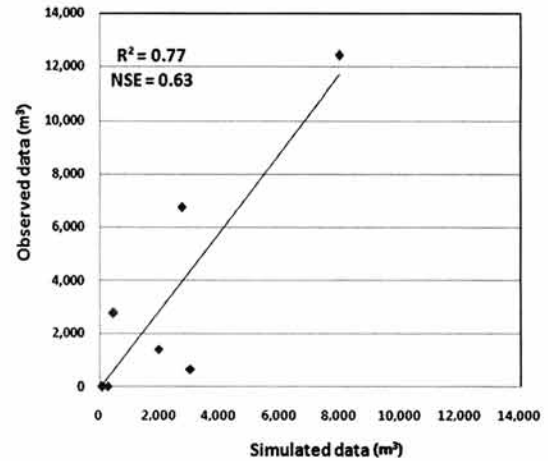


Fig. 8. R^2 and NSE of Calibrated Runoff.

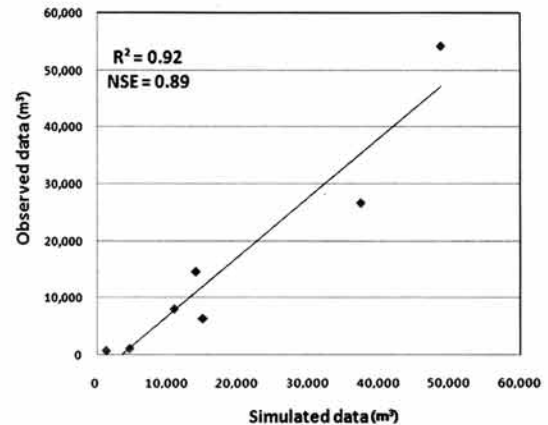


Fig. 9. R^2 and NSE of Validated Runoff.

3.2. 다양한 식생 피도에 따른 유출량 비교·평가

위에 기술된 바와 같이 GeoWEPP 모형은 침엽수림 지역에서 유출량을 평가하는데 매우 유용한 것으로 판단되었다. 본 연구에서는 다양한 식생 피도(10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%)에 따른 유출량 평가를 위하여 보정된 침엽수림 지역의 GeoWEPP 모형을 이용하여 평가하였다. 평가시 WEPP 모형에서 식생피도에 관련된 매개변수를 이용하여 생성된 식생·관리자료를 이용하였다. Covert 등(2005)은 GeoWEPP 모형을 이용하여 산불로 인

Table 2. General simulation targets or tolerances for model application (Donigian, 2000)

		Very good	Good	Fair	Poor
R^2	Water flow	> 0.8	0.7 ~ 0.8	0.6 ~ 0.7	< 0.6
NSE		0.90 ~ 0.80	0.80 ~ 0.70	0.70 ~ 0.60	0.60 ~ 0.50

Table 4. Comparison of runoff under various cover degree (10~50%)

Date	Rainfall	10%	20%	30%	40%	50%
	(mm)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)
09.4.20	13.5	583.34	146.87	31.93	31.73	31.72
09.5.2~3	27.0	5,180.62	4,605.76	4,032.52	3,514.96	3,060.70
09.5.12~14	11.5	1,246.62	1,073.95	873.79	743.78	651.25
09.5.15~20	52.0	6,642.67	5,001.50	3,848.40	3,041.93	2,314.18
09.6.22	65.0	15,722.54	14,686.12	13,683.90	12,781.98	11,751.04
09.6.29	27.0	6,713.99	6,368.76	5,864.10	5,608.50	5,291.23
09.7.7~8	93.0	23,752.95	21,381.66	19,332.66	17,674.90	16,037.95
09.7.9~11	58.5	23,260.96	22,522.50	21,718.11	20,920.15	20,109.85
09.7.12~13	56.0	14,009.03	13,373.57	12,756.48	11,675.43	11,006.80
09.7.14~15	114.5	34,778.28	33,852.78	32,917.31	31,736.63	30,512.30
09.7.16~17	176.0	55,229.43	54,732.37	54,478.22	53,865.44	53,247.03
09.7.19	17.5	4,094.37	4,048.91	3,906.75	3,631.12	3,339.55
09.7.21~22	45.5	12,635.41	12,293.23	11,922.36	11,556.00	11,088.57
09.8.12	14.5	2,368.45	2,297.67	2,231.50	2,152.12	2,061.51
Total		206,218.66	196,385.65	187,598.03	178,934.67	170,503.68
Event Avg.		27,495.82	26,184.75	25,013.07	23,857.95	22,733.82

Table 5. Comparison of runoff under various cover degree (60~100%)

Date	Rainfall	60%	70%	80%	90%	100%
	(mm)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)	(m ³)
09.4.20	13.5	31.71	31.70	31.69	31.61	31.61
09.5.2~3	27.0	2,513.98	1,925.38	1,120.18	891.41	775.21
09.5.12~14	11.5	516.74	279.64	25.18	25.75	27.04
09.5.15~20	52.0	1,757.36	1,484.16	1,197.84	834.27	201.16
09.6.22	65.0	10,781.84	9,802.31	8,686.97	7,474.02	5,967.72
09.6.29	27.0	4,922.72	4,503.95	4,053.24	3,543.45	2,766.08
09.7.7~8	93.0	15,864.40	15,369.08	14,800.10	14,429.87	14,222.49
09.7.9~11	58.5	19,127.48	18,222.37	17,062.88	15,666.80	14,536.15
09.7.12~13	56.0	10,268.66	9,431.76	8,397.26	7,186.08	7,356.45
09.7.14~15	114.5	30,285.88	29,164.18	29,987.28	27,656.43	27,191.29
09.7.16~17	176.0	52,220.34	51,315.87	50,984.27	50,383.24	50,218.10
09.7.19	17.5	3,058.13	2,717.22	2,228.96	1,871.09	1,337.41
09.7.21~22	45.5	10,612.17	10,196.07	9,761.92	9,195.79	8,191.73
09.8.12	14.5	1,965.25	1,867.27	1,754.44	1,599.44	1,252.14
Total		163,926.66	156,310.96	150,092.21	140,789.25	134,074.58
Event Avg.		21,856.89	20,841.46	20,012.29	18,771.90	17,876.61

한 식생 피도 감소에 따른 유출량을 모의하여 일치지수 (Index of agreement; Willmott, 1984)가 0.8, 0.9로 나타났다. 따라서 GeoWEPP 모형을 이용한 식생피도에 따른 유출량 산정이 가능하다고 판단되었다. 본 연구에서 모의한 다양한 식생 피도에 따른 유출량은 Table 4, 5와 같다. 강우 사상별 발생한 유출량의 총량은 식생 피도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 식생 피도 10%에서 206,218.66 m³이었던 유출량이 100%에서 143,499.22 m³으로 134,074.58 m³(약 35%)이 감소하였다. 또한 강우량이 100 mm 이상인 경우 식생 피도에 따른 유출량 변화가 상대적으로 작게 발생하는 것으로 나타났으며, 6월부터 식생 피도에 따른 유출량 변화가 4, 5월보다 작게 발생하는 것으로 나타나 강우량과 무강우일수에 따라 큰 차이가 발생하는 것으로 판단되었다. 7월 9~11일에 58.5 mm의 강우로 인해 발생된

유출량이 강우량을 초과하는 결과가 나타났는데, 이는 이전 강우이벤트 발생시 기저유출의 영향을 많이 받은 것으로 판단된다. GEOWEPP 모형은 이전 강우이벤트에 대한 영향을 많이 받기 때문이다. 산림유출수는 유출지속시간이 상당히 긴 편인데 모니터링시 일반적으로 2~3일이 경과한 후에 발생된 강우이벤트의 경우 새로운 강우이벤트로 보고 있다. 이러한 경우 기저유출이 포함되면 유출량이 강우량으로 초과하는 경우가 발생하게 된다.

4. 결론

본 연구의 목적은 GIS에서 WEPP의 구동이 가능하게 된 GeoWEPP을 이용하여 침엽수림의 유출 특성을 예측하여 정확성을 평가하는 것이며, 정확성이 확보된 침엽수림 지역

의 다양한 식생 피도(10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%)를 이용하여 유출량의 변화를 비교·분석하는데 있다.

본 연구의 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

- 1) 연구 대상 지역 중 침엽수림 지역의 유출 정확성을 평가한 결과 보정시 R^2 는 0.77, NSE는 0.63으로 산정되었고, 검증시 R^2 는 0.92, NSE는 0.89로 산정되었다. 따라서 GeoWEPP 모형이 실측 유출량을 적절히 반영하는 것으로 판단되었다. 최재완 등(2009)은 경사도가 증가할수록 지표유출량이 증대하는 경향을 보인다고 하여 특히, 경사도가 높은 산림지역의 경우 정확성이 평가된 GeoWEPP 모형을 사용하여 다양한 조건의 산림지역 또한 유출특성을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- 2) 정확성이 평가된 지역 중 침엽수림 지역을 이용하여 식생 피도(10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%)별 유출량을 비교·평가해본 결과, 식생 피도가 가장 낮은 10%에서 가장 많은 유출(206,218.66 m^3)이 발생하였고, 식생 피도가 가장 높은 100%에서는 가장 적은 유출(134,074.58 m^3)이 발생하였다. 이는 72,144.08 m^3 이 감소한 것으로 비율은 약 35% 정도이다.

본 연구에서는 큰 유역에서 정확한 유역 구분과 자료 구축이 어려운 WEPP 모델의 한계를 보완하기 위하여 GIS 기반의 WEPP 모델인 GeoWEPP을 이용하여 침엽수림 지역의 식생 피도에 대한 유출량을 비교·평가를 하였다. 최재완 등(2009)의 연구결과와 본 연구결과에서 보이는 바와 같이 WEPP 모형은 경사도별 유출 및 토양유실의 모의가 가능하며, 다양한 임상별 강우-유출 특성을 제대로 평가할 수 있기 때문에, WEPP·GeoWEPP 모델은 유출 및 토양유실을 줄이기 위한 비구조적 최적관리 기법 개발 및 평가에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

이 논문은 금강물환경연구소(주요 비점오염원 유출 장기 모니터링 및 저감기법연구)의 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 금강물환경연구소(2008). 주요 비점오염원 유출 장기모니터링 및 저감기법연구.
- 손정호(2002). WEPP 모형을 이용한 토양유실량 추정. 석사학위논문, 서울대학교.

- 오종민, 신동엽(1999). 산림유역에서 유출되는 계류수질 특성. *한국수처리학회지*, 7(1), pp. 45-53.
- 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*, 25(3), pp. 441-451.
- 한국토양정보시스템(2005). <http://asis.rda.go.kr/>.
- 환경부(2006). *비점오염관리 업무편람*. 환경부 연구보고서 11-1480000-000750-01.
- Covert, S. A., Robichaud, P. R., Elliot, W. J., and Link, T. E. (2005). Evaluation of runoff prediction from WEPP-based erosion models for harvested and burned forest watersheds. *American Society of Agricultural Engineers*, 48(3), pp. 1091-1100.
- Donigan, Jr., A. S. (2000). *HSPT Training Workshop Handbook and CD. Lecture #19, Calibration and Verification Issues*. Presented and Prepared for U.S. EPA, Office of Water, Office of Science and Technology, Washington, D.C.
- 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. (2000). BPCDG: Breakpoint Climate Data Generator for WEPP Using Observed Standard Weather Data Sets. <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nsertweb/weppmain/BPCDG.html>.
- Hutchinson, T. C., Adams, C. M., and Gaber, B. A. (1986). Neutralization of acidic raindrops on levels of agricultural crop and boreal forest species. *Water, Air, and Soil Pollution*, 31, pp. 475-484.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, pp. 282-290.
- Pandey, A., Chowdary, V. M., Mal, B. C., and 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.
- Renschler, C. S. (2003). Designing geo-spatial interfaces to scale process models: The GeoWEPP approach. *Hydrology Process*, 17(5), pp. 1005-1017.
- Renschler, C. S. (2007). GeoWEPP-the geo-spatial interface for the water erosion prediction project WEPP. URL: <http://www.geog.buffalo.edu/~rensch/geowepp/>. Accessed November 19, 2007.
- Soil Conservation Service (1972). *National Engineering Handbook, Section 4. Hydrology*. U. S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service. Washington, D. C.
- Willmott, C. J. (1984). On the evaluation of model performance in physical geography. *Spatial Statistics and Models*, G. L. Gaile and C. J. Willmott (eds.), D. Reidel Publishing, Dordrecht, Holland, pp. 443-460.