

ENGINEERING

Application of GeoWEPP to determine the annual average sediment yield of erosion control dams in Korea

Hakjun Rhee¹, Junpyo Seo^{2,*}

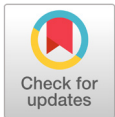
¹Institute of Agricultural Science, College of Agriculture & Life Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²Division of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science, Seoul 02455, Korea

*Corresponding author: seojunpyo@korea.kr

Abstract

Managing erosion control dams requires the annual average sediment yield to determine their storage capacity and time to full sediment-fill and dredging. The GeoWEPP (Geo-spatial interface for Water Erosion Prediction Project) model can predict the annual average sediment yield from various land uses and vegetation covers at a watershed scale. This study assessed the GeoWEPP to determine the annual average sediment yield for managing erosion control dams by applying it to five erosion control dams and comparing the results with field observations using ground-based LiDAR (light detection and ranging). The modeling results showed some differences with the observed sediment yields. Therefore, GeoWEPP is not recommended to determine the annual average sediment yield for erosion control dams. Moreover, when using the GeoWEPP, the following is recommended :1) use the US WEPP climate files with similar latitude, elevation and precipitation modified with monthly average climate data in Korea and 2) use soil files based on forest soil maps in Korea. These methods resulted in GeoWEPP predictions and field observations of 0 and 63.3 Mg·yr⁻¹ for the Gangneung, 142.3 and 331.2 Mg·yr⁻¹ for the Bonghwa landslide, 102.0 and 107.8 Mg·yr⁻¹ for the Bonghwa control, 294.7 and 115.0 Mg·yr⁻¹ for the Chilgok forest fire, and 0 and 15.0 Mg·yr⁻¹ for the Chilgok control watersheds. Application of the GeoWEPP in Korea requires 1) building a climate database fit for the WEPP using the meteorological data from Korea and 2) performing further studies on soil and streamside erosion to determine accurate parameter values for Korea.



OPEN ACCESS

Citation: Rhee H, Seo J. 2020. Application of GeoWEPP to determine the annual average sediment yield of erosion control dams in Korea. Korean Journal of Agricultural Science 47:803-814. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20200067>

Received: September 07, 2020

Revised: September 25, 2020

Accepted: October 06, 2020

Copyright: © 2020 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Keywords: erosion control, GeoWEPP (Geo-spatial interface for Water Erosion Prediction Project), sediment yield, watershed modeling, WEPP

Introduction

사방댐의 관리에 있어서 평시토사유출량은 사방댐의 저사용량, 만사시기, 준설 등을 결정하는데 중요한 인자이다. 우리나라 산림지역의 다양한 토지이용을 고려한 정확한 평시토사유출량 산정은 산림재해방지를 위한 사방사업에 있어서 매우 중요하다.

유역에서의 평시토사유출량을 예측하는 데는 다양한 방법과 모델이 있을 수 있으나, 산림분야에서 나타나는 산불, 산사태, 임도, 벌목 등의 토지이용에 대한 유출량과 토사유출량을 유역단위에서 산정하는 모델은 많지 않다. GeoWEPP (Geo-spatial interface for Water Erosion Prediction Project)은 산림분야에서 쓰이는 토지이용에 대한 모델링을 유역단위로 할 수 있는 모델이다. 우리나라 전 지역 대부분에 대하여 수치 지형도를 이용하여 지형 정보를 GIS (Geographic Information System)를 이용하여 전산화할 수 있는데 GeoWEPP은 이런 GIS data를 이용하여 모델링에 사용할 수 있다. 특히 GeoWEPP의 근간이 되는 WEPP (Water Erosion Prediction Project) 모델은 다양한 토지이용 및 관리에 대하여 이미 검증이 되었으며, 물리적 기작과 프로세스에 근거한 모델이기 때문에 다른 통계나 경험에 근거한 모델(statistical or empirical models)과 비교해서 그 적용범위가 넓다. 따라서 우리나라에 비교적 그 적용이 용이하다.

WEPP 모델은 수문, 식물성장, 토목, 침식 등의 물리적 기작에 근거한 수문 및 토양침식 예측 모델(Lafren et al., 1991; Lafren et al., 1997)로 널리 쓰이고 있는 USLE (Universal Soil Loss Equation)를 대체하기 위하여 개발되었다 (Flanagan et al., 2007). 또한 개별적 및 연속적 강수에 대한 유출, 토양침식 및 퇴적 등을 예측할 수 있으며 소면적(사면, 도로, 소규모 벌목구역 등)부터 대면적(5 km^2 의 소규모 유역)까지 적용할 수 있다(Flanagan and Livingston, 1995). WEPP은 네 가지 입력인자를 필요로 하는데 이는 기상, 지형, 토양, 토지이용(식생) 등이며 물수지(water balance), 토양침식, 퇴적, 토사유출, 식물 성장량 등의 다양한 형태의 출력으로 나타낼 수 있다. WEPP은 1995년 개발·사용되기 시작한 후 농업, 임업, 축산업(건조지역), 수산업, 광업 등에 널리 적용되고 있다. 또한 그 필요에 따라 개별 컴퓨터에서 GIS를 사용하는 GeoWEPP (Cochrane and Flanagan, 1999; Renschler, 2003)과 온라인 상에서 직접 모델링이 가능한 WEPP web interface (Flanagan et al., 2004; Frankenberger et al., 2011, Flanagan et al., 2013) 등 다양한 형태의 인터페이스(interface)가 있다. 마지막으로 WEPP 모델 안에는 계류에서 일어나는 침식과 사방댐 및 침사지 등을 직접 모델링할 수 있는 모듈이 있어 이를 이용할 수 있는 장점이 있다.

WEPP 모델은 프로세스 모델이라서 모델링에 필요한 인자 수가 많기 때문에 이에 대한 정확한 값을 쓰는 것이 쉽지 않다. 미국 산림청에서는 이러한 어려움을 해결하기 위하여 단순화한 토양 및 토지이용 파일을 만들어서 제공하고 있다. 또한 소규모 지역에 적용이 용이하나 대규모 유역(5 km^2 이상)에서는 그 정확도가 떨어져 적용이 적합하지 않다. 보다 중요한 사실은 유역 안에 다양한 토양 및 토지이용을 모델링하기 위해서는 매우 복잡한 방법으로 GeoWEPP을 사용하여야 함으로 실제 유역 안에서의 토양과 토지이용이 모두 같다고 가정하고 사용하여야 하는 한계가 있다.

GeoWEPP을 이용한 유역에서의 유출량 및 토사유출에 관한 연구는 이미 다양하게 이루어지고 있다. 미국 (Maalim et al., 2013), 터키(Yuksel et al., 2008), 중국(Yu et al., 2009), 이란(Meghdadi, 2013), 스페인(Martinez Salvador et al., 2015) 등에서 GeoWEPP을 통한 모델링이 이루어졌으며, GeoWEPP은 관측 치와 비교하였을 때 잘 맞거나 (Yuksel et al., 2008) 만족할 만한 값(Yu et al., 2009)을 예측하였다. 또한 다른 논문은 현재의 토지이용이 미래의 유출량 및 토사유출에 어떻게 영향을 미치는 지를 GeoWEPP을 이용하여 예측하였다. 하지만 우리나라에는 GeoWEPP 모델을 이용한 연구는 아직 이루어지지 않고 있는 실정이다.

본 연구는 GeoWEPP을 이용하여 우리나라 사방댐의 평시토사유출량을 예측하고 관측치와 비교하여 그 적용가능성을 평가하는데 있다. 이를 위해 (1) GeoWEPP을 이용하여 평시토사유출량을 예측하고, (2) 사방댐 저수량 측정 자료를 이용하여 GeoWEPP 모델을 평가하고, (3) GeoWEPP 모델의 국내 적용을 위한 방안을 제시하였다.

Materials and Methods

연구지역

본 연구는 세 지역(강원도 강릉시, 경상북도 봉화군, 칠곡군) 안의 다섯 곳의 유역에 설치된 사방댐에 대하여 GeoWEPP 모델을 적용하였다. 이곳은 지난 2010년부터 국립산림과학원이 매년 저사량의 변화를 측정하고 있어서 모델링 값을 실제 측정한 값과 비교·분석할 수 있었다. 특히 봉화와 칠곡은 산사태와 산불이 2008년과 2009년에 일어난 지역으로 비교연구를 하기 위하여 인근에 대조 유역(산림)에 대하여 같이 측정하였다. 다섯 곳의 유역에 대한 자료는 Table 1과 같다.

Table 1. Information on the modeling watersheds.

Watershed	Gangneung	Bonghwa landslide	Bonghwa control	Chilgok forest fire	Chilgok control
Latitude (°N)	37.62	37.04	37.06	35.98	36.01
Longitude (°W)	128.88	128.86	129.11	128.51	128.32
Elevation (m)	340	720	630	168	278
Size (ha)	326.6	187.0	112.4	93.3	34.7
Upper soil					
Soil texture	Sandy loam	Sandy loam	Sandy loam	Sandy loam	Sandy loam
Soil depth (mm)	120	120	110	110	120
Lower soil					
Soil texture	Sandy loam	Sandy loam	Loam	Sandy loam	Silt loam
Soil depth (mm)	390	570	590	490	500
Land use/vegetation	Mature forest	Poor grass	Mature forest	Heavily burned area	Mature forest

사방댐의 저사량 측정 값 분석

국립산림과학원은 연구대상인 다섯 곳의 사방댐에 대한 저사량을 매년 봄(4 - 5월)과 가을(10 - 11월) 두 번에 걸쳐 지상 LiDAR (light detection and ranging)를 이용하여 측정하고 그 차이로 매년 저사량의 변화를 기록하였다. 저사량 측정은 부피로 이루어졌으므로 이를 모델링한 값인 무게와 비교하려면 저사된 토사의 밀도를 알아야하겠으나 이에 대한 측정이 이루어지지 않았다. 기존의 연구(Verstraeten and Poesen, 2001)에 따르면 저사량의 밀도는 약 0.78 - 1.35 Mg·m⁻³로 범위가 넓고 각 저사 지역마다 오차가 심하기 때문에 본 연구에서는 편의상 1.0 Mg·m⁻³을 저사된 토사의 밀도로 사용하였다.

GeoWEPP 모델링 방법

본 연구에서는 ArcGIS 10.2 version용으로 개발된 GeoWEPP (<http://geowepp.geog.buffalo.edu/>)을 사용하였다. GeoWEPP은 프로세스 모델인 WEPP에 근거하기 때문에 네 가지 입력인자(기상, 지형, 토양, 토지이용)만 있으면 국내에 적용이 가능하다. 이중 지형은 우리나라 수치 지형도를 이용하여 GIS에서 사용할 수 있는 10 m × 10 m 크기의 DEM (digital elevation model)으로 만들었으며, 토양과 토지이용은 GeoWEPP 자체에 들어있거나 미국 산림청 산하 연구소(USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station)에서 만든 파일을 이용하였다. 특히 우리나라 산림에 대하여 WEPP 모델을 적용한 연구가 드물다. 따라서 이미 미국서 만들어진 토양 파일이 우리나라에 적합한지 알아보기 위하여, 토양입지도 자료를 이용한 별도의 토양 파일을 만들고 모델링하여 그 결과를 비교하였다.

다섯 곳 유역에 설치된 기상관측소가 없기 때문에, 세 지역 각각에 대하여 가장 인접한 두 곳의 기상대 자료를 사용하여 총 여섯 곳의 기상을 이용하여 모델링을 하였다. 특히 강릉 유역의 경우는 고도가 340 m로 인근 강릉(26 m)이나 대관령(773 m)과는 큰 차이를 보여 적합한 기상자료를 얻는데 어려움이 있었다.

사방댐 저수량 측정 자료를 이용하여 GeoWEPP 모델을 평가하기 위해서는 2010 - 2014년의 실제 일일 기상자료가 필요하므로 이를 여섯 곳의 기상대 자료를 이용하여 GeoWEPP에 필요한 기상 파일로 만들었다.

평시토사유출량을 산정하기 위해서는 약 30년 또는 50년의 장기간의 일일 기상을 이용하여 모델링을 하고 이에 대한 연평균 토사유출량을 구하는 것이 보통이다. 본 연구에서는 50년의 장기간 기상에 대한 연평균 평시토사유출량을 구하여 비교하였다. WEPP (GeoWEPP) 모델은 CLIGEN (Nicks et al., 1995)이라고 하는 기상 파일을 만드는 프로그램을 가지고 있는데, 이는 이미 저장된 기상대 자료를 이용하여 모델링에 필요한 일일 기후를 생성한다. CLIGEN에는 전 세계 다양한 국가의 기상대 자료가 포함되어 있으나 우리나라의 기상 자료는 포함되어 있지 않다. 따라서 우리나라 기상 자료가 WEPP 모델에 맞게 준비되어 있지 않은 상황에서 모델링을 하려는 지역의 월 평균 기상 자료를 이용하여 기상 파일을 만드는 것이 유일한 방법이라고 하겠다. 필요한 월 평균 기상자료에는 최고, 최저 기온, 강수량, 강수일수 등이며 미국에서 위도, 고도, 강수량 등이 비슷한 지역의 기상대 자료에 우리나라 모델링 지역의 월 평균 기상자료를 입력하여 필요한 기상 파일을 만들었다. 또한 미국 산림청 산하 연구소에서 개발한 FS WEPP 인터페이스에 우리나라 원주에 대한 기상 파일이 만들어져 있다(USDA FS RMRS, 1999). 이 파일을 우리나라 모델링 지역의 월 평균 기상자료를 이용하여 수정해서 별도의 기상 파일을 만들고 모델링하여 그 결과를 비교하였다.

네 가지 입력인자 외에 GeoWEPP에는 최소 계류 길이(minimum source channel length)와 집수구역 면적(critical source area)을 결정하여야 하는데 본 연구에서는 GeoWEPP 기본 값인 100 m와 5 ha를 사용하였다.

이 연구에서 5개의 유역에 대하여, 각각 2개의 인근 기상대 자료를 가지고, 2가지의 토양 파일을 이용하였으며, 일일 기상자료, 미국 및 원주 기상 파일을 이용한 CLIGEN 기상 파일 등 3개의 기상 파일을 이용하여 총 60회의 모델링을 실시하였다.

Results and Discussion

GeoWEPP 모델링의 결과와 실측치와의 차이

관측한 지역 인근의 기상대 자료(2010 - 2014년)를 이용한 경우 모델링 대부분 값이 맞지 않게 나왔다. 특히 매해의 관측 값과 잘 맞지 않게 나왔다(Fig. 1 - 5; Table 2). 대체적으로 2013년과 2014년이 건조해서 토양침식이 상대적으로 낮게 나타났으나 실제 관측치는 이와 맞지 않았다. 이는 크게 두 가지에 기인한다고 하겠다. 첫째로 관측한 다섯 곳의 위치가 기상대 위치와 떨어져 있어서 실제 유역의 기상과 다를 수 있다는 점이고, 다른 하나는 실제로 침식이 일어났으나 일어난 침식이 바로 사방댐에 도달하지 않고 수년에 걸쳐 조금씩 이동했을 수 있어 시간적 오차가 발생할 수 있다. 이에 평균 토사유출량을 비교해보면 그 오차가 많이 줄어들 수 있다(Table 3).

다섯 개의 각 유역에 대하여 두 곳의 인근 기상대 자료를 이용하면 대관령이 강릉보다, 봉화가 태백보다, 구미가 대구보다 더 가까운 수치를 보였다(Table 3). 이들 기상대를 이용한 경우 15.0 - 93.1 Mg·ha⁻¹ (17 - 100%)의 차이를 보였다. 이는 토사유출량을 산정하는데 있어서 기상 자료가 얼마나 중요한지를 다시 보여준다고 할 수 있다. 또한 정확한 기상 자료 없이는 정확한 모델 검증이 힘들다고 할 수 있다.

Table 2. Comparisons of observed annual sediment yields and Water Erosion Prediction Project (WEPP) modeling results using observed climates (2010 - 2014) and two different soil files based on forest soil maps in Korea and by United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station (USDA FS RMRS).

Watershed	Observed/modeling	Climate	Soil	Annual sediment yield (Mg·yr ⁻¹)					
				2010	2011	2012	2013	2014	Total
Gangneung	Observed	-	-	13.1	62.0	163.2	0.0	78.3	316.6
	Modeling	Daegwall-yeong	Soil map ^y	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			RMRS ^z	1,213.8	1,066.3	2.7	667.6	405.1	3,355.5
		Gangneung	Soil map	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			RMRS	425.4	2,008.9	3,812.7	0.5	0.1	6,247.7
Bonghwa landslide	Observed	-	-	92.5	657.6	0.0	823.0	82.7	1,655.8
	Modeling	Bonghwa	Soil map	467.3	748.4	153.9	0.2	0.6	1,370.4
			RMRS	344.3	729.2	272.2	1.2	0.8	1,347.6
		Taeback	Soil map	1,299.4	967.8	283.3	0.0	0.0	2,550.5
			RMRS	807.2	1,139.8	310.5	0.0	0.0	2,257.6
Bonghwa control	Observed	-	-	11.3	94.5	68.6	85.5	279.0	538.9
	Modeling	Bonghwa	Soil map	248.2	558.1	108.6	0.1	3.9	918.9
			RMRS	83.0	419.3	123.1	0.9	3.0	629.3
		Taeback	Soil map	420.5	1,000.2	220.5	0.0	0.0	1,641.3
			RMRS	242.9	919.0	216.7	0.0	0.0	1,378.7
Chilgok forest fire	Observed	-	-	205.9	184.5	168.8	15.8	0.0	575.0
	Modeling	Gumi	Soil map	8.1	293.2	735.0	0.7	3.4	1,040.4
			RMRS	5.7	228.3	686.3	0.6	3.2	924.0
		Daegu	Soil map	401.8	1,071.6	172.5	58.2	20.7	1,724.9
			RMRS	324.5	903.6	201.3	57.4	17.5	1,504.2
Chilgok control	Observed	-	-	27.0	5.5	0.6	17.8	23.9	74.8
	Modeling	Gumi	Soil map	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			RMRS	5.2	89.3	189.4	0.0	1.1	285.1
		Daegu	Soil map	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
			RMRS	85.5	229.0	83.4	15.4	7.1	420.4

^y Modified soil file using forest soil maps in Korea.

^z USDA FS RMRS (1999).

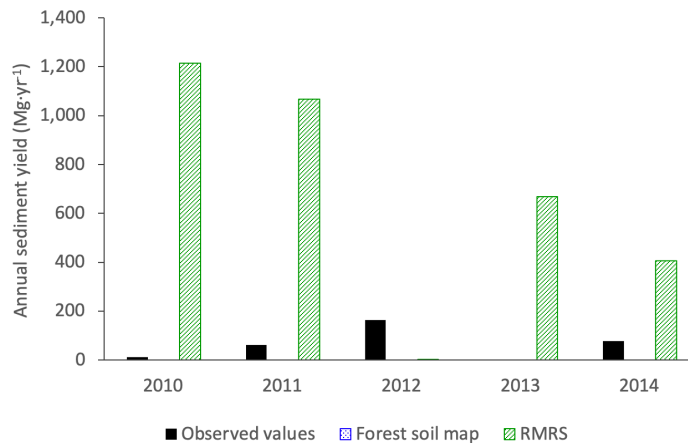


Fig. 1. Comparisons of observed annual sediment yields and Water Erosion Prediction Project (WEPP) modeling results for the Gangneung watershed using observed climates (2010 - 2014) and two different soil files based on forest soil maps in Korea and by United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station (USDA FS RMRS).

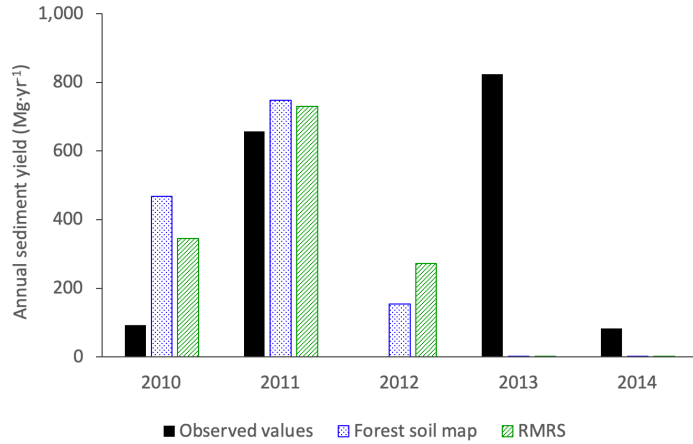


Fig. 2. Comparisons of observed annual sediment yields and Water Erosion Prediction Project (WEPP) modeling results for the Bonghwa landslide watershed using observed climates (2010 - 2014) and two different soil files based on forest soil maps in Korea and by United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station (USDA FS RMRS).

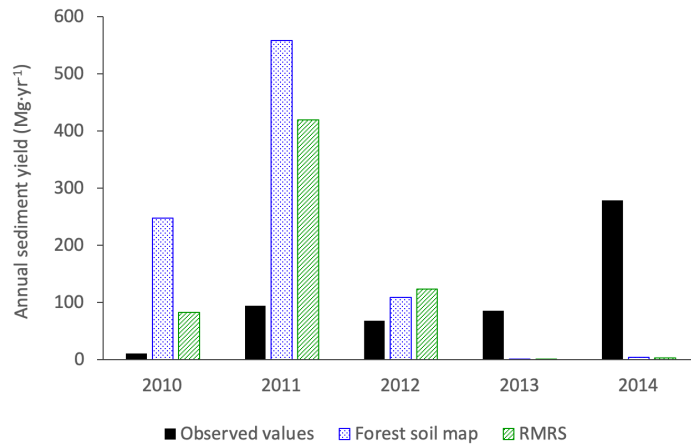


Fig. 3. Comparisons of observed annual sediment yields and Water Erosion Prediction Project (WEPP) modeling results for the Bonghwa control watershed using observed climates (2010 - 2014) and two different soil files based on forest soil maps in Korea and by United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station (USDA FS RMRS).

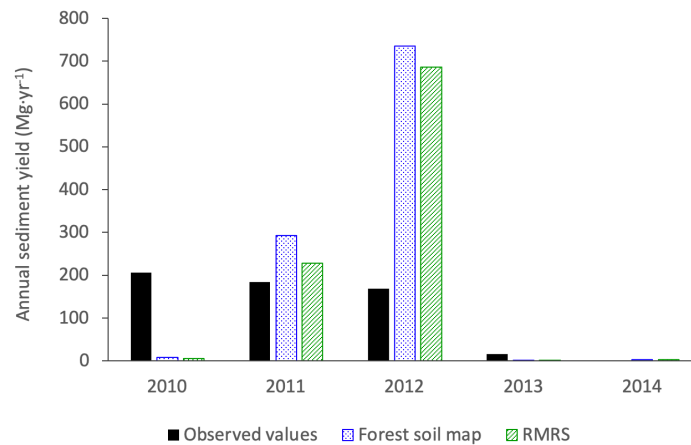


Fig. 4. Comparisons of observed annual sediment yields and Water Erosion Prediction Project (WEPP) modeling results for the Chilgok forest fire watershed using observed climates (2010 - 2014) and two different soil files based on forest soil maps in Korea and by United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station (USDA FS RMRS).

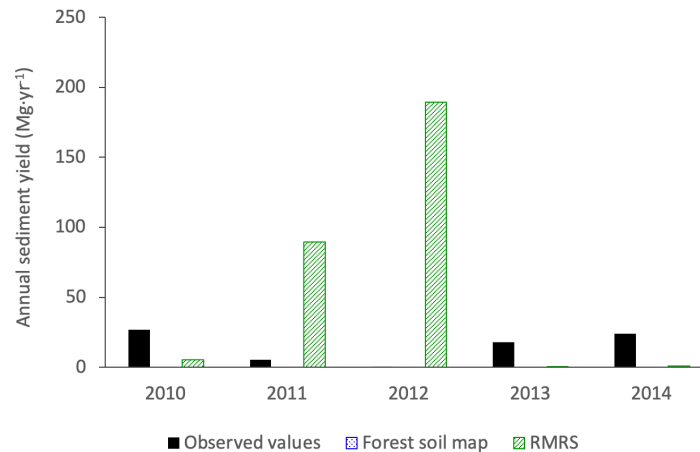


Fig. 5. Comparisons of observed annual sediment yields and Water Erosion Prediction Project (WEPP) modeling results for the Chilgok control watershed using observed climates (2010 - 2014) and two different soil files based on forest soil maps in Korea and by United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station (USDA FS RMRS).

Table 3. Comparisons of observed annual average sediment yields and Water Erosion Prediction Project (WEPP) modeling results using observed climates (2010 - 2014) and two different soil files based on forest soil maps in Korea and by United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station (USDA FS RMRS).

Watershed	Observed/ modeling	Climate	Soil	Annual average sediment yield (Mg·yr ⁻¹)		
				Hillslope erosion	Hillslope erosion	Hillslope erosion
Gangneung	Observed	-	-	-	-	63.3
	Modeling	Daegwall-yeong	Soil map ^y	0.0	0.0	0.0
			RMRS ^z	0.6	866.2	671.1
		Gangneung	Soil map	0.0	0.0	0.0
			RMRS	17.6	1,459.2	1,249.5
Bonghwa landslide	Observed	-	-	-	-	331.2
	Modeling	Bonghwa	Soil map	2.5	271.2	274.1
			RMRS	3.4	271.4	269.5
		Taebaek	Soil map	78.5	582.3	510.1
RMRS			58.3	400.7	451.5	
Bonghwa control	Observed	-	-	-	-	107.8
	Modeling	Bonghwa	Soil map	0.0	183.3	183.8
			RMRS	0.0	126.1	125.9
		Taebaek	Soil map	18.8	308.4	328.3
RMRS			11.4	269.6	275.7	
Chilgok forest fire	Observed	-	-	-	-	115.0
	Modeling	Gumi	Soil map	49.7	158.1	208.1
			RMRS	39.3	145.2	184.8
		Daegu	Soil map	111.9	232.4	345.0
RMRS			88.5	211.5	300.8	
Chilgok control	Observed	-	-	-	-	15.0
	Modeling	Gumi	Soil map	0.0	0.0	0.0
			RMRS	3.4	53.5	57.0
		Daegu	Soil map	0.0	0.0	0.0
RMRS			3.7	80.3	84.1	

^y Modified soil file using forest soil maps in Korea.

^z USDA FS RMRS (1999).

본 연구에서는 미국 산림청 연구소에서 만들어진 토양과 우리나라 토양 입지도를 이용하여 보완한 토양 두 가지를 사용하였는데, 봉화(산사태), 봉화(대조), 칠곡(산불)에서는 비교적 그 차이가 작았으나(Fig. 2-4) 강릉 과 칠곡(대조)에서 그 차이가 크게 나타났다(Fig. 1 and Fig. 5). 특히 모델링한 유역의 면적이 큰 강릉의 경우(326.6 ha) 그 결과가 크게 차이가 났다(Fig. 1; Table 3). 이 경우 두 토양 파일을 비교해 본 결과 그 차이가 단지 토심(미국 산림청 연구소 800 mm, 토양 입지도 500 mm)임을 고려할 때 큰 유역 면적을 모델링할 경우 추가적으로 입지도를 사용해 토양 파일을 보완하는 것이 필요하다고 보인다.

GeoWEPP은 저수량뿐만 아니라 유역 내에서 사면과 계류 침식량을 각각 예측한다. 따라서 관측한 기상 자료를 이용하여 GeoWEPP을 적용한 결과를 세부적으로 볼 때 대부분의 침식이 계류에서 일어났음을 알 수 있다. 특히 상당수의 결과가 계류에서 매우 심한 침식량을 나타냈는데 이에 대한 추가 검증이 이루어져야 한다고 생각된다.

GeoWEPP을 이용한 평시토사유출량 모델링

GeoWEPP을 이용한 평시토사유출량은 칠곡(산불)을 제외하고는 측정된 평균 저수량과 비교해서 대부분 낮은 평시토사유출량을 나타내었다(Fig. 6; Table 4 and Table 5). 위도가 비슷한 미국 기상대 자료와 우리나라 대관령, 봉화, 구미의 월 평균 기상자료를 이용하여 모델링을 한 결과가 원주의 기상자료를 이용한 결과보다 측정된 평균 저수량에 가까운 값을 나타내었다(Fig. 6). 따라서 위도가 비슷한 미국 기상대 자료와 우리나라 월 평균 기상자료를 이용하는 것이 비교적 정확한 GeoWEPP 결과를 도출할 수 있다고 보인다.

위 방법을 이용하여 연구지역인 다섯 곳의 연 평시토사유출량을 구하면 강릉 유역은 0톤, 봉화(산사태)는 142.3톤, 봉화(대조)는 102.0톤, 칠곡(산불)은 294.7톤, 칠곡(대조)는 0톤으로 나타났다. 하지만 아직 GeoWEPP에 대한 평가 및 수정·보완이 끝나지 않았으므로 이 값을 사방댐의 유지·관리에 사용하는 것은 무리가 있다고 판단된다.

Table 4. Geo-spatial interface for Water Erosion Prediction Project (GeoWEPP) results based on US climate files modified by monthly average climate data near modeling watershed locations in Korea.

Watershed	Climate	Soil	Annual average sediment yield (Mg·yr ⁻¹)		
			Hillslope erosion	Streamside erosion	Watershed sediment
Gangneung	Daegwall-yeong	Soil map ^y	0.0	0.0	0.0
		RMRS ^z	83.6	208.5	198.3
	Gangneung	Soil map	0.0	0.0	0.0
		RMRS	145.2	146.4	236.0
Bonghwa landslide	Bonghwa	Soil map	107.6	63.6	142.3
		RMRS	104.4	54.5	123.8
	Taebaek	Soil map	80.2	63.4	134.5
		RMRS	74.7	47.0	92.9
Bonghwa control	Bonghwa	Soil map	63.1	58.1	102.0
		RMRS	32.8	58.6	66.3
	Taebaek	Soil map	45.3	91.2	94.1
		RMRS	19.4	38.6	40.3
Chilgok forest fire	Gumi	Soil map	300.2	54.0	294.7
		RMRS	297.6	62.9	285.9
	Daegu	Soil map	180.9	56.0	167.5
		RMRS	179.6	42.7	176.9
Chilgok control	Gumi	Soil map	0.0	0.0	0.0
		RMRS	6.9	7.1	14.0
	Daegu	Soil map	0.0	0.0	0.0
		RMRS	3.9	5.5	9.4

^y Modified soil file using forest soil maps in Korea.

^z USDA FS RMRS (1999).

Table 5. Geo-spatial interface for Water Erosion Prediction Project (GeoWEPP) results based on the Wonju climate file modified by monthly average climate data near modeling watershed locations in Korea.

Watershed	Climate	Soil	Annual average sediment yield (Mg·yr ⁻¹)		
			Hillslope erosion	Streamside erosion	Watershed sediment
Gangneung	Daegwall-yeong	Soil map ^y	0.0	0.0	0.0
		RMRS ^z	1,023.7	165.2	1,013.9
	Gangneung	Soil map	0.0	0.0	0.0
		RMRS	810.8	233.5	953.9
Bonghwa landslide	Bonghwa	Soil map	46.1	33.3	65.7
		RMRS	41.2	38.4	71.8
	Taebaek	Soil map	629.2	75.5	510.2
		RMRS	611.0	425.8	1,000.9
Bonghwa control	Bonghwa	Soil map	18.9	47.3	33.8
		RMRS	6.3	20.8	14.9
	Taebaek	Soil map	445.7	99.5	492.3
		RMRS	252.4	159.1	402.5
Chilgok forest fire	Gumi	Soil map	294.1	24.0	268.1
		RMRS	292.5	24.9	261.9
	Daegu	Soil map	293.8	39.7	261.4
		RMRS	293.1	40.8	260.6
Chilgok control	Gumi	Soil map	0.0	0.0	0.0
		RMRS	2.0	4.6	6.0
	Daegu	Soil map	0.0	0.0	0.0
		RMRS	1.9	3.6	5.3

^yModified soil file using forest soil maps in Korea.

^zUSDA FS RMRS (1999).

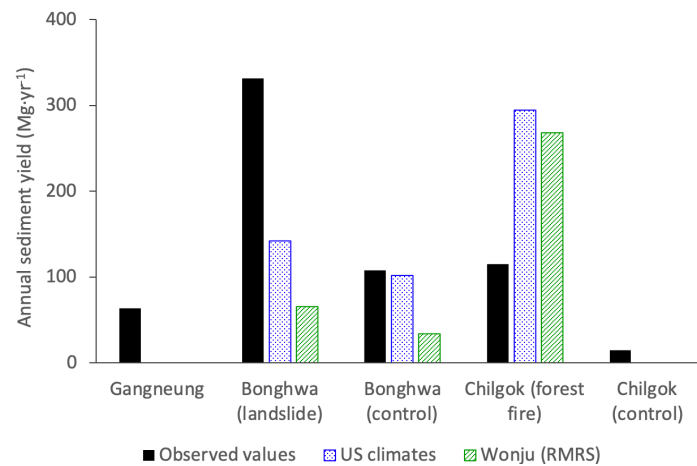


Fig. 6. Comparisons of observed annual sediment yields and Water Erosion Prediction Project (WEPP) modeling results using observed climates (2010 - 2014), US climates and the Wonju climate file made by United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station (USDA FS RMRS).

Conclusion

본 연구에서는 관측된 사방댐 저사량을 이용하여 GeoWEPP 모델을 평가하였다. 연평균 토사유출량을 관측한 저사량과 비교했을 때 강릉 0톤 및 63.3톤, 봉화 산사태 142.3톤 및 331.2톤, 봉화 대조구 102.0톤 및 107.8톤, 칠곡 산불 294.7톤 및 115.0톤, 칠곡 대조구 0톤 및 15.0톤 등 봉화 대조구, 칠곡 대조구 등은 그 값이 비슷하나 다른 지역에서는 -100, -57.2, 156.3% 등의 차이를 보였으므로 GeoWEPP을 이용하여 정확하게 사방댐 평시토사유출량을 산정하기에는 아직 무리가 있다고 판단된다. 또한 현 상황에서 GeoWEPP을 비교적 정확하게 적용하는 방법은 비슷한 위도, 고도, 강수량을 가진 미국 기상대 자료를 우리나라 월 평균 기상자료를 이용하여 수정·사용하는 방법이 적합하다고 하겠다. GeoWEPP을 이용한 평시토사유출량 산정에 대한 제언은 다음과 같다.

실측값과의 차이 해결방안 및 보정

정확한 기상자료 없이 정확한 보정은 힘들다고 하겠으나, 이 연구결과를 볼 때 모델링을 하는 유역의 면적이 클수록 토양 입지도를 이용하여 GeoWEPP 토양 파일을 수정·보완하는 것이 오차를 줄이는 방법이라고 하겠다. 또한 모델링 결과를 분석해 본 결과 계류에서의 침식이 과도하게 일어나는 경향이 있다고 판단된다(Table 3 - 5). 따라서 우리나라 계류의 형태와 침식량이 얼마인지를 알고 이를 모델링에 반영하는 것이 중요하다고 하겠다. 마지막으로 우리나라 상황에 맞는 최소 계류 길이와 집수구역 면적 등이 확인되어야 할 것이다.

GeoWEPP 모델의 국내 적용방안

GeoWEPP 모델을 국내에 적용하기 위해서는 다음의 사항이 고려되어야 한다고 하겠다.

GeoWEPP 모델을 국내에 적용하기 위해서는 무엇보다 기상 데이터를 WEPP 모델에 맞게 준비하는 것이 우선되어야 한다고 사료된다. 현재 우리나라에 GeoWEPP을 적용하기 위해서는 미국의 기상대 자료를 이용해야 하는 번거로움이 있으며, 정확도 또한 떨어진다고 판단된다. 이를 위하여 우리나라 기상대 자료를 WEPP 모델 기상 프로그램인 CLIGEN에 맞는 양식으로 바꾸어 주는 것이 필요하다고 하겠다.

GeoWEPP 모델의 근간이 되는 WEPP 모델의 입력인자인 토양 파일에 대한 보다 정확한 값을 구하여 이를 우리나라에 맞게 수정하여야 하겠다. 이는 다섯 곳의 유역에 대한 모델링의 결과 중 토심과 토성을 수정한 결과와 수정하지 않은 결과가 두 곳 유역에서 확연히 다르게 나타난 것을 보면 알 수 있다.

WEPP 모델의 계류 입력인자에 대한 수정·보완이 필요하다고 생각된다. 계류의 입력인자는 비교적 연구가 이루어지지 않은 분야이나, 이번 GeoWEPP 모델링의 결과에서는 계류에서의 침식이 매우 많았다. 따라서 이에 대한 연구 및 보완이 필요하다고 판단된다.

GeoWEPP 모델링의 입력인자에는 최소집수면적과 최소계류길이가 있다. 현재 GeoWEPP 모델에 사용되는 값은 미국의 최소집수면적과 최소계류길이를 이 지역 및 기후에 따라서 그 값이 다를 수 있다. 따라서 우리나라에 맞는 정확한 값을 찾아야 하겠다.

향후 국내의 평시토사유출량 추정방안 및 GeoWEPP 모델의 발전방향

현재 GeoWEPP을 사용하기 위해서는 개별 컴퓨터에 있는 GIS 프로그램을 이용하여야만 하는 한계가 있다. 또한 사용자가 모델링에 필요한 입력 파일을 만들거나 지정하여 사용하여야하는 단점이 있다. 미국에서는 이와 같은 단점을 보완하기 위해서 온라인상에서 직접 WEPP을 사용할 수 있는 인터페이스(<http://milford.nserl.purdue.edu/ol/wepp/>)를 만들어서 운영하고 있다(Flanagan et al., 2004; Frankenberger et al., 2011). 우리나라도 온라인에서 사용할 수 있는 수문 및 토사유출 인터페이스를 개발하면 그 가능성과 응용범위가 크다고 하겠다. 또한 인터넷에만 접속하면 사용이 가능하므로 차후 스마트폰 등으로도 사용범위를 확대할 수 있다고 보인다.

Acknowledgements

본 연구는 산림청(한국임업진흥원)의 신기후체제 대응 연구사업(No. 2018113D10-2020-BB01)으로 수행되었습니다. 또한 본 연구를 도와주신 국립산림과학원 이창우께 감사드립니다.

Authors Information

Hakjun Rhee, <https://orcid.org/0000-0002-8762-3408>

Junpyo Seo, <https://orcid.org/0000-0001-7675-1255>

References

- Cochrane TA, Flanagan DC. 1999. Assessing water erosion in small watersheds using WEPP with GIS and digital elevation models. *Journal of Soil Water Conservation* 54:678-685.
- Flanagan DC, Frankenberger JR, Cochrane TA, Renschler CS, Elliot WJ. 2013. Geospatial Application of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model. *Transactions of the ASABE* 56:581-590.
- Flanagan DC, Frankenberger JR, Engel BA. 2004. Web-based GIS application of the WEPP model. Paper No. 042024. Presented at the 2004 ASAE Annual International Meeting, Ottawa, Canada, 1-4 August, 2004. ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- Flanagan DC, Gilley JE, Franti TG. 2007. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. *Transactions of the ASABE* 50:1603-1612.
- Flanagan DC, Livingston SJ. 1995. WEPP User Summary. NSERL Report Number 11. USDA, Agricultural Research Service, National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN, USA.
- Frankenberger JR, Dun S, Flanagan DC, Wu JQ, Elliot WJ. 2011. Development of a GIS interface for WEPP model application to Great Lakes forested watersheds. ISELE Paper Number 11139. In *Proceedings of the International Symposium on Erosion and Landscape Evolution*, Anchorage, AK, 18-21 September, 2011. ASABE, St. Joseph, MI, USA.
- Lafren JM, Elliot WJ, Flanagan DC, Meyer CR, Nearing MA. 1997. WEPP—predicting water erosion using a process-based model. *Journal of Soil and Water Conservation* 52:96-102.
- Lafren JM, Lane LJ, Foster GR. 1991. WEPP—a next generation of erosion prediction technology. *Journal of Soil Water Conservation* 46:34-38.

- Maalim FK, Melesse AM, Belmont P, Gran KB. 2013. Modeling the impact of land use changes on runoff and sediment yield in the Le Sueur watershed, Minnesota using GeoWEPP. *Catena* 107:35-45. DOI:10.1016/j.catena.2013.03.004
- Martinez Salvador A, Garcia CC, Lorenzo RG, Cutillas PP. 2015. Application of GeoWEPP to determine sediment supply to reservoirs in small Mediterranean basins. The La Cierva reservoir watershed in the Mu la river basin (Segura basin). *Limnetica* 34:41-55.
- Meghdadi AR. 2013. Identification of effective best management practices in sediment yield diminution using GeoWEPP: The Kasilian watershed case study. *Environmental Monitoring and Assessment* 185:9803-9817. DOI:10.1007/s10661-013-3293-1
- Nicks AD, Lane LJ, Gander GA. 1995. Weather generator. In Flanagan, DC and Nearing MA (eds.). USDA-Water Erosion Prediction Project Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Rep. 10. USDA ARS NSERL, West Lafayette, IN, USA.
- Renschler CS. 2003. Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach. *Hydrological Processes* 17:1005-1017. DOI:10.1002/hyp.1177.
- USDA FS RMRS (United States Department of Agriculture Forest Service Rocky Mountain Research Station). 1999. Forest Service WEPP Interfaces. Accessed in <http://forest.moscowfsl.wsu.edu/fswepp/> on 14 October 2020.
- Verstraeten G, Poesen J. 2001. Variability of dry sediment bulk density between and within retention ponds and its impact on the calculation of sediment yields. *Earth Surface Processes and Landforms* 26:375-394. DOI:10.1002/esp.186
- Yu XX, Zhang XM, Niu LL. 2009. Simulated multi-scale watershed runoff and sediment production based on GeoWEPP model. *International Journal of Sediment Research* 24:465-478.
- Yuksel A, Akay AE, Gundogan R, Reis M, Cetiner M. 2008. Application of GeoWEPP for determining sediment yield and runoff in the Orcan Creek watershed in Kahramanmaras, Turkey. *Sensors* 8:1222-1236. DOI:10.3390/s8021222