

걸리 침식 평가를 위한 SATEEC, nLS, USPED 연계 시스템의 개발 및 적용

강현우 · 박윤식 · 김남원* · 옥용식** · 장원석 · 류지철 · 김기성 · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과

*한국건설기술연구원

**강원대학교 바이오자원환경학과

Development and Application of Integrated System with SATEEC, nLS and USPED for Gully Erosion Evaluation

Hyunwoo Kang · Youn Shik Park · Nam Won Kim* · Yong Sik Ok** · Won Seok Jang · Ji Chul Ryu · Ki-Sung Kim · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructures Engineering Program, Kangwon National University

*Korea Institute of Construction Technology

**Department of Biological Environment, Kangwon National University

(Received 29 March 2010, Revised 10 May 2010, Accepted 11 May 2010)

Abstract

The Universal Soil Loss Equation (USLE)-based modeling systems have been widely used to simulate soil erosion studies. However the GIS-based USLE modeling systems have limitation in gully erosion evaluation which is one of the most important factor in soil erosion estimation. In this study, the integrated soil erosion evaluation system using with Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) system, nLS and Unit Stream Power-based Erosion/Deposition (USPED) model was developed to simulate gully erosion. Gully head location using nLS model, USPED for gully erosion, and the SATEEC estimated sheet and rill erosion were evaluated and combined together with the integrated soil erosion evaluation system. This system was applied to the Haeon-myeon watershed, annual average sediment-yield considering sheet, rill and gully erosion was simulated as 101,933 ton/year at the study watershed. if the integrated soil erosion evaluation system is calibrated and validated with the measured data, this system could be efficiently used in developing site-specific soil erosion best management system to reduce soil erosion and muddy water inflow into the receiving waterbody.

keywords : Gully erosion, nLS, SATEEC, Soil erosion, USLE, USPED

1. 서론

지구 온난화로 인한 기후변화는 국지성 호우의 빈도와 강도를 증가시켰으며, 이는 세계의 여러 나라들보다 특히 연 강수의 50% 이상이 6, 7, 8월에 집중되는 대한민국에 더 큰 영향을 주었다(허창희와 강인식, 1988). 단시간에 많은 강우량을 보이는 국지성 호우의 경우 토양 유실의 직접적인 원인이 되며, 이로 인해 댐, 하천 등에서의 탁수 문제가 큰 사회적, 환경적 문제로 대두되고 있다. 1993년 12월에 준공된 낙동강 유역의 임하댐의 경우 2002년 태풍 루사와 2003년 태풍 매미로 인하여 많은 토양 유실이 발생하여 고농도의 탁수가 유발되었으며(박윤식 등, 2007), 평창군 도암댐 유역의 경우 해발고도가 높고 경사가 급한 곳에서 많은 고랭지 농업이 이루어지고 있기 때문에 토양 유실이 다른 유역보다 심각하게 발생할 수 있는 가능성이 높다(허성구 등, 2005).

유역의 토양유실로 인하여 발생하는 문제를 해결하기 위해서는 토양 유실의 시·공간적 발생 현황 및 거동 특성에 관한 연구가 필요하고, 이를 위해서는 전체 유역의 출구 뿐 아니라, 유역의 각 소 유역 출구지점에서의 장기간의 모니터링 및 자료 분석이 필요하다. 하지만 장기간의 모니터링은 항상 많은 예산, 인력, 장비를 필요로 하고, 이는 정확한 토양 유실을 모의하는데 많은 어려움을 야기시킨다(최재완 등, 2009). 이러한 어려움 때문에 많은 컴퓨터 모형이 개발되어 왔는데 특히 최근까지 30여 년 동안 전 세계적으로 Universal Soil Loss Equation (USLE) 모형이 활용되어 왔으며(Wischmeier and Smith, 1978), 이 외에도 USLE를 기반으로 한 Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE; Foster et al., 1996), Sediment Assessment Tool for Effective Erosion Control (SATEEC) system (Lim et al., 2005) 등이 사용되고 있다. 이들 모형은 많은 연구를 통하여 면상 침식(Sheet erosion)과 세류 침식(Rill erosion)으로 인한 토양 유실량을 산정하는데 이용되어 왔으나, Photo 1과 같이 강한 국지성 호우로 발생하는 협곡

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



Photo 1. Gully erosion at the watershed
(adopted <http://plantandsoil.unl.edu>)

침식(Gully erosion : 세류침식의 다음 발전단계의 침식, 경작지의 경우 경운 작업으로 억제 불가능한 규모의 토양 침식)을 모의하기에는 많은 한계가 있다. 특히 대한민국과 같이, 산악 지형이 많고 그 평균 경사도 또한 매우 높아서, 협곡 침식이 발생될 확률이 높기 때문에 협곡 침식 모형에 관한 연구가 필요하다고 판단된다(Descroix et al., 2008).

정확한 토양유실, 특히 협곡 침식(협곡 침식 발생 지역 및 유실량)을 효과적으로 모의하기 위하여 nLS (McCuen and Spiess, 1995), Water Erosion Prediction Project (WEPP; Flanagan and Nearing, 1995), nLSCSS (Elliot et al., 1989), Wetness Index (WTI; Moore et al., 1988), AS2 (Montgomery and Dietrich, 1989, 1992) 모형이 개발되어 최근까지 이용되어 왔다(Grabs et al., 2009; Kim, 2006; Pandey et

al., 2008; Pieri et al., 2007). 본 연구에서는 이들 모형 중 구조적으로 SATEEC system과의 결합이 가능하고, Gully head (협곡 침식 발생지점) 모의에 있어 다른 모형에 비해서 정확성이 높은 nLS 모형을 선정하여 Gully head를 모의하였다(Table 1).

Kim(2006)의 연구에 의하면 nLS 모형은 Gully head를 모의하는 다양한 모형 중에서 상대적으로 정확한 모의가 가능하고 폭넓은 적용성을 가지고 있는 모형이라고 결론지었다(Table 1).

본 연구에서는 협곡 침식에 의한 토양유실을 모의하는데 한계가 있고, 지형을 고려하여 유실된 토양의 퇴적을 모의할 수 없는 SATEEC system의 한계를 보완하기 위하여 USLE 입력자료 만으로 협곡 침식을 포함한 토양 유실 산정이 가능하고 SATEEC system 과의 결합이 가능한 Unit Stream Power-based Erosion/Deposition (USPED; Mitas and Mitasova, 1998; Mitasova et al., 1996) 모형을 사용하였다. USPED 모형은 토양의 운반능에 의한 침식과 퇴적을 모두 고려하는 시스템으로 협곡 침식으로 발생하는 토양유실량 산정이 가능하다. 토양 유실을 산정하는 여러 가지 모형이 존재하지만, SATEEC system, nLS, USPED 모형을 연계할 경우 실제 유역에서 발생하는 많은 종류의 침식, 특히 협곡 침식을 포함한 정확한 토양유실 모의가 가능하리라 판단된다.

본 연구의 목적은 (1) SATEEC system, nLS, USPED 모형을 연계하여 면상, 세류뿐만 아니라 협곡 침식모의가 가능한 토양 유실 모의 시스템을 개발하고, (2) 개발된 모형을 이용하여 실제 유역에 적용하여 토양 유실량 및 유사량을 산정하는 것이다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상지역

본 연구에서는 심각한 탁수 발생이 우려되어 소양댐 유역에서 탁수 우선 관리 지역으로 선정된 3개의 유역(양구 해안면, 인제 가아리, 흥천 자운리 유역) 중에서 산지를 개간하여 임의로 경작을 하고 있는 임의 경작지의 면적 비율이 높은 강원도 양구군 해안면 유역을 연구대상지역으로 선정하였으며(한강수계관리위원회, 2008), 유역 면적은 61.78 km²로 산림이 전체 유역의 58.8%, 농경지가 37.2%, 시가화

Table 1. Overall model accuracy of WTI, nLSCSS, and nLS in the calibration (Kim, 2006)

Interval	Subwatershed	Total modeled cells	Predicted gully head cells	User accuracy for gully head (%)	Overall accuracy (%)
$\mu \pm 0.5\sigma$	WTI	47,817	85	0.23	65.3
	nLSCSS	33,436	60	0.14	66.5
	nLS	17,747	33	0.19	87.1
$\mu \pm 1.0\sigma$	WTI	55,170	108	0.20	60.0
	nLSCSS	46,191	79	0.14	66.5
	nLS	30,040	65	0.22	78.2
$\mu \pm 1.5\sigma$	WTI	56,427	120	0.19	59.1
	nLSCSS	52,034	90	0.14	66.5
	nLS	38,337	85	0.22	72.2

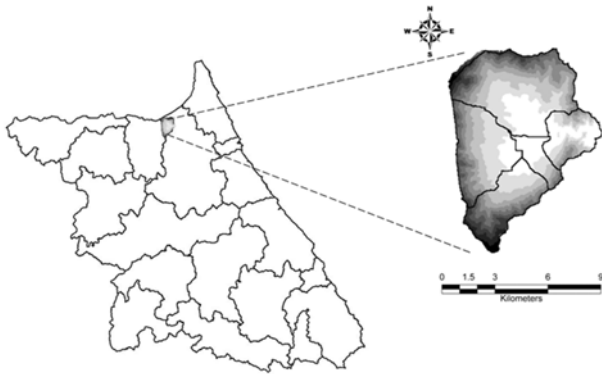


Fig. 1. Location of Haeam-myeon watershed.

가 1.9%, 수역이 1.3%, 나지가 0.6%, 초지가 0.2%로 산림과 농경지가 대부분을 차지하고 있다. 해당 유역은 해발고도가 높은 지역으로 가장 낮은 해발 고도가 300 m이며, 400 m에서 600 m에 해당하는 지역이 전체의 60% 정도에 해당한다. Fig. 1은 본 연구의 대상지역인 양구군 해안면 유역을 나타내고 있다.

2.2. SATEEC system

2.2.1. SATEEC system의 개요

SATEEC system의 기반이 되는 USLE는 면상침식(Sheet erosion)과 세류침식(Rill erosion)에 의한 토양 유실량을 모의할 수 있는 시험포 단위(Field-scale) 모형이다. 유역에서 발생한 토양 유실에 따른 하류 수계의 탁수 및 수질, 비점 오염 문제를 해결하기 위해서는 유실된 토양이 얼마나 하천으로 유입되는지 평가해야 한다. 하지만 USLE 등의 시험포 단위 모형은 유역에서의 토양 유실 가능 추정치만을 산정 할 수 있고, 유역 최종 유출구에서의 유수량 모의가 불가능하기 때문에 하류의 탁수 발생 및 토양 유실이 수질 변화에 미치는 영향을 평가하기 힘들다. 이에 시험포 모형의 유역 적용 시 한계를 극복하기 위해 USLE 모형의 입력

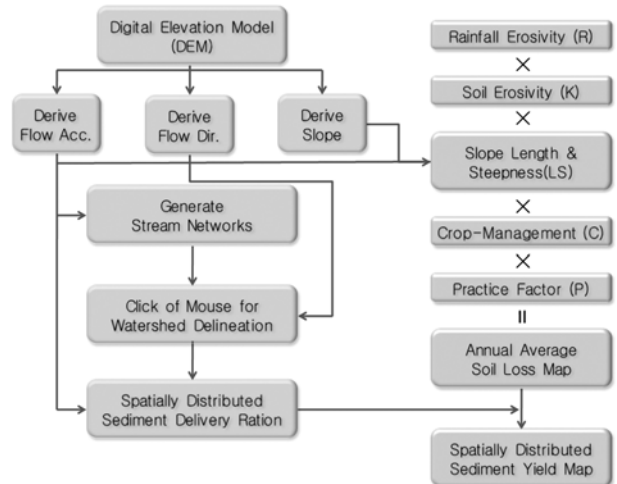


Fig. 2. Overview of the SATEEC system ver. 1.6 (Park et al., 2007).

자료와 유달률 모듈을 이용하여 유실된 토양이 얼마나 하천으로 유입되는지를 모의할 수 있는 SATEEC system이 개발(Lim et al., 2005)되어 이용되고 있다(Fig. 2). SATEEC system ver. 1.6은 ArcView GIS를 기반으로 하며 유역면적에 따른 유달률을 산정하여 유역에서 유실된 토양이 얼마나 하류로 유달되는지를 모의할 수 있다.

2.2.2. SATEEC 모형의 입력자료

2.2.2.1. 수치표고모형(DEM), 경사도와 경사장 인자(LS)

경사도 인자(USLE S factor)는 단일 경사를 이루는 지형의 경사도와 표준 시험포의 경사도인 9%와의 비를 말하고 경사장 인자(USLE L factor)는 단일 경사를 이루는 지형의 길이와 표준 시험포의 길이인 23.13 m의 비를 말한다. SATEEC system에서 경사도와 경사장 인자는 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM)을 이용하여 Moore and Burch (1986a, 1986b)의 방법 식 (1)을 이용하여 계산한다(Fig. 3).

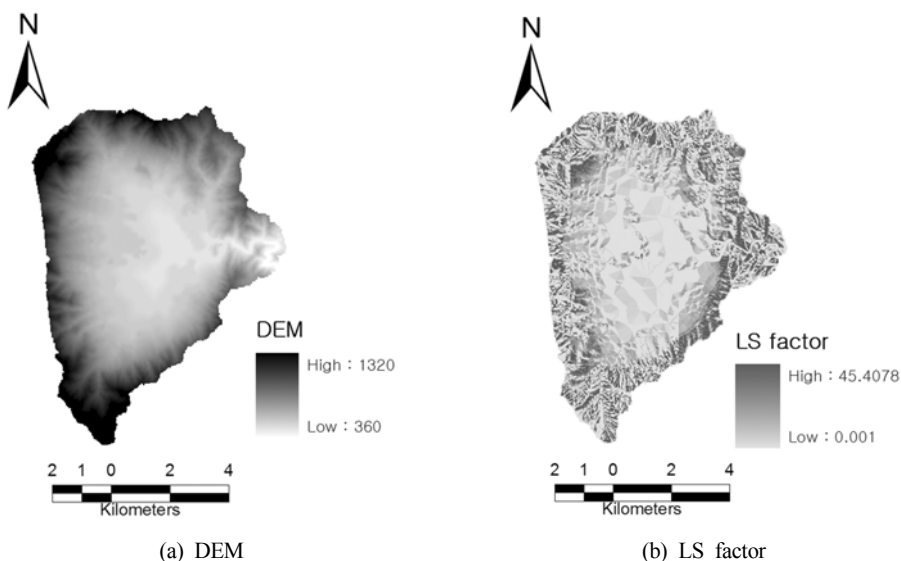


Fig. 3. DEM and USLE LS factor in SATEEC system.

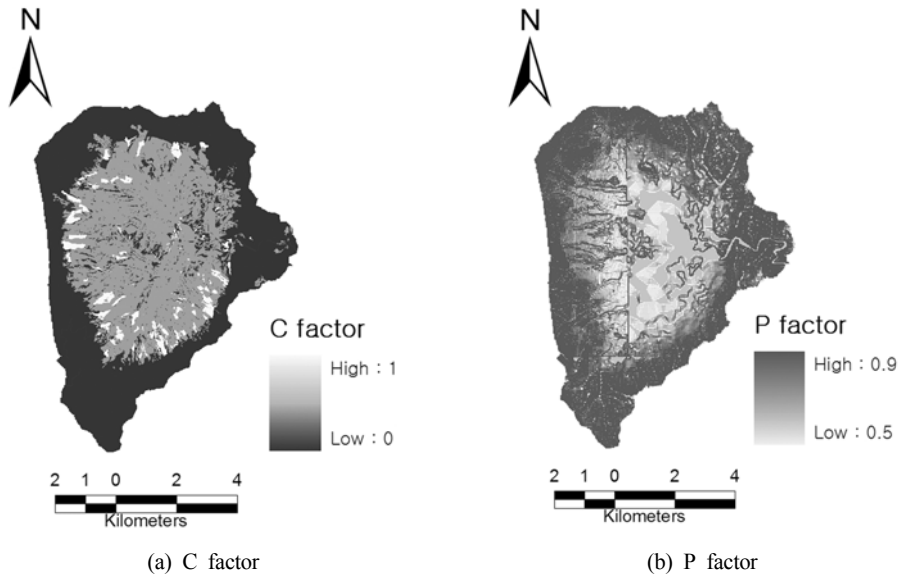


Fig. 5. USLE C and P factors in SATEEC system.

Table 4. USLE P factors for different land uses and slopes

Land use	P factor	
Paddy land	0.2	
Upland	Slope	P factor
	0 ~ 2%	0.60
	2 ~ 7%	0.50
	7 ~ 12%	0.60
	12 ~ 18%	0.80
	18 ~ 24%	0.90
	24 ~ 30%	0.95
>30%	1.00	

Table 5. Manning's n coefficient for different land uses (Vieux et al., 2004)

Class	Landuse	Manning's n coefficient
1	Water area	0.03
2	Urbanization	0.015
3	Eroded land	0.035
4	Marsh	0.05
5	Grassland	0.13
6	Forest	0.1
7	Paddy field	0.05
8	Cropland	0.035

연구에서는 박철수(1999)이 제안한 토지이용과 경사도에 따른 경작방법인자를 사용하였다(Table 4).

2.2.2.3. 유역의 면적을 고려한 유달률 산정

유달률(Sediment delivery ratio, SDR)은 총 토양유실에 대한 유사량의 비로 정의된다. 널리 알려진 유달률 산정 공식은 유달률과 유역의 크기의 관계로 표현된 식이며 본 연구에서는 Vanoni(1975)가 제안한 식 (3)이 이용되었다.

$$SDR = 0.472 * AREA^{-0.125} \quad (\text{Vanoni, 1975}) \quad (3)$$

AREA = Watershed area (Km²)

2.3. nLS 모형

nLS 모형은 Gully head, 즉 협곡 침식 발생 지점을 모의 하는 모형으로 기본 공식은 식 (4)와 같다.

$$Gully\ head = \frac{3.3nL}{\sqrt{S}} \quad (4)$$

n = Manning's coefficient,

L = The length of overland flow,

S = Slope (m/m)

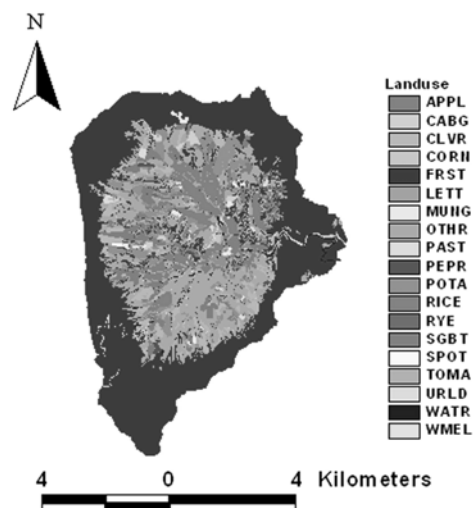


Fig. 6. Land use in Haean-myeon watershed.

공식에서 L, S 값은 DEM 으로 계산되며, Mannig's n 값은 Vieux 등(2004)이 제안한 토지이용별 조도계수를 사용하였다(Table 5). 해안면 유역의 토지이용은 Fig. 6과 같으며 이에 따른 조도계수는 Fig. 7과 같이 나타내어진다.

McCuen and Speiss (1995)는 다수의 실험을 통해 식 (4)

Value	Count	Crop	Landuse	Manning's n	USLE C Factor
1	5864	FRST	310	0.10000	0.001
2	314472	FRST	310	0.10000	0.001
3	6260	URLD	110	0.01500	0.010
4	131940	OTHR	220	0.03500	0.260
5	1104	PAST	410	0.13000	0.010
6	28188	CLVR	220	0.03500	1.000
7	3812	WATR	710	0.03000	0.000
8	34004	POTA	220	0.03500	0.260
9	35048	SGBT	220	0.03500	0.260
10	3352	PEPR	220	0.03500	0.260
11	360	TOMA	220	0.03500	0.260
12	396	LETT	220	0.03500	0.260
13	3624	APPL	220	0.03500	0.260
14	46852	RICE	210	0.05000	0.260
15	3324	CABG	220	0.03500	0.260
16	3832	MUNG	220	0.03500	0.260
17	1208	CORN	220	0.03500	0.260
18	580	WMEL	220	0.03500	0.260
19	1100	RYE	220	0.03500	0.260
20	316	SPOT	220	0.03500	0.260

Fig. 7. Land use properties and estimated Manning's n values.

에서 산정된 수치가 100 이상일 때 지표의 흐름이 면상 흐름에서 집중된 흐름으로 바뀌는 위치를 파악하는 중요한 결정기준, 즉 협곡 침식이 발생되기 쉬운 지점(Gully head)이라고 판단하였다. 또 Kim (2006)은 연구에서 사용자의 편의를 위해 GIS 기반의 nLS 모형을 개발하였으며, Gully head를 정확하게 산정하는데 사용되는 중요한 인자인 DEM의 해상도를 변수로 하여 그에 따른 nLS 결과를 분석, 실제 유역에 적용하였는데, 본 연구에서도 이를 ArcView Avenue 프로그래밍을 통해 nLS 인터페이스를 개발하여 해안면 유역의 Gully head를 모의하였다.

2.4. USPED 모형

USPED 모형은 정상적인 조건에서 강우 시 유출에 의해 발생하는 토양에 침식과 침식 과정에서 발생하는 퇴적을 모의하는 모형이다(Mitas and Mitasova, 1998; Mitasova et al., 1996). USPED 모형은 강우로 인한 토양 유실량을 예측하는 USLE기반의 모형들과는 달리 주로 유출의 형태에 따라 달라지는 운반능에 의한 침식과 퇴적을 예측하는 모형이며, 세류 및 협곡 침식 모의가 가능하다. 본 연구에서 사용된 USPED의 운반능 T 는 식 (5)와 같이 산정될 수 있으며, 이는 USLE 입력 자료만으로 연산이 가능하다.

$$T = RKCPA^m(\sin b)^n$$

(Mitasova et al., 1996; Mitas and Mitasova, 1998) (5)

R = USLE R factor, K = USLE K factor,
 C = USLE C factor P = USLE P factor,
 A = Area (km²),
 $m \cdot n$ = coefficient for types of soil erosion

여기서 R, K, C, P 는 각각 USLE의 입력 자료를 뜻하고, A 는 유역의 면적, m 과 n 은 토양유실에 종류(면상, 세류 침식)에 의해 결정되는 계수이다. 면상 침식일 경우 $m = n = 1$ 이고, 세류 침식일 경우 $m = 1.6, n = 1.3$ 이다.

운반능 T 를 기본적인 계수로 하고 있는 USPED의 공식은 식 (6)과 같다.

$$ED = \frac{d(T\cos\alpha)}{dx} + \frac{d(T\sin\alpha)}{dy}$$

(6)

(Mitas and Mitasova, 1998; Mitasova et al., 1996)

α = Slope angle (degree)

2.5. SATEEC, nLS, USPED 연계한 종합 토양 유실량 산정 시스템 개발

본 연구에서는 협곡 침식을 포함한 토양 유실량과 유사량을 산정하기 위하여 SATEEC system, nLS, USPED 모형을 연계한 시스템을 Arc View GIS를 기반으로 개발하고, 입력 자료 구축 후 실제 유역에 적용, 협곡 침식 모의의 필요성에 대해 분석하였다. 개발된 연계 모형의 연산 과정은 Fig. 8과 같다.

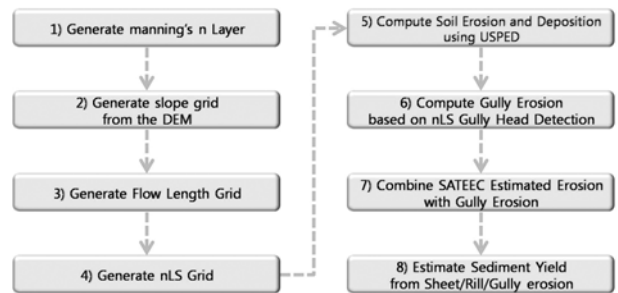


Fig. 8. Modeling process of integrated system using SATEEC, nLS, and USPED.

1)~4) 과정은 연구 대상 유역의 토지이용(Fig. 8)을 이용하여 생성된 Manning's n 값과 DEM을 이용하여 생성된 유역의 경사장, 경사도 값을 이용하여 nLS grid를 생성하고, 생성된 nLS grid에서 식 (4)에서 계산된 값이 100 이상인 지점을 선정하여 Gully head를 모의하는 과정이다. 5)~6) 과정은 4) 과정에서 생성된 Gully head 지점의 토양 침식과 퇴적을 USPED 모형을 이용하여 모의하는 과정이다. 7)~8) 과정은 SATEEC system을 이용하여 생성된 유역의 토양 유실과 6) 과정에서 생성된 Gully head 지점에서의 토양 침식, 퇴적을 결합하여 협곡 침식을 포함한 토양 유실량을 산정하고, 유역의 면적을 이용하여 산정된 유달률을 고려하여 유역의 최종 유출구에서의 유사량을 산정하는 과정이다.

개발된 연계 모형의 적용성 평가를 위해서는 실측 유사량 자료와의 비교를 통한 검증이 필요하나, 해당 유역의 장기 실측 유사량 자료의 부재로 인해 검증 과정은 수행하지 못하였다. 본 연구에서 개발된 시스템의 적용성을 평가하기 위한 추가적인 연구가 반드시 수행되어야 하리라 판단된다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SATEEC, nLS, USPED 연계 시스템 개발

본 연구에서는 협곡 침식을 고려한 토양유실 및 유사량 산정을 위하여 SATEEC system, nLS, USPED 연계 모형을

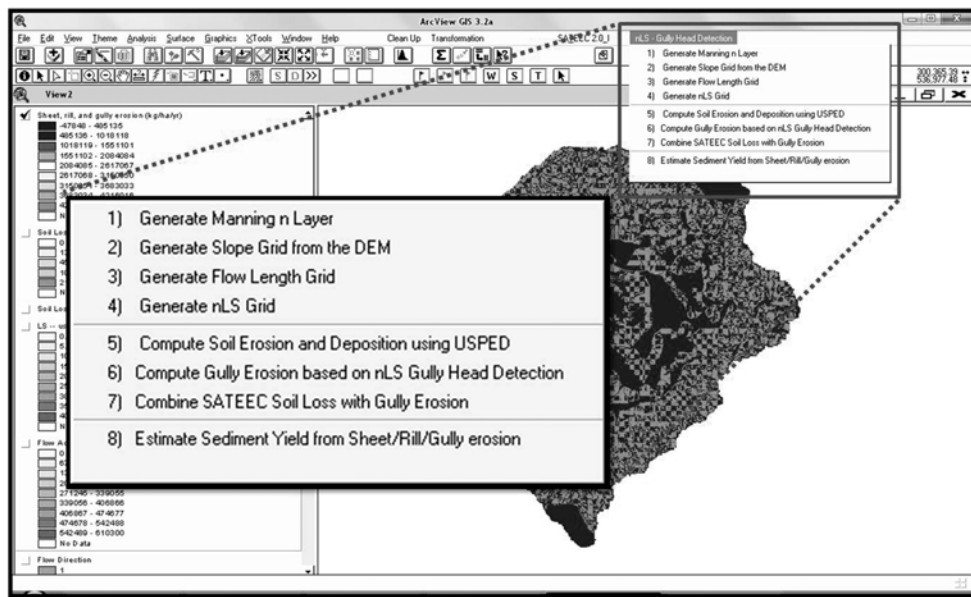


Fig. 9. Interface of integrated system using SATEEC, nLS, and USPED.

개발하여 해안면 유역에 적용하였다. 이에 개발된 연계 모형의 인터페이스는 Fig. 9와 같다. 기존의 SATEEC system은 협곡 침식에 의한 토양 유실 모의가 어려웠지만, 개발된 연계 모형을 사용할 경우 Gully head 모의 및 협곡 침식을 고려한 토양 유실량 산정이 가능하다. 아래 Fig. 9에서 보이는 바와 같이 모든 과정이 Avenue 프로그래밍을 통해 자동화되었기 때문에 비전문가도 쉽게 본 시스템을 이용하여 다양한 토양유실 평가가 가능하리라 판단된다.

3.2. SATEEC system 으로 산정된 토양 유실량

본 연구에서는 USLE의 입력자료를 SATEEC system에 적용, 해안면 유역에서의 면상, 세류 침식을 고려한 토양 유실량을 산정하였다(Fig. 10). 모의 결과 해안면 유역에서 발생하는 토양 유실량은 단위 면적당 평균 61,348 kg/ha/

year로 산정되었으며 이 결과는 후에 SATEEC, nLS, USPED 연계 모형의 입력 자료로 사용되었다.

3.3. SATEEC, nLS, USPED 연계 모형의 모의 결과

3.3.1. nLS 모형을 이용한 Gully head 산정

본 연구에서 개발된 통합 시스템을 이용하여, Gully head 선정에 있어 다른 모형에 비하여 정확성이 높은 nLS 옵션을 활용하여 Gully head를 모의하였다. Fig. 11은 Gully head를 모의하는데 필요한 Manning's n grid를 나타내고 Fig. 12는 유역의 경사도, 직접 유출거리를 나타내고 있으며, Fig. 13(a)는 nLS 입력 자료를 바탕으로 생성된 nLS grid를, Fig. 13(b)는 nLS grid 중 식 (4)에서 계산된 셀 값이 100 이상인 곳과 하천 유입 전까지 발생 가능한 협곡 침식 위치를 나타내는 Gully grid를 나타낸다.

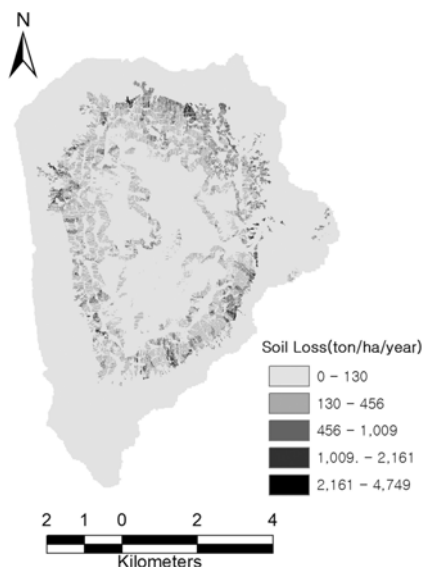


Fig. 10. Soil Loss Estimated using the SATEEC

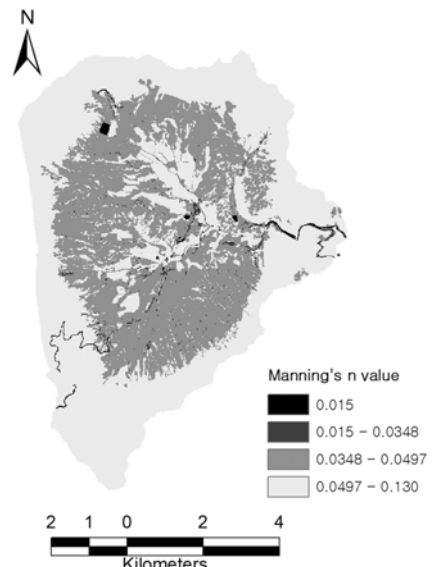


Fig. 11. Manning's n grid.

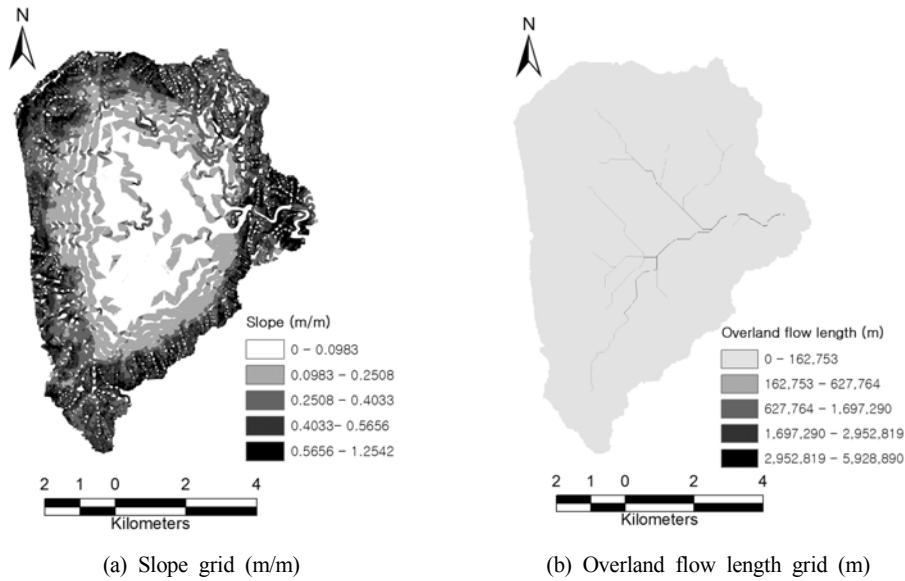


Fig. 12. Slope and overland flow length grid.

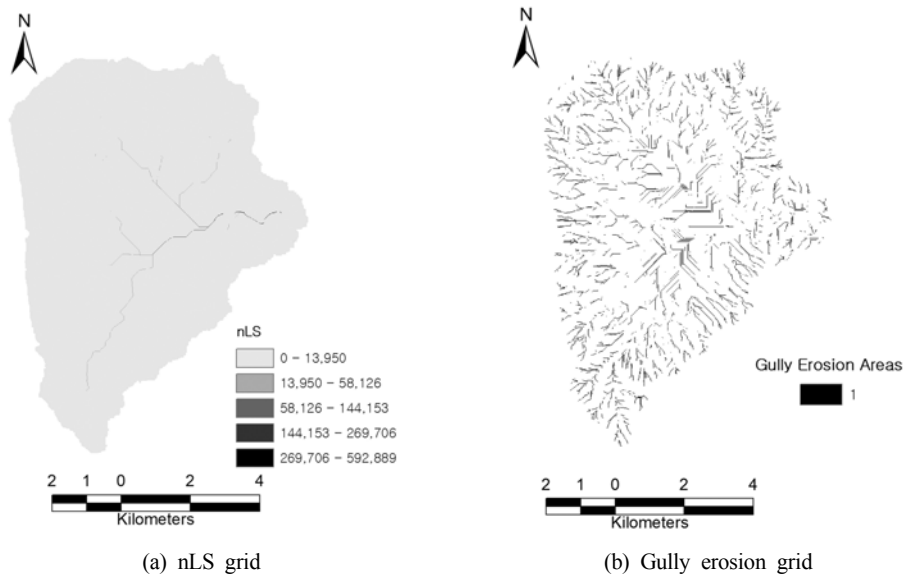


Fig. 13. nLS and gully erosion grid.

3.3.2. USPED 모형을 이용한 Gully head 지점에서의 침식량 산정

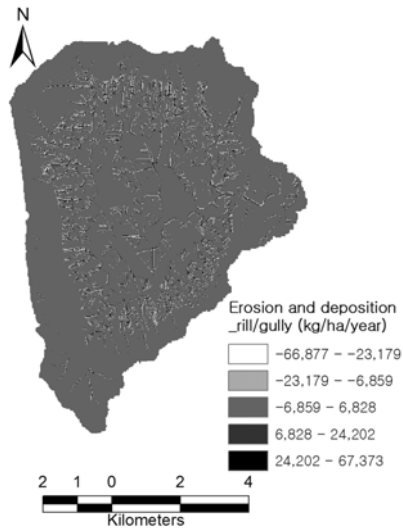
본 연구에서는 Gully head 산정 후 해당 지점에서의 협곡 침식량 산정을 위하여 협곡 침식 모의가 가능한 USPED 모형을 이용하여 Gully head 지점에서 발생하는 협곡 침식량을 모의하였다. Fig. 14(a)는 USPED 모형을 이용하여 산정된 전체 유역에서의 토양 침식, 퇴적량을 나타내고, Fig. 14(b)는 Fig. 14(a)에서 산정된 값 중 Gully head 지점에서의 토양 침식, 퇴적량을 나타낸다. Fig. 14(a)에서 음수로 표현된 값은 토양의 침식을, 양수로 표현된 값은 토양의 퇴적을 의미한다. Fig. 14(b)에서는 토양의 침식과 퇴적을 나타내는 부호가 Fig. 14(a)와는 반대로 모의되었는데 그 이유는 차후 SATEEC system 에서 모의된 토양 유실량과의 결합을 위한 것이다. SATEEC system과 USPED 모형은 기본적인

로 토양 침식 및 토양 유실을 나타내는 부호는 서로 다르기 때문에, 결합하기 전에 USPED 모형의 결과값의 부호를 바꾸어 주었다. 이와 같은 모든 과정이 본 연구에서 개발한 통합 시스템을 통해서 자동으로 산정된다.

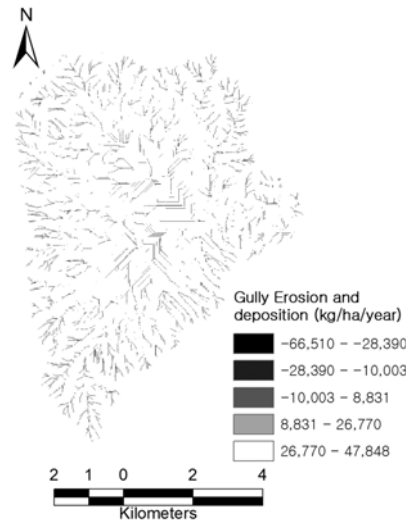
3.3.3. 협곡 침식을 고려한 토양 유실, 유사량 산정

본 연구에서는 협곡 침식을 고려한 토양 유실량과 유역의 최종 유출구에서의 유사량을 산정을 위하여 SATEEC system을 이용하여 산정된 토양 유실량과(Fig. 10) nLS와 USPED 모형으로 산정된 Gully head 지점에서의 토양 유실, 퇴적량(Fig. 14(b))을 결합하였다.

Fig. 15는 연계 모형을 이용하여 산정된 협곡 침식을 고려한 토양 유실량을 나타내고, 모의 결과 단위 면적 당 -66 ~ 4,749 ton/ha/year의 토양 유실이 발생하는 것으로 모의



(a) Soil erosion and deposition using USPED model



(b) Soil erosion and deposition from the gully head place

Fig. 14. Gully erosion at the gully head place.

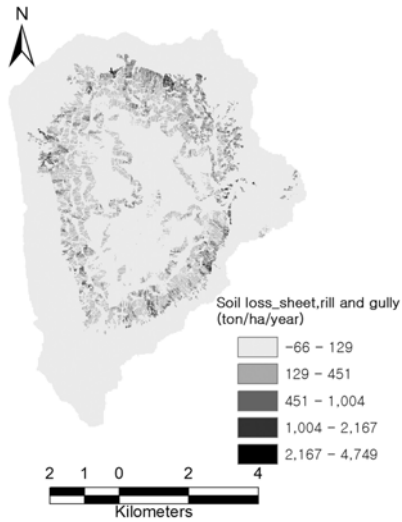


Fig. 15. Soil loss grid with sheet, rill and gully erosion.

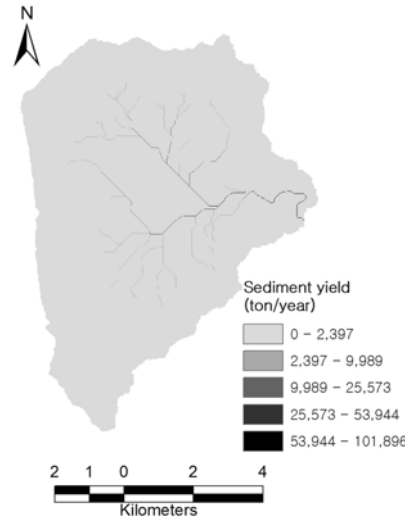


Fig. 17. Spatially-distributed Sediment Yield grid considering sheet, rill and gully erosion.

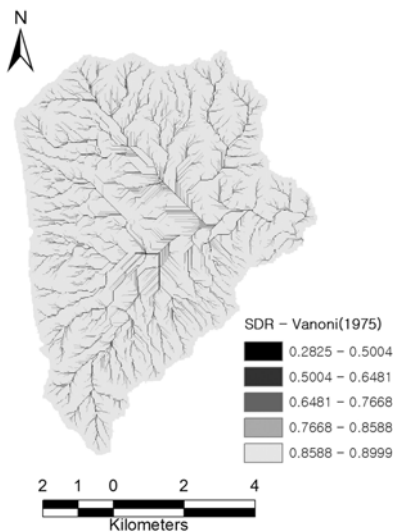


Fig. 16. Sediment delivery ratio grid estimated using the SATEEC SDR module.

되었으며 여기에서 양수로 표시된 값은 실제 유역에서 단위 면적 당 발생하는 토양 유실량을, 음수로 표시된 값은 USPED 모형에서 모의된 후 부호를 바꾼 값으로 지형의 요철을 고려하여 산정된 단위 면적당 퇴적량을 의미한다. Fig. 16은 유역의 면적을 고려한 유달률을 나타내며 0.2825 ~ 0.8999의 범위로 산정되었다. Fig. 17은 유달률을 고려한 협곡 침식을 포함한 유역의 최종 유출구에서의 유사량을 나타내며, 모의 결과 연 평균 101,896 ton/year의 유사량이 발생하는 것으로 모의되었다.

4. 결론

본 연구에서는 면상, 세류, 협곡 침식을 모두 고려한 토양 유실량 및 유사량 산정을 위하여 SATEEC, nLS, USPED 연계시스템을 개발하였으며, 강원도 양구군 해안면

유역을 연구 대상 유역으로 하여 입력자료를 구축하고, 모형 예측치를 산정하였다. 모형 연산 결과, 면상, 세류, 협곡 침식을 모두 고려한 토양 유실량은 단위 면적 당 -66 ~ 4,749 ton/ha/year의 범위로 산정되었으며, 여기에서 양수로 표시된 값은 유역에서 발생하는 단위 면적당 토양 유실량을, 음수로 표시된 값은 지형의 요철을 고려하여 산정된 단위 면적당 퇴적량을 의미한다. 또한 유달률을 고려한 유역의 최종 유출구에서의 총 유사량은 연평균 101,896 ton/year로 산정되었다.

토양 유실을 모의함에 있어, 유역에서 발생하는 면상, 세류, 협곡 침식을 종합적으로 고려하여야 실제 현장에서 발생하는 토양 유실 및 유사량을 정확하게 모의할 수 있을 것이라 사료된다. 따라서 본 연구에서 개발된 SATEEC, nLS, USPED 연계 모형을 이용한다면 실제 유역에서 발생하는 여러 형태의 토양 유실을 정확하게 모의할 수 있을 것이라 판단된다.

본 연구의 주된 목적은 SATEEC, nLS, USPED을 연계하여 면상, 세류 침식 뿐만 아니라 협곡 침식 평가가 가능한 모형을 개발하는 것이다. 개발된 모형으로 모의된 토양 유실량과 유사량의 정확성을 검증하기 위해서는 실측 데이터와의 보정/검정 작업이 필요하나, 본 연구에서는 해당 유역 실측 데이터의 부재로 인해 모형의 보정/검정 작업은 수행하지 못하였다. 하지만 향후 진행될 연구에서는 실측 데이터와의 보정/검정 작업을 통해 본 연구에서 개발된 통합 모형에 대한 정확성과 보다 다양한 연구지역을 선정하여 토양유실 및 유사량을 모의한 후 모형의 적용성을 평가한다면 본 연구에서 개발된 시스템은 다양한 토양유실 관련 정책 개발 및 대안 수립에 효율적으로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

사 사

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비지원(과제번호: 2-2-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 박윤식, 김중건, 박준호, 전지홍, 최동혁, 김태동, 최중대, 안재훈, 김기성, 임경재(2007). 임하댐 유역의 유사 거동 모의를 위한 SWAT 모델의 적용성 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **23**(4), pp. 467-473.
- 박철수(1999). 울문천 소유역에서 토지이용에 따른 불특정 오염 Monitoring. 석사학위논문, 강원대학교.
- 정영상, 권영기, 임형식, 하상건, 양재의(1999). 강원도 경사지 토양 유실예측용 신 USLE의 적용을 위한 강수 인자와 토양 침식성인자의 검토. *한국토양비료학회지*, **32**(1), pp. 31-38.
- 정필균, 고문환, 엄기태(1984). 토양유실량 예측을 위한 작부인자 검토. *한국토양비료학회지*, **18**(1), pp. 7-13.
- 최재완, 현근우, 이재운, 신동석, 김기성, 박윤식, 김중건, 임경재(2009). WEPP Watershed Version을 이용한 홍천군 자운리 농경지 토양유실 예측 및 경사도에 따른 토양유실량 평가. *수질보전 한국물환경학회지*, **25**(3), pp. 441-451.
- 한강수계관리위원회(2008). *한강수계 2007년도 환경기초조사사업 한강수계 탁수저감대책 마련을 위한 연구*.
- 허성구, 김기성, 사공명, 안재훈, 임경재(2005). 고령지 농경지의 토양유실 모의를 위한 SWAT 모형의 적용성 평가. *한국농촌경제학회지*, **11**(4), pp. 67-74.
- 허창희, 강인식(1988). 한국 지역 강수의 변동성에 관한 연구. *한국기상학회지*, **24**(1), pp. 38-48.
- Descroix, L., González Barrios, J. L., Viramontes, D., Poulenard, J., Anaya, E., Esteves, M., and Estrada, J. (2008). Gully and sheet erosion on subtropical mountain slopes: Their respective roles and the scale effect. *CATENA*, **72**, pp. 325-339.
- Elliot, W. J., Liebenow, A. M., Laflen, J. M., and Kohl, K. D. (1989). A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988. NSERL Report No. 3. USDA-ARS National Soil Erosion Research Lab., West Lafayette, IN.
- Flanagan, D. C. and Nearing, M. A. (1995). USDA Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette, IN, 47907-1194.
- Foster, G. R., Renard, K. G., Yoder, D. C., McCool, D. K., and Weesies, G. A. (1996). *User's Guide*, Soil & Water Cons. Soc.
- Grabs, T., Selbert, J., Bishop, K., and Laudon, H. (2009). Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *Journal of Hydrology*, **373**(1-2), pp. 15-23.
- Kim, I. (2006). Identifying the roles of overland flow characteristics and vegetated buffer systems for nonpoint source pollution control. Ph. D. Dissertation, Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Lim, K. J., Sagong, M., Engel, B. A., Tang, Z., Choi, J., and Kim, K. (2005). GIS-based sediment assessment tool. *CATENA*, **64**, pp. 61-80.
- McCuen, R. H. and Spiess, J. M. (1995). Assessment of kinematic wave time of concentration. *Journal of Hydrologic Engineering*, **121**(3), pp. 256-266.
- Mitas, L. and Mitasova, H. (1998). Distributed erosion modeling for effective erosion prevention. *Water Resources Research*, **34**(3), pp. 505-516.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., and Iverson, L. R. (1996). Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *Int. Journal of Geographical Information Science*, **10**(5), pp. 629-641. (reply to a comment to this paper appears in 1997 in *Int. Journal of Geographical Information Science*, **11**(6)).
- Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1989). Source areas, drainage density, and channel initiation. *Water Resources Research*, **25**(8), pp. 1907-1918.
- Montgomery, D. R. and Dietrich, W. E. (1992). Channel initiation and the problem of landscape scale. *Science*, **255**, pp. 826-830.
- Moore, I. D., Burch, G. J., and Mackenzie, D. H. (1988).

- Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE*, **31**(4), pp. 1098-1107.
- Moore, I. and Burch, G. (1986a). Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Science Society of America Journal*, **50**, pp. 1294-1298.
- Moore, I. and Burch, G. (1986b). Modeling Erosion and Deposition: Topographic Effects. *Transactions of the ASAE*, **29**(6), pp. 1624-1640.
- 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**(3-4), pp. 305-319.
- Pieri, L., Bittelli, M., Joan, Q. W., Shuhui, D., Dennis, C. F., Paola, R. P., Francesca, V., and Fiorenzo S. (2007). Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. *Journal of Hydrology*, **336**(1-2), pp. 84-97.
- Vanoni, V. A. (1975). Sedimentation Engineering, Manual and Report No. **54**, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y.
- Vieux, B. E., Cui, Z., and Gaur, A. (2004). Evaluation of a physicsbased distributed hydrologic model for flood forecasting. *Journal of Hydrology*, **298**, pp. 154-155.
- Williams, J. R. (1975). Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resour. Bull.*, **11**(5), pp. 965-974.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. The USDA Agricultural Handbook No. 537.