

시강우량을 이용한 필지별 유출-유사 평가 시스템 및 BMPs 평가 모듈 개발 및 적용성 평가

금동혁 · 류지철 · 최재완* · 신민환 · 신동석* · 천세억* · 최중대 · 임경재†

강원대학교 지역건설공학과
*국립환경과학원

Development and Evaluation of Runoff-Sediment Evaluation System and BMPs Evaluation Modules for Agricultural Fields using Hourly Rainfall

Donghyuk Kum · Jichul Ryu · Jaewan Choi* · Min Hwan Shin · Dong Suk Shin* ·
Se Uk Cheon* · Joong-dae Choi · Kyoung Jae Lim†

Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University
*National Institute of Environmental Research

(Received 26 November 2011, Revised 29 March 2012, Accepted 15 April 2012)

Abstract

Soil erosion has been emphasized as serious environmental problem affecting water quality in the receiving waterbodies. Recently, Best Management Practices (BMPs) have been applied at a field to reduce soil erosion and its effectiveness in soil erosion reduction has been monitored with various methods. Although monitoring at fields/watershed outlets would be accurate way for these ends, it is not possible at some fields/watersheds due to various limitations in direct monitoring. Thus modeling has been suggested as an alternative way to evaluate effects of the BMPs. Most models, which have been used in evaluating hydrology and water quality at a watershed, could not reflect rainfall intensity in runoff generation and soil erosion processes. In addition, source codes of these models are not always public for modification/enhancement. Thus, runoff-sediment evaluation system using hourly rainfall data and vegetated filter strip (VFS) evaluation module at field level were developed using open source MapWindow GIS component in this study. This evaluation system was applied to Bangdongri, Chunchonsi to evaluate its prediction ability and VFS module in this study. The NSE and R^2 values for runoff estimation were 0.86 and 0.91, respectively, and measured and simulated sediment yield were 15.2 kg and 16.5 kg indicating this system, developed in this study, can be used to simulate runoff and sediment yield with acceptable accuracies. Nine VFS scenarios were evaluated for effectiveness of soil erosion reduction. Reduction efficiency of the VFS was high when sediment inflow was small. As shown in this study, this evaluation system can be used for evaluation BMPs with local rainfall intensity and variations considered with ease-of-use GIS interface.

keywords : Best Management Practices (BMPs), MapWindow, Open source GIS, Runoff, Sediment yield, Vegetated filter strip

1. 서 론

2007년 유엔 산하 정부 간 기후변화패널(IPCC)에서 발간된 보고서에서는 지구온난화에 따른 기상이변으로 인하여 홍수발생빈도나 강우일수 등이 지속적으로 증가하여 세계 곳곳에서 자연재해가 빈번히 발생할 것으로 예측하였다(기상청, 2007). 2011년 여름은 어느 해보다도 많은 강우량을 기록하여, 서울은 지난 100년 이래 역대 1위의 강우일수를 기록하였고, 강우량 또한 역대 2위를 기록하였다. 서울뿐만 아니라 기상청 자료에 따르면 전국적으로 강우량 및 강우일수 뿐만 아니라 강우강도도 해가 거듭 될수록 증가하는

추세에 있고, 최근에는 그 증가 추세가 더 뚜렷해지고 있는 것으로 나타나고 있다(기상청, 2009). 이처럼 강우량·강우강도·강우일수가 증가하면서 국내에서도 많은 사회적·환경적 문제가 발생하고 있다. 특히 강우에 의해 유실되어 수계로 유입되는 토사는 수리 구조물을 불안정하게 만들고 탁도를 증가시키며 토사에 흡착되어 있는 영양물질, 금속, 탄화수소 등이 수생태계를 파괴하고 취수를 악화시키는 등의 악영향을 끼쳐 사회적으로나 환경적으로 해결되어야만 하는 문제로 나타나고 있다. 이에 환경부에서는 강우 유출수에 의해 발생하는 토사를 비점오염물질로 고시하고, 2007년 수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 제54조에 의거 주민의 재산이나 자연생태계에 중대한 위해가 발생할 우려가 큰 도암호, 소양호, 임하호 등을 비점오염원 관리지역으로 지정하였다. 그리고 동법 제55조에 의거 관리대상 수질

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

오염물질의 발생예방 및 저감방안 추진 등 비점오염원 관리를 위한 대책을 2007년 12월 수립하고 토양유실을 저감하기 위한 노력을 기울이고 있다.

최근에는 환경부에서 토양유실 저감 대책으로 필지별 최적관리기법(Best Management Practices: BMPs) 적용하고 저감효과를 모니터링하고 있고, 모니터링 결과 비점오염 관리 우선 유역에 BMPs를 적용했을 때 탁수저감효과가 있는 것으로 평가되고 있다. 하지만 탁수의 저감이 BMPs의 효과에 의해 이루어졌는지 아니면 해당유역의 연차별/계절별 강우사상에 따른 효과인지 모니터링 결과만을 통해서 판단하기에 여러 가지 어려움이 있다. 또한 이러한 BMPs 적용에 따른 탁수저감 효과 모니터링이 필지별로 측정된 곳도 있지만, 소유역 말단부에서 측정된 모니터링 결과만을 이용하여 이루어진 곳도 있기 때문에 객관적이고 명확한 BMPs 기법 적용에 따른 삭감효과 평가라고 평가할 수 없다. 이런 모니터링 기법의 한계로 인해 수문/비점 모형을 이용하여 평가하는 방법이 대안으로 제시되고 있다. 그러나 그동안 비점오염 평가 기법 모형은 대부분 daily time-step 기반 모형이기 때문에, 강우강도를 반영할 수 없는 단점이 있으며, hourly time-step 모형의 경우 유역단위 및 소유역 단위로 평가가 이루어지기 때문에 필지단위별 BMPs 적용효과를 평가하기에는 한계가 있다(류지철 등, 2010; 유동선 등, 2007).

또한 대다수의 모형들은 고가의 상업용 제품이기 때문에 초기 구입비용의 부담과 모형의 소스코드를 개방하지 않기 때문에 사용자는 작성된 코드 안에서만 모형을 이용해야 하는 활용도의 제한이 있다. 이에 해외에서는 초기 구입비용이 절감되고, 소스코드를 공개하여 활용도가 크며 자유롭게 배포 및 설치 가능한 Open Source Software의 도입을 적극 권장하고 있고, 정부에서도 최근 Open Source Software의 적용비용을 늘려 Open Source Software의 활성화를 추진하고 있다. 특히 수문/비점 분야에서도 전 세계적으로 Open Source Software 중의 하나인 Open Source GIS를 활용한 시스템 개발이 증가하고 있는 추세이다(Ambrose et al., 2009).

이에 본 연구의 목적은 1) 시강우량을 이용한 필지별 유출-유사 평가 시스템 개발과 2) 다양한 BMPs에서 초생대의 유사 저감효과 산정 모듈 개발 및 적용성 평가, 3) Open Source GIS 기반의 Interface 개발을 통해 전국 관련 분야의 지방자치단체의 공무원이나 정책개발자가 정책개발 및 집행에 활용할 수 있는 BMPs 평가시스템 개발이다.

2. 연구방법

2.1. Open Source GIS 개요

현재의 지리정보시스템(Geographic Information System:

GIS) 분야의 소프트웨어는 대부분 ESRI사의 ArcView나 ArcGIS 등과 같은 상업용 제품들이 주로 이용되고 있다. 하지만 상업용 GIS 소프트웨어는 제품 가격 자체가 고가로 형성되어 있어 초기 구입비용의 부담과 구매 후에도 특정한 수의 컴퓨터에서만 구동이 가능하도록 되어 있어 자유롭게 배포 및 설치가 불가능하다(정명훈과 서용철, 2009). 이에 국내외적으로 라이선스 비용이 거의 없고 소프트웨어의 수정과 배포가 용이한 Open Source GIS의 활용이 점차 증가하고 있는 추세이다(남광우와 오달수, 2006). Open Source GIS는 소스코드가 개방되며 이를 사용목적에 따라 자유롭게 개작, 재배포 등이 허용되면서도 저작권자의 권익이 보호되도록 제도화된 소프트웨어이다(Table 1). 사용자가 자유롭게 소프트웨어를 무료로 사용하고 목적에 맞게 소스코드를 수정하여 사용할 수 있는 점이 가장 큰 장점이지만, Open Source GIS가 공짜를 의미하는 것은 아니다. 모든 사용자들이 Software를 이용하고 소스코드에 접근하여 소스코드 수정을 통해 소프트웨어를 발전시키는 개발자적 참여를 의미한다.

2.2. BMPs 평가시스템 개발

2.2.1. MapWindow 기반의 통합 Interface 개발

본 연구에서는 다양한 Open Source GIS 중 MapWindow를 이용하여 시스템 인터페이스를 개발하였다. MapWindow(Watry et al., 2007)는 Idaho 주립대학교 Geospatial Software Lab에서 개발되어 ArcGIS에서 많이 활용되는 벡터 데이터 형식인 Shape 파일을 기본포맷으로 하고 있다. 그리고 Open Source GIS 소프트웨어의 큰 단점 중인 하나인 유지보수의 문제와 소프트웨어의 품질과 성능, 그리고 신뢰성 부분은 이미 US EPA의 BASINS 모형도 MapWindow를 기반으로 4.0버전이 개발되어 배포되고 있으며, 국내에서도 이를 이용한 시스템 개발이 활발히 진행 중이기 때문에(서상일, 2009) 본 연구에서는 MapWindow를 이용하여 Interface를 개발하였다. Fig. 1은 본 연구에서 개발된 평가시스템의 모식도이다.

2.2.2. 유출량 평가 모듈 개발

2.2.2.1. 강우시간분포 모듈

본 연구에서 개발된 필지별 유출-유사 평가 모듈은 기본적으로 시강우량 자료를 이용하여 유출 및 유사를 평가하기 때문에 사용자가 모의지역의 시강우 자료를 구축하고 있으면 그대로 모형의 강우 입력 자료로 활용하여 유출 및 유사를 평가할 수 있다. 하지만 구축된 강우 입력 자료의 특정 일자에 시강우 결측치가 있거나 사용상에 문제가 있을 경우에 부득이하게 사용자는 일강우 자료를 이

Table 1. Advantages and disadvantages of open source GIS

Advantages	Disadvantages
• Not having to pay license fees	• Training costs may be high
• No restriction to the number of installations.	• New projects may have initial starting troubles
• Support of open standards	• No maintenance and support
• Good support of open standards and unrestricted use of the software.	• No warranties regarding viruses and performance

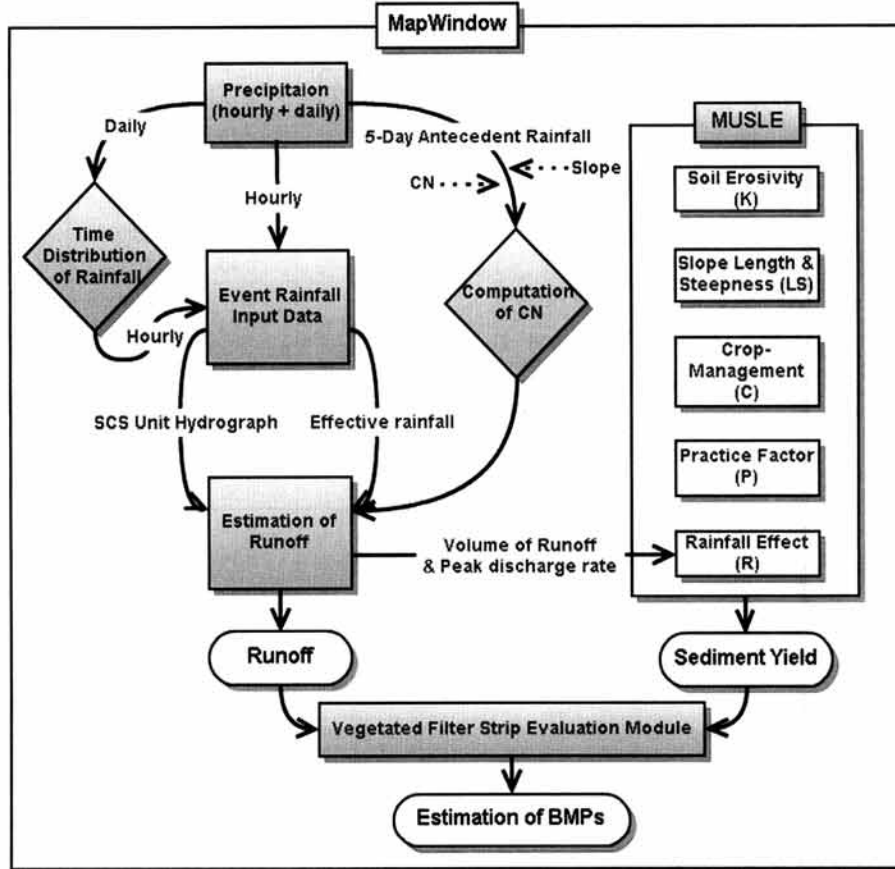


Fig. 1. Overview of hourly rainfall-runoff and sediment evaluation system.

용해야 한다. 이를 위해 강우입력자료 중에 일강우가 있을 경우 해당 일자의 일강우를 시강우로 자동변환하여 모형에 자동 적용되도록 건설교통부에서 제시한 HUFF의 4분위법을 활용하였다. 건설교통부에서 제시한 HUFF의 4분위법은 1967년 HUFF가 일리노이주의 강우기록을 통계학적으로 분석하여 강우량의 시간적 분포를 나타내는 무차원 시간분포곡선을 국내에도 적용할 수 있도록 전국기상청관측소의 강우자료를 통계학적으로 분석하여 제시한 무차원누가곡선으로 실무에서도 많이 채택되어 활용되고 있다(건설교통부, 2000).

2.2.2.2. Curve Number 산정 모듈

유출곡선지수(Curve Number: CN)는 총우량으로부터의 직접유출에 대한 잠재력을 나타낸다. CN값은 미국 자연자원보호청(Natural Resources Conservation Service: NRCS)에서 토지이용상태, 수문학적 토양군, 피복밀도에 따라서 제시한 CN값이 자주 활용되고 있지만 NRCS에서 제시한 CN값은 평균 경사도 5%미만의 지역에서의 유출량 산정에 적합하다. 지형이 복잡하고 경사가 심하며 국지성 호우 발생이 빈번하게 발생하는 국내에 적용하기에는 문제가 있다. 이에 선행토양함수조건과 경사도를 고려하여 CN값 산정이 필요하다. 우선 1년을 식물이 성장하는 성수기(4월 15일 ~ 10월 15일, Growing season)와 식물의 휴면기인 비성수기(1월 1일 ~ 4월 14일, 10월 16일 ~ 12월 31일, Dormant season)로 나누고, 5일 선행강수량에 따라 AMC I, II, III로 구분하여

토양도 및 토지이용도별 적절한 CN값을 산정한다(Table 2). 이렇게 산정된 CN I, II, III를 식 (1)에 적용하여 CN값을 보정한다. 식 (1)은 경사가 다른 지역에 적용하기 위하여 Williams (1995)가 개발한 관계식이다.

$$CN_{2s} = \frac{(CN_3 - CN_2)}{3} \cdot [1 - 2 \cdot \exp(-13.86 \cdot slp)] + CN_2 \tag{1}$$

여기서 CN_{2s} 는 AMCII 조건하에서 경사도에 따라 보정된 CN값, CN_3 는 경사도 5%에 대해서 AMCIII 조건하에서의 CN값, CN_2 는 경사도 5%에 대해서 AMCII 조건하에서의 CN값, 그리고 slp 는 유역의 평균경사도(%)

Table 2. Classification of antecedent moisture condition for the NRCS method of rainfall abstraction

AMC	Total 5-day antecedent rainfall (mm)	
	Growing season	Dormant season
I	Less than 35.56	Less than 12.70
II	35.56 to 53.34	12.70 to 27.94
III	Over 53.34	Over 27.94

2.2.2.3. 유출량 산정 모듈

유출량 평가는 SCS합성단위도법이 가장 많이 사용되어지고 있다. SCS합성단위법은 미자연자원보존국의 전신인 토양보존국이 개발한 방법으로 삼각형 단위도를 기반으로 발

전한 무차원단위도이다. 박승우 등(2008)은 SCS합성단위도법을 이용하여 실측치와 모의치를 비교 검토한 결과 시험유역의 유출 특성을 잘 반영한 것을 결론을 내렸다. 하지만 SCS 합성단위도법은 최근처럼 시시각각 변화하는 강우패턴을 반영하기에는 한계점을 지니고 있다. 이에 본 연구에서는 시장우자료를 활용하여 강우패턴과 강우강도가 반영될 수 있도록 강우 사상별 SCS 삼각단위도와 구간별 유효유량을 이용하여 필지의 유출량을 산정하였다.

SCS 단위도는 우선 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 유효유량과 최대잠재보유수량을 산정하고, 강우가 유출구까지 도달하는 시간(식 (4))을 이용하여 단위침투유량(식 (5))을 산정한다. 이렇게 산정된 단위침투유량을 이용하여 최종적으로 침투유량(식 (6))을 산출하여 SCS삼각단위도를 생성했다. 그리고 유효유량은 시간당 강우량을 10분당 강우량으로 나누어 10분당 강우에 따른 유효유량을 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 산정하였다.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

$$Q = \frac{(P - 0.2 \cdot S)^2}{P + (0.8 \cdot S)} \quad (3)$$

여기서 S는 토양의 최대잠재보유수량, CN은 유출곡선지수, P는 누가우량 그리고 Q는 유효누가우량.

$$t_c = \frac{L^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9 \right)^{0.7}}{4407 \sqrt{Y}} \quad (4)$$

여기서 t_c 는 도달시간, L은 경사장, Y는 경사도, CN은 유출곡선지수.

$$q_u = 4.3046 \times 10^{C_0 + C_1 \log t_c + C_2 (\log t_c)^2 - 6} \quad (5)$$

$$q_p = q_u \cdot A \quad (6)$$

여기서 q_u 는 단위침투유량, C_0 , C_1 , C_2 는 초기손실량($I_a = 0.2S$)과 강우에 따른 Storm Type별 매개변수(Table 3), q_p 는 침투유량, A는 면적.

2.2.3. 유사량 평가 모듈 개발

토양유실에 따른 유사량을 산정하기 위한 방법으로 국내에서는 주로 범용토양손실공식(Universal Soil Loss Equation: USLE)과 유달률(Sediment Delivery Ratio: SDR)이 주로 사용되고 있다. 하지만 USLE 공식은 주로 연평균 토양유실량을 산정하기 위해 개발되었기 때문에 본 연구에 목적인 단일 호우에 대한 유사량 산정에는 적합하지 않다. 이에 단일 호우에 대한 유사량 산정이 가능한 수정범용토양손실 공식(Modified Universal Soil Loss Equation: MUSLE)을

Table 3. Value of the C_0 , C_1 , C_2 based on the ratio I_a/P and storm type

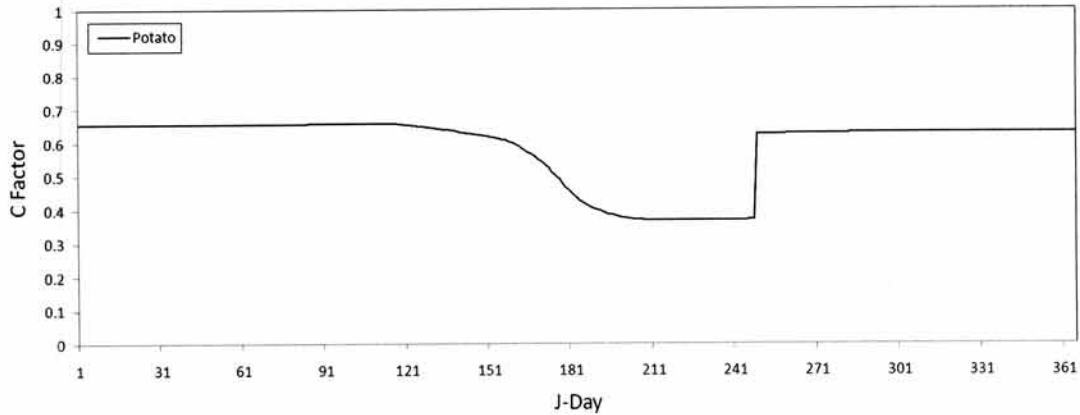
Storm type	I_a/P	C_0	C_1	C_2
I	0.10	2.3055	-0.51429	-0.1175
	0.20	2.23537	-0.50387	-0.08929
	0.25	2.18219	-0.48488	-0.06589
	0.30	2.10624	-0.45695	-0.02835
	0.35	2.00303	-0.40769	0.01983
	0.40	1.87733	-0.32274	0.05754
	0.45	1.76312	-0.15644	0.00453
	0.50	1.67889	-0.06930	0.0
IA	0.10	2.0325	-0.31583	-0.13748
	0.20	1.91978	-0.28215	-0.0702
	0.25	1.83842	-0.25543	-0.02597
	0.30	1.72657	-0.19826	0.02633
	0.50	1.63417	-0.09100	0.0
II	0.10	2.55323	-0.61512	-0.16403
	0.30	2.46532	-0.62257	-0.11657
	0.35	2.41896	-0.61594	-0.0882
	0.40	2.36409	-0.59857	-0.05621
	0.45	2.29238	-0.57005	-0.02281
	0.50	2.20282	-0.51599	-0.01259
III	0.10	2.47317	-0.51848	-0.17083
	0.30	2.39628	-0.51202	-0.13245
	0.35	2.35477	-0.49735	-0.11985
	0.40	2.30726	-0.46541	-0.11094
	0.45	2.24876	-0.41314	-0.11508
	0.50	2.17772	-0.36803	-0.09525

이용하여 필지의 유사량을 산정하였다. MUSLE공식은 Williams (1975)에 의해 개발된 것으로 단일 소유역에 적용할 경우 토사전달율이 이미 반영된 식으로 유사량 산정시 전달율을 고려할 필요가 없다. 식 (7)은 기본적인 MUSLE의 공식이다.

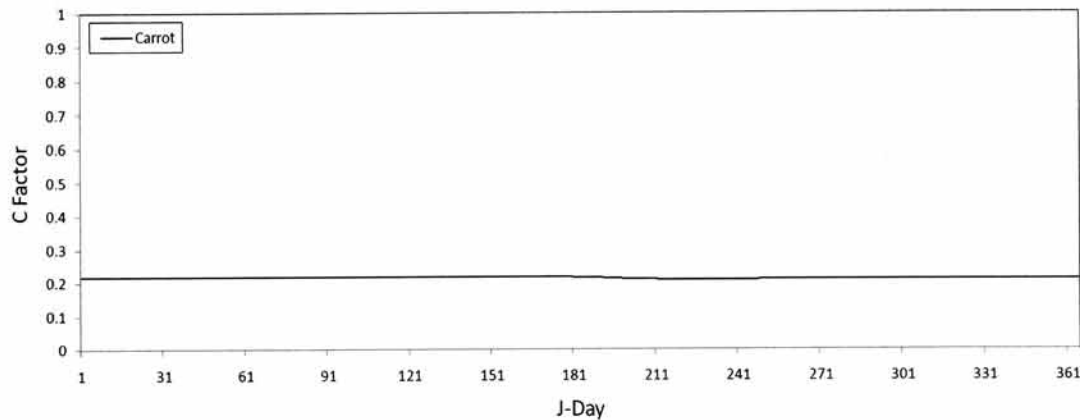
$$A = 9.05 (V \cdot Q_p)^{0.56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (7)$$

여기서 V와 Q_p 는 유출량(m^3)과 침투유량(m^3/s)으로 유출량 산정시 산정된 유출량과 침투유량이 활용되고, A는 단일호우에 의한 유사량(kg/m^2), K는 토양특성인자, L은 사면길이인자, S는 사면경사인자, C는 식생피복인자, P는 토양보존인자.

식생피복인자는 작물성장에 따른 지표피복면적의 영향을 받는다. 작물이 파종되고 수확을 하기까지 시간적으로 입면적 지수와 식생높이가 변하여 지표가 받는 강우타격의 영향이 감소하게 되어 식생피복인자는 시간적으로 변화하게 된다. 하지만 기존의 연구들에서는 이를 고려하지 않고 작물별 대표 C값을 이용하여 유사량을 평가했다. 이에 Park et al. (2010)은 Time-Variant C 모듈을 개발하여 Fig. 2와 같이 작물별 성장에 따른 시간적 지표 상태를 고려한 유사량 평가가 가능하도록 하였다. 따라서 본 연구에서는 작물 성장에 따른 시간적 지표피복 상태를 고려할 수 있는 Time-Variant C DB를 적용하여 시간적/작물별 식생피복인자를 산정하였다.



(a) Daily C factor of potato



(b) Daily C factor of carrot

Fig. 2. Change of the daily C factor (Park et al., 2010).

2.2.4. 초생대 유사 저감효과 산정 모듈 개발

초생대는 강우시 유사를 저감시키기 위한 목적으로 농경지 주변 경계에 설치되며, 유출수의 유속을 저감시켜 유출수에 포함되어 있는 유사를 비롯한 비점오염물질을 침전시키거나 여과시키는 역할을 한다. 이런 초생대의 유사 저감효과를 평가할 수 있는 대표적인 모형에는 SWAT 모형과 VFSMOD 모형 등이 있다. 하지만 SWAT 모형은 유역단위의 모형으로서 다양한 입력 자료를 필요로 하며, 초생대의 폭만을 고려하여 초생대의 유사 저감효율을 유역 전체에 일괄적으로 적용하기 때문에 유역단위의 초생대 유사저감효과를 평가할 수는 있지만 필지별 초생대의 유사 저감효과를 산정할 수 없다. 필지별 초생대 유사저감효과 평가가 가능한 VFSMOD 모형은 field-scale 모형으로서 유출은 설계 강우에 의한 단위도, 유사는 MUSLE 공식을 이용하여 산정한다. 이렇게 산정된 유출량과 유사량을 이용하여 필지에서 초생대로의 유출과 유사저감효율을 모의한다. 하지만 VFSMOD 모형은 필지에서 재배되는 작물의 성장에 따른 C값의 변화를 고려할 수 없으며, 선행강우와 경사도에 따른 CN값의 변화를 고려할 수 없는 단점이 있다. 이에 박윤식 등(2008)은 VFSMOD 모형에서 10,000가지의 시나리오 평가를 통해 식 (8)과 같은 VFSMOD 회귀모형을 제시하였다. 이 회귀모형은 초생대의 폭과 필지에서 발생되는

유출량을 이용하여 초생대의 유사 저감효과를 산정하는데 VFSMOD모형에 의한 유사 저감효율과 비교/검정한 결과 결정계수(R²)와 유효지수(EI)가 거의 1에 가까운 값을 나타냈다. 이에 본 연구에서는 C값의 변화와 선행강우/경사도에 따른 CN값의 변화를 고려할 수 있는 식 (8)를 초생대의 유사 저감효과를 산정하는데 적용하였다.

$$\begin{aligned} \text{Trapping Efficiency} = & (-0.00007345046 \times L^3 + 0.001558 \times L^2 - 0.006376 \times L - \\ & 0.001189) \times (\text{LN}(V))^3 + (0.0009688469 \times L^3 - 0.020779 \times L^2 + \\ & 0.095153 \times L + 0.019348) \times (\text{LN}(V))^2 + (-0.004274 \times L^3 + \\ & 0.092846 \times L^2 - 0.487355 \times L - 0.10563) \times (\text{LN}(V)) + \\ & (0.006381 \times L^3 - 0.140713 \times L^2 + 0.869293 \times L + 0.19386) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 LN은 자연로그, L은 초생대의 폭(m), V는 유출량(m³)

2.3. 유출/유사 적용성 평가

개발된 유출-유사 평가 시스템의 적용성 평가에는 결정계수(R²)와 유효지수(NSE)를 이용하였으며, NSE 산정공식은 식 (9)과 같다(Nash and Sutcliffe, 1970). NSE 값이 1에 가까울수록 예측치가 실측치를 잘 예측하는 것을 의미한다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2} \quad (9)$$

여기서 O_i 는 강우사상별 실측 값, P_i 는 평가시스템에서의 강우사상별 예측 값, \bar{O}_i 는 모의기간동안의 강우사상별 실측 값의 평균값.

R^2 가 0.5 이상이고 NSE가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의하는 것이며(Ramanarayanan et al., 1997), 일반적인 모형의 효율 범위와 신뢰 구간은 Table 4와 같다.

Table 4. Criteria for evaluating model performance (Donigian and Love, 2003)

Evaluation	Poor	Fair	Good	Very good
NSE	< 0.6	0.60 ~ 0.70	0.70 ~ 0.80	> 0.80

2.4. 연구 대상 지역 선정

본 연구를 통해 개발된 평가시스템은 필지단위로 유출량 및 유사량을 평가하기 때문에 시스템의 정확성을 평가하기 위해서는 필지단위의 유출량과 유사량 자료가 필요하다. 이에 강원대학교에서 강원도 춘천시 서면 방동리에 조성한 시험포를(Fig. 3) 시범 적용대상 필지로 선정하였다. 이 시험포는 3%의 경사와 가로 5 m × 세로 22 m의 크기로 조성되어 있고, 밭에는 무 작물이 관행적으로 이루어지고 있는 작물 재배 방법과 동일한 방법으로 재배되고 있다. 또한 방동리에 조성되어 있는 시험포는 발생한 유출량과 강우량을 측정하기 위하여 시험포 하단 유출부에 수위를 측정하는 Flume과 자기우량계가 설치되어 강우시 강우량이 자동적으로 측정되며 이에 따른 유출량 또한 자동적으로 측정되고 있다. 하지만 유사량은 강우 사상에 따른 측정이 아닌 일정기간동안의 총량으로 측정이 이루어지고 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유출 및 유사 적용성 평가

강원도 춘천시 서면 방동리의 시험포에서 조사된 2011년 6월 1일부터 2011년 7월 6일까지의 강우량, 유출량, 유사량 자료를 이용하여 유출량 및 유사량을 비교·평가하였다. 강우자료에서는 6월 28일부터 7월 6일까지의 시강우량 자료에 결측이 있어 해당기간은 일강우량을 HUFF의 4분위법으로 시강우량으로 자동 변화 후 강우 입력 자료로 활용하였다. 유출량을 평가하기 위하여 5일 선행강수량과 Slope에 따른 CN값을 보정한 결과 모의기간 동안의 CN값은 71에서 85로 높아졌다. 이는 모의기간동안의 5일 선행강수량이 모두 높아 모의 기간 동안 모두 동일하고 높은 CN값이 산정되었다. 보정된 CN값을 이용하여 유출량을 평가해 본 결과 6월 23일부터 7월 3일까지 유출이 발생하였고, 실측 시강우 자료를 이용한 6월 23일부터 27일까지의 시간별 유출 특성은 침투유출량이 작게 산정된 반면 일 강우자료를 이용한 6월 28일부터 7월 3일까지의 유출특성은 침투유출량이 큰 것으로 산정되었다. 강우사상 중 6월 26일의 강우사상에 대해 시강우량 변화에 따른 시간별 유출량의 변화를 보면 Fig. 4와 같이 강우가 끝난 후 침투유출이 발생하는 것으로 나타났다. 유출 모의 결과 값을 이용하여 실측 유출량과 비교한 결과 $NSE=0.86$, $R^2=0.91$ 로 매우 높은 결과가 나왔다(Fig. 5).

유사량 평가는 Fig. 6과 같이 강우 사상별 유사량이 평가되었다. 하지만 시험포에서 측정된 유사량은 모의기간동안의 총량만 산정되었기 때문에 본 연구에서는 강우 사상별 산정된 유사량의 총량을 실측치와 비교해 보았다. 실측치와 모의치를 비교한 결과 Table 5와 같이 실측치와 모의치가 매우 근사한 결과 값을 나타냈다. 이는 본 연구를 통해 개

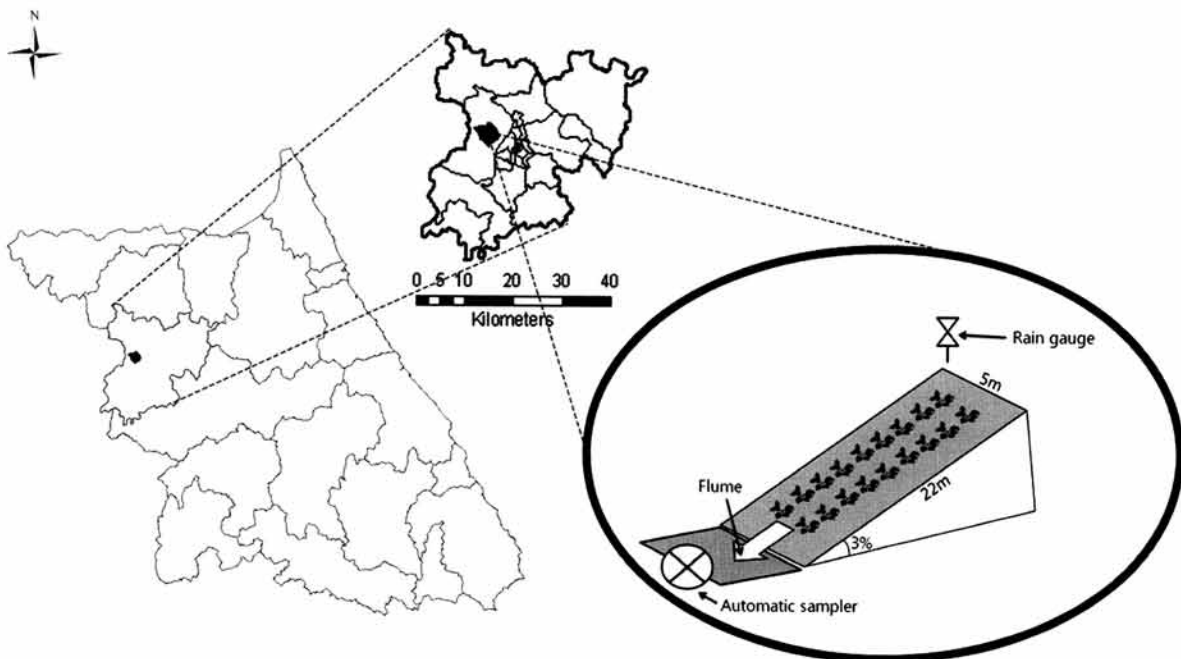


Fig. 3. Location of study area.

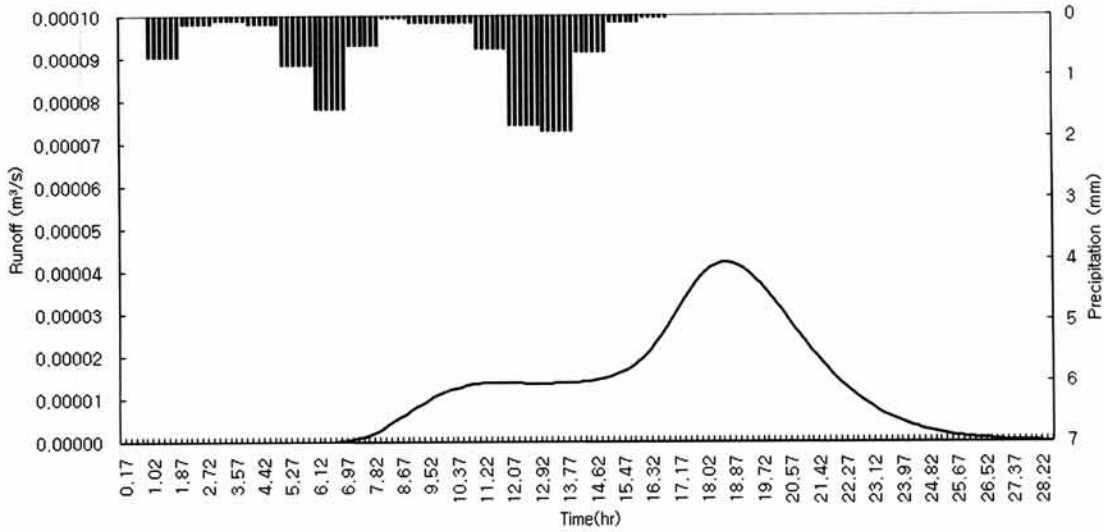


Fig. 4. Simulated hourly runoff.

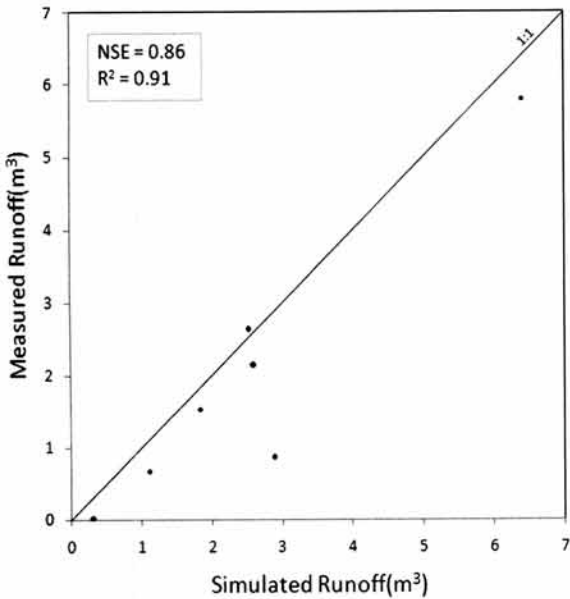


Fig. 5. Scatterplots comparing of simulated and measured runoff.

발된 유출 및 유사 평가 시스템이 유출 형상과 유사를 잘 모의하는 것으로 사료된다.

Table 5. Comparison of estimated and measured sediment yield

Measured sediment yield	Simulated sediment yield
15.2 (kg)	16.5 (kg)

3.2. 초생대 유사 저감효과 평가

본 연구에서는 다양한 BMPs 기법 중 초생대에 대한 유사 저감효과 산정 모듈을 개발하여 3개의 토지 피복 시나리오를 이용 초생대의 설치(폭 0.5 m, 1 m, 2 m)에 따른 유사 저감효과를 평가해보았다. 시나리오 1은 시험포의 지표피복 작물인 무 작물에 대한 초생대 적용, 시나리오 2는 고추작물 재배시의 초생대 적용, 시나리오 3은 지표비복 상태가 나지일 때의 초생대 적용이며, 모듈에 사용된 VFSSMOD 회귀식은 초생대의 폭과 시험포에서 발생되는 유출량을 이용하기 때문에 유출량은 앞서 산정된 강우사상별 유출량을 이용하였다. Table 6과 같이 시나리오별 유사 발생량은 나지 상태에 가장 많이 발생하였고, 무 작물로 지표가 피복되어 있을 때 가장 낮은 것으로 나타났다. 그리고 초생대 폭 0.5 m에서는 3가지 시나리오별 비슷한 저감효율을 보였지만, 폭 1 m에서는 무 89%, 고추 74%, 나지 67%로 최대 12%의 저감효과 차이를 보였다. 또한 초생대 폭 2 m에서

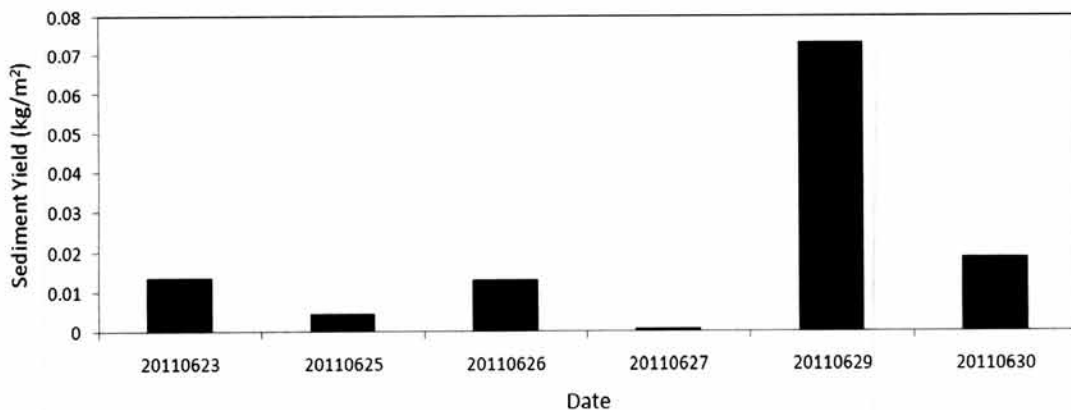


Fig. 6. Result of simulated sediment yield.

Table 6. Effects of vegetative filter strip on sediment yield trapping efficiency

Scenarios	Date	w/o VFS (kg)	w/VFS 0.5 m (kg)	w/VFS 1 m (kg)	w/VFS 2 m (kg)
1	20110623	1.51	0.81	0.42	0.00
	20110625	0.52	0.22	0.05	0.00
	20110626	1.45	0.76	0.38	0.00
	20110627	0.10	0.02	0.00	0.00
	20110629	7.95	5.02	3.34	0.76
	20110630	2.06	1.01	0.41	0.00
	20110703	2.94	1.56	0.78	0.00
2	20110623	3.63	1.95	1.02	0.00
	20110625	1.25	0.53	0.12	0.00
	20110626	3.49	1.84	0.91	0.00
	20110627	0.23	0.05	0.00	0.00
	20110629	19.21	12.13	8.06	1.85
	20110630	4.99	2.44	1.00	0.00
	20110703	7.15	3.80	1.89	0.00
3	20110623	4.63	2.49	1.30	0.00
	20110625	1.60	0.68	0.16	0.00
	20110626	4.45	2.35	1.16	0.00
	20110627	0.30	0.07	0.00	0.00
	20110629	24.64	15.56	10.35	2.37
	20110630	6.40	3.13	1.28	0.00
	20110703	9.21	4.89	2.44	0.00

는 필지에서 발생하는 유사량이 클수록 초생대의 저감효율은 감소되는 것으로 나타났다. 초생대 저감효율을 평가하면 필지에서 발생하는 유사량이 작을수록 초생대의 저감효율이 높고, 초생대의 폭에 따라서도 저감효율이 상이하게 달라지는 것으로 나타났다. 하지만 3개의 시나리오에 따른 저감효율은 본 연구의 연구 대상지역이 경사도가 3% 정도로 매우 낮고 시험포에서 발생하는 유출량 및 유사량이 작기 때문에 크게 산정된 것으로 판단되며, 본 연구에서는 VFSSMOD 회귀식을 이용하여 초생대의 폭에 따른 저감효과를 평가 한 것이기 때문에 정확한 초생대의 저감효과를 산정 및 평가하기 위해서는 실측 모니터링 자료를 이용한 적용성 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 개발된 평가시스템은 Open Source GIS인 MapWindow를 기반으로 통합 Interface를 개발하여 구입비용의 부담이 없으며, 자유롭게 배포 및 설치가 가능하다. 현재 각 지방자치단체에서는 토양유실에 따른 탁수문제를 해결하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 따라서 다양한 BMPs 평가할 수 있는 모듈을 개발하여 평가시스템에 추가한다면 지자체 공무원이나 정책 결정권자에 의해서 널리 활용될 수 있을 것이고 유역의 탁수문제 및 비점오염 문제를 해결하기 위한 기초자료로서 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서 개발한 필지별 유출-유사 평가 시스템 및 BMPs 평가 모듈은 시강우 자료를 활용하여 필지별 발생하는 유출-유사량을 산정하기 위하여 SCS 삼각단위도와 강우

구간별 유효유량을 이용하였고, 여기서 산정된 침투유량과 유출량을 MUSLE 공식에 반영하여 단일호우에 대한 유사량을 산정하였다. 본 연구를 통해 개발된 평가시스템을 강원도 춘천시 서면 방동리의 시험포에 적용하여 실측치와 모의치를 비교·분석해 보았다. 필지의 유출량을 평가하기 위하여 선행토양함수조건과 경사도에 따른 CN값을 보정한 결과 71에서 85로 CN값이 높아졌다. 이렇게 보정된 CN값을 이용하여 유출량을 실측치와 비교한 결과 NSE=0.86, R²=0.91로 나타났으며 유사량은 모의기간의 총량을 이용하여 실측치와 모의치를 비교한 결과 실측치는 15.2 kg, 모의치는 16.5 kg으로 매우 근사한 값을 나타내어 높은 적용성을 보였다.

그리고 3가지 시나리오에 따른 초생대의 유사 저감효과 평가 결과 초생대 폭이 좁을 경우 유사 저감효과는 필지에서 발생한 유사량에 관계없이 비슷한 저감효율을 보였고, 폭 1 m에서는 시나리오별 저감효율이 큰 차이를 보였다. 그리고 필지에서 발생하는 유사량이 작을수록 초생대의 저감효율이 크며, 초생대 폭이 증가함에 따라 그 효율도 증가하지만, 지표 피복 상태에 따라 저감효율은 큰 차이를 보이는 것으로 나타났기 때문에 초생대의 현장적용 시 본 시스템을 활용하게 되면 필지면적과 지표 피복 상태를 고려하여 가장 효과적이고 경제적인 초생대 폭을 산정 할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 본 연구에서는 한 달 정도의 다소 짧은 기간의 실측자료를 이용하여 평가시스템의 적용성 평가를 한 것이기 때문에 향후 장기간의 강우-유출-유사 모니터링 자료를 활용하여 평가시스템의 적용성 평가 및 초생대 평가 모듈 적용성 평가를 실시할 것이다.

향후 연구에서는 1) 평가시스템의 적용성을 높이기 위하

여 유출량 및 유사량에 대한 Auto Calibration Tool 개발과 2) BMPs 평가시스템으로서의 활용성을 높이기 위하여 초생대 외의 다양한 BMPs 평가 모듈의 개발 및 추가하여 평가시스템을 질적으로 확장할 것이다.

사 사

본 연구는 국립환경과학원(과제번호 20110510745-00, 비점관리 고시지역 BMP 적용에 따른 삭감효과 산정모델 개발)과 농림수산식품부와 한국농어촌공사 농어촌연구원(새만금유역 농업비점오염 저감기법 개발 연구)의 연구 지원을 받아 수행되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

- 건설교통부(2000). 1999년도 수자원관리기법 개발 연구조사 보고서 : 제2권 한국 가능최대강수량추정, 별책 2, 지역적 설계 강우의 시간적 분포, pp. 61-65.
- 기상청(2007). 기후변화 2007 종합보고서(IPCC 제4차 평가 보고서 번역본), pp. 1-24.
- 기상청(2009). 2009 기상연감, pp. 21.
- 남광우, 오달수(2006). 표준/Open Source 기반의 GIS 구축 지침 개발 연구, 한국정보사회진흥원, pp. 10-102.
- 류지철, 강현우, 김남원, 장원석, 이지원, 문종필, 이규승, 임경재(2010). SWAT-REMM 모형을 이용한 봉곡천 유역의 수변림 조성에 따른 총 질소 저감 효율 분석, 수질보전 한국물환경학회지, 26(6), pp. 910-918.
- 박승우, 성충현, 김상민(2008). 농업소유역의 홍수유출량 추정을 위한 단위도 모형 비교연구, 한국농공학회지, 50(3), pp. 17-27.
- 박윤식, 김종건, 김남원, 박준호, 장원석, 최중대, 임경재(2008). VFSMOD-W 모형을 이용한 SWAT모형의 초생대 유사 저감 효율 모듈 개선, 수질보전 한국물환경학회지, 24(4), pp. 473-479.
- 서상일(2009). MapWindow GIS를 이용한 항공사진활영안내 시스템 개발, 2009년도 춘계학술대회 논문집, 대한원격 탐사학회, pp. 221.
- 유동선, 안재훈, 윤정숙, 허성구, 박윤식, 김종건, 임경재, 김기성(2007). SATEEC시스템을 이용한 객토 토양의 토성 고려에 따른 도암댐 유역의 토양유실 및 유사량 분석, 수질보전 한국물환경학회지, 23(4), pp. 518-526.
- 정명훈, 서용철(2009). Open Source GIS를 이용한 고해상도 영상의 Tile Map Service 시스템 구축에 관한 연구, 한국지형공간정보학회지, 17(1), pp. 167-174.
- Ambrose, R. B. Jr., Wool, T. A., and Barnwell, T. O. Jr. (2009). Development of Water Quality Modeling in the United States, *Environmental Engineering Research*, 14(4), pp. 200-210.
- Donigian, A. S. and Love, J. T. (2003). *Sediment Calibration Procedures and Guidelines for Watershed Modeling*, WEFTMDL, WEF Specialty Conference Proceedings on CD-ROM, Chicago, Illinois, USA. pp. 1-20.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. E. (1970). River Flow Forecasting through Conceptual Models, Part I-A Discussion of Principles, *Journal of Hydrology*, 10(3), pp. 282-290.
- Park, Y. S., Kim, J. G., Kim, N. W., Kim, S. J., Jeon, J. H., Engel, B. A., Jang, W. S., and Lim, K. J. (2010). Development of New R,C and SDR Modules for the SATEEC GIS System, *Computers & Geoscience*, 36(6), pp. 726-734.
- Ramanarayanan, T. S., Williams, J. R., Dugas, W. A., Hauck, L. M., and McFarland, A. M. S. (1997). Using APEX to Identify Alternative Practices for Animal Waste Management, *ASAE International Meeting*, Paper 97-2209, pp. 1-7.
- Watry, G., Ames, D. P., and Michaelis, C. (2007). *Introduction to MapWindow Version 4.3*, Florida State University, USA. pp. 1-136.
- Williams, J. R. (1975). *Sediment-yield Prediction with Universal Equation using Runoff Energy Factor, Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Source : Proceedings of the Sediment-yield Workshop*, ARS-S-40, US. Dept. of Agriculture Sedimentation Lab., Oxford, Miss, pp. 244-252.
- Williams, J. R. (1995). *The EPIC Model, Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resource Publications, Highlands Ranch, CO. pp. 909-1000.