

물리적 표토침식모형의 개발과 적용

유완식¹ · 박준구² · 양재의³ · 임경재⁴ · 김성철⁵ · 박윤식⁶ · 황상일⁷ · 이기하^{8*}

¹충남대학교 국제수자원연구소

²인하대학교 토목공학과

³강원대학교 바이오자원환경학과

⁴강원대학교 지역건설공학과

⁵충남대학교 생물환경화학과

⁶공주대학교 생물산업공학부

⁷한국환경정책평가연구원

⁸경북대학교 건설방재공학부

Development and Application of a Physics-based Soil Erosion Model

Wansik Yu¹ · Junku Park² · JaeE Yang³ · Kyoung Jae Lim⁴ · Sung Chul Kim⁵
Youn Shik Park⁶ · Sangil Hwang⁷ · Giha Lee^{8*}

¹International Water Resources Research Institute, Chungnam National University

²Dept of Biological Environment, Kangwon National University

³Dept of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

⁴Bio Environmental Chemistry, Chungnam National University

⁵Korea Water Environment Research Institute

⁶Department of Rural Construction Engineering, Kongju National University

⁷Korea Environment Institute

⁸Dept of Construction and Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

ABSTRACT

Empirical erosion models like Universal Soil Loss Equation (USLE) models have been widely used to make spatially distributed soil erosion vulnerability maps. Even if the models detect vulnerable sites relatively well utilizing big data related to climate, geography, geology, land use, etc within study domains, they do not adequately describe the physical process of soil erosion on the ground surface caused by rainfall or overland flow. In other words, such models are still powerful tools to distinguish the erosion-prone areas at large scale, but physics-based models are necessary to better analyze soil erosion and deposition as well as the eroded particle transport. In this study a physics-based soil erosion modeling system was developed to produce both runoff and sediment yield time series at watershed scale and reflect them in the erosion and deposition maps. The developed modeling system consists of 3 sub-systems: rainfall pre-processor, geography pre-processor, and main modeling processor. For modeling system validation, we applied the system for various erosion cases, in particular, rainfall-runoff-sediment yield simulation and estimation of probable maximum sediment (PMS) correlated with probable maximum rainfall (PMP). The system provided acceptable performances of both applications.

Key words : Physics-based model, Erosion and deposition, Runoff, Sediment yield

1. 서 론

표토침식의 형태 및 양(rate)은 여러 가지 요인에 의해

결정되며, 주요 인자는 크게 기상, 지형, 토양, 토지피복 및 이용 등으로 구분할 수 있다. 특히, 물에 의한 표토침식의 물리적 과정을 살펴보면, 일반적으로 분리(detach-

*Corresponding author : leegiha@knu.ac.kr

Received : 2017. 11. 20 Reviewed : 2017. 12. 1 Accepted : 2017. 12. 14

Discussion until : 2018. 2. 28

ment), 운반(transport), 퇴적(deposition) 과정을 거치게 되며, 수식(water erosion)에 따른 표토침식에 의한 유사량은 주로 토양분리력(detachment)과 이송능력(transport capacity)에 의해 결정된다(Toy et al., 2002).

이러한 수식에 의한 표토침식량을 가장 정확하게 산정할 수 있는 방법은 표토유실 우려지역에 대해 침식량 측정망(measurement network)를 구축하고 표토침식을 직접적으로 모니터링 하는 방법이다(Morris and Fan, 1997). 그러나 실제로 표토유실 위험지역 전반에 걸쳐 모니터링 시스템을 구축하는 것은 불가능하며, 이를 대체하기 위해 다양한 침식모형이 개발·활용되고 있다. 모형의 종류에는 단순한 경험적 모의기법에서부터 복잡한 물리적 모형까지 그 종류가 다양하지만, 일반적으로 이러한 침식모형들은 모형의 구성(복잡성), 모의하고자 하는 대상, 모의 및 검증에 필요한 자료 등에 따라서 구별되므로 침식모의를 위한 적합한 또는 최적의 모형은 상황(자료조건, 적용대상 등)에 따라 달라질 수 있다.

경험적 모형(empirical model)은 가용한 자료로부터 침식과 관련된 어떤 결과들을 특징짓는데 그 목적이 있다.

이러한 모형은 침식과정의 물리적 메카니즘을 상당부분 가정에 의해 생략하고, 침식요소들의 시·공간적 변동성을 반영하지 못한다는 약점을 지니고 있으나 아직까지도 표토침식의 상대적 위험성 평가를 위해 USLE(Universal Soil Loss Equation)-family 모형이 매우 유용하게 활용되고 있다. 그러나 이러한 모형의 가장 큰 단점은 모형이 대부분 정상성(stationarity)에 가정하고 있다는 점이며, 정상성은 주어진 조건이 대상이 되는 어느 일정기간에도 변하지 않고 일정하게 유지된다는 가정인데, 이러한 정상성 가정은 유역에서 변화하는 여러 가지 상황들을 모형에 반영하지 못한 채 예측결과를 제공할 수 있다는 것을 의미한다.

개념적 모형(conceptual model)은 지표류 흐름의 강우-유출 해석을 위하여 유역을 몇 개의 연속된 저수지(storage or tank)로 가정하여 해석하며, 유사(sediment)와 유출의 이동모의를 위해 저수지의 연결을 나타내는 구성요소를 포함하고 있다. 이러한 개념적 모형은 개발자에 의해 전술한 침식의 물리적 과정이 축소·요약하여 개념화되고 대상유역을 몇 개의 소유역으로 구분함으로써 소유

Table 1. Characteristics of widely-used erosion models

	Model	Type	Scale	Input/output
	AGNPS	Conceptual	Small catchment	Input requirements: High Output: runoff volume; peak rate, SS, N, P, and COD concentrations
	ANSWERS	Physical	Small catchment	Input requirements: High Output: sediment, nutrients
	CREAMS	Physical	field 40-400 ha	Input requirements: High Output: erosion; deposition
	EMSS	Conceptual	Catchment	Input requirements: Low Output: runoff, sediment loads, nitrogen loads and phosphorus loads
Water quality	HSPF	Conceptual	Catchment	Input requirements: High Output: runoff, flow rate, sediment load, nutrient concentration
	IHACRES-WQ	Empirical/Conceptual	Catchment	Input requirements: Low Output: runoff, sediment and nutrients
	IQQM	Conceptual	Catchment	Input requirements: Moderate Output: many pollutants including nutrients, sediments, dissolved oxygen, salt, algae
	LASCAM	Conceptual	Catchment	Input requirements: High Output: runoff, sediment, salt fluxes
	SWRRB	Conceptual	Catchment	Input requirements: High Output: streamflow, sediment, nutrient and pesticide yields
Erosion	GUEST	Physical	Plot	Input: High Output: runoff; sediment concentration
	LISEM	Physical	Small catchment	Input: High Output: runoff; sediment yield
	PERFECT	Physical	Field	Input: High Output: runoff, erosion, crop yield
	SEDNET	Empirical/Conceptual	Catchment	Input requirements: Moderate Output: suspended sediment, relative contributions from overland flow, gully and bank erosion processes
	TOPOG	Physical	Hillslope	Input: High Output: water logging, erosion hazard, solute transport
	USLE	Empirical	Hillslope	Input: High Output: erosion
	WEPP	Physical	Hillslope catchment	Input: High Output: runoff; sediment characteristics; form of sediment loss
In-stream transport	MIKE-11	Physical	Catchment	Input: High Output: sediment yield, runoff

역의 공간적 특성을 반영하게 된다. 개념적 모형의 매개 변수는 측정가능한 자료(유출량, 하천유수량 등)을 대상으로 모의결과와의 비교분석을 통하여 보정(calibration)하게 되며, 때로는 국부 최적해(local optima) 등의 존재로 인하여 매개변수의 불확실성 문제가 발생할 수 있다.

물리적 모형(physics-based model)은 강우-유출과 표토 침식-유사발생 메커니즘을 반영한 물리식을 기반으로 하고 있으며, 일반적으로 연속방정식과 운동방정식으로 구성되어 있다. 이론적으로는 물리적 모형에서의 매개변수는 '알고있는(known) 또는 측정가능한(measurable)' 변수이지만, 실제적으로 물리적 모형은 유역을 수천개 또는 수만개의 격자로 구분함에 따라 상당히 많은 양의 매개변수를 요구하게 되며, 개념적 모형과 마찬가지로 필요에 따라 관측값과 모의값을 비교하여 매개변수를 보정한다. 이러한 물리적 모형은 시간에 따른 침식요인들의 변동성을 반영할 수 있고, 대상유역을 격자 형태로 구분하는 공간 분포형(spatially-distributed) 모형구조를 따르고 있으므로 '언제', '어디서', '얼마만큼'의 표토가 침식 또는 퇴적되었는지에 대한 정보를 제공할 수 있다. 이미 국외에서는 컴퓨터 능력의 향상과 GIS 기술의 발달로 인하여 다양한 형태의 물리기반의 분포형 침식모형이 개발되어 사용되고 있다. 주요 물리적 모형에 대해 대상유역의 크기, 침식과정의 모의능력 등을 비교평가한 자세한 사항은 Bathurst (2002)등에서 찾아볼 수 있으며, Table 1은 현재 전 세계적으로 개발·활용되고 있는 전술한 세 가지 형태의 침식모형에 대한 정보를 보여주고 있다.

우리나라의 「표토의 침식 현황 조사에 관한 고시」에서 표토침식량 산정(예비조사)은 USLE 모형을 이용하여 산정하고 있으며, 연간 50 t/ha 초과일 경우 현장조사 요구하고 있다. 그러나 모형의 결과가 예비조사 대상지역의 실측자료(현장시료를 활용한 USLE 모형결과)와 상당부분 불일치하는 것으로 알려져 있다. 이는 전술한 바와 같이 모형의 구조상 표토침식의 물리적 과정 중 침식만을 모의할 수 있는 USLE 모형에서 구조적 특성에서 기인한 것으로 USLE 모형은 대규모 유역에 대해 침식발생량에 대한 공간적 정보를 획득할 수 있는 강력한 도구이나 침식과 퇴적의 물리적 메커니즘을 반영하는데 한계가 있으며, 실측 침식정보 또는 침식된 토사의 유입으로 인한 하천유수량과의 직접적 비교·검토가 불가능하다.

이에 본 연구에서는 강우발생 시 표토침식을 해석할 수 있는 물리적 알고리즘을 기반으로 대상유역의 강우-유출 및 표토침식-유사유출을 모의할 수 있는 시스템을 구축하고 개발된 시스템 적용성 평가를 위하여 용담댐 상류를

대상으로 표토침식 해석을 수행하여 이에 대한 해석결과를 제시하고, 시스템의 장단점에 대해 논의하도록 한다.

2. 표토침식 모델링 시스템

본 연구에서 개발된 표토침식 모델링 시스템은 크게 3개의 부시스템(sub-system)으로 구성되어 있다. 첫 번째 부시스템은 모형의 강우입력자료의 공간분포 생성을 위한 프로그램(rainfall input pre-processor)으로 표토침식해석을 위한 강우자료의 공간내삽(spatial interpolation)기법을 포함하고 있다. 두 번째 부시스템은 수치표고자료 등을 이용하여 대상유역의 배수계통도(drainage network)를 작성하는 프로그램(geography input pre-process)이며, 마지막으로 주프로그램(main modeling process)에서는 자료의 입출력 구조의 정의, 모델링 수행, 모의결과 재현성 평가 등의 표토침식 해석수행을 위한 해석 알고리즘을 포함한다. 보다 상세한 부프로그램의 해설은 다음과 같다.

2.1. 강우 입력자료 전처리 시스템

개발된 침식모형은 DEM 등과 같이 정방형 격자를 기본단위로 분석되므로 입력자료 역시 격자형태의 매트릭스 형태로 구성된다. 따라서 국토교통부, 기상청, 한국수자원공사 등에서 운영하고 있는 강우관측소의 좌표를 사용하여 대상유역에 해당하는 모든 격자에 대해 시계열 강우자

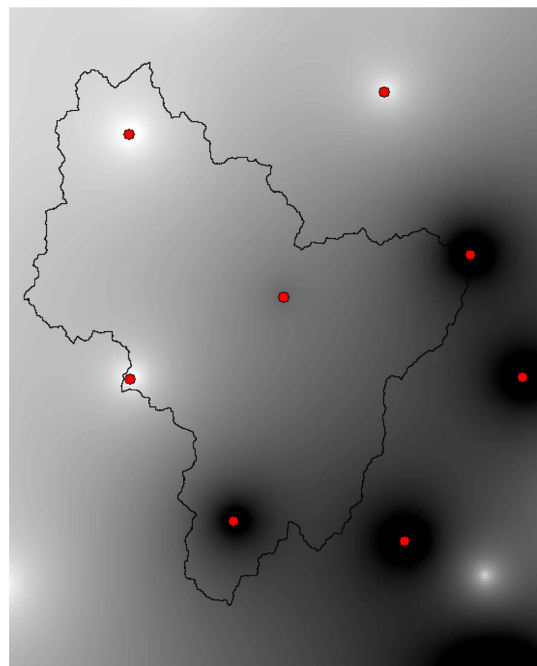


Fig. 1. Rainfall Input Pre-processor for Soil Erosion Model.

료를 활용할 수 있도록 해야 한다. 이에 강우 입력자료 전처리 시스템에서는 사용자가 지정한 강우관측소의 경위도 TM좌표 및 해당관측소의 강우 시계열자료를 입력자료로 하여 대상구역내 모든 격자에 대해 표토침식해석 시스템의 입력자료 형태로 변환할 수 있도록 구성되어 있다. 또한 사용자는 침식해석에 사용되는 기본 격자의 크기에 맞게 강우장(rainfall field)의 격자크기를 자유롭게 설정할 수 있다.

격자형태의 공간분포 강우장을 생성하기 위해 3개의 내삽기법(역거리법, 역거리가중법, 티센기법)을 활용할 수 있도록 하였으며, 향후 기상레이더의 활용을 위해 레이더 강우자료도 입력자료로 변환할 수 있도록 시스템을 구축하였다. 각각의 공간분포 내삽기법에 대한 보다 상세한 사항은 Lee et al. (2012)을 참조할 수 있다. Fig. 1은 역거리법을 이용하여 생성된 용담댐 구역의 공간분포형태의 강우장(모의시간 누적강우량)을 보여주고 있다.

2.2. 지형자료 전처리 시스템

물리적 침식모형의 구동을 위해서는 강우발생 시 흐름(flow) 및 유사이동(sediment transport)의 집수체계를 정의할 수 있는 배수계통도의 구축이 요구되며, 대부분의 강우-유출모형과 마찬가지로 본 모형 역시 격자형태의 수치지형정보를 활용하여 흐름방향도(flow direction), 흐름누적도(flow accumulation), 경사(slope)등의 정보를 획득하여야 한다.

Lee et al.(2013) 및 Kim et al.(2015)의 연구에서 활용된 시스템의 경우, Table 2와 같이 배수계통도 작성 및 지형특성인자 산정을 위해 8개의 부프로그램을 연계 해석해야 되며, 입력자료 및 출력자료가 매우 복잡하게 구성되어 있어 지형자료 가공 시 발생하는 오류를 추적하는데 상당히 제약적이고 활용성이 떨어지는 문제점이 있었다. 반면에 본 연구에서 제시한 지형자료 전처리 시스템의 경우, 입력자료의 단순 포맷변환 등 동일한 기능을 하는 부

프로그램을 통일하고, 개별 부프로그램을 동일 프로젝트 파일에서 순차적으로 구동하게 함으로써 오류추적 작업을 수월하게 하였다. 또한, 사용자에게 의해 작성된 배수계통도를 오픈플롯 프로그램(open plot program)인 GNUplot을 이용하여 자동으로 시각화할 수 있도록 하였다.

Fig. 2는 작성된 대상구역의 배수계통도이다. 사용자는 임계값 조절을 통해 배수밀도(drainage density)를 조절할 수 있다. 즉, 매우 조밀한 밀도가 요구될 경우 임계값을 낮게 하고, 중소하천을 고려하지 않을 경우 임계값을 상향조정하여 임의의 배수계통도를 작성할 수 있다.

2.3. 표토침식 모델링 시스템

본 시스템에서의 표토침식 해석을 위한 물리적 메커니즘은 다음과 같다. 표토의 분리는 강우입자에 의한 타격과 지속적인 침투로 인해 포화된 토양에서 발생하는 지표류(overland flow or surface flow)에 의해 발생하며, 지

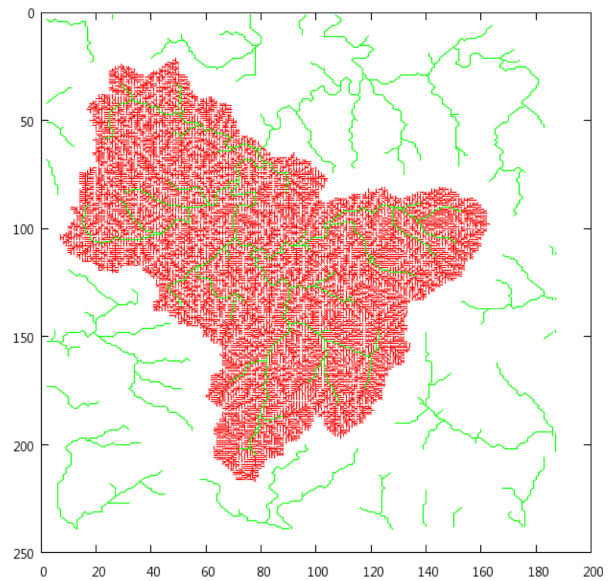


Fig. 2. Geography Input for Soil Erosion Model.

Table 2. Sub-programs of geography input pre-processor

Sub-program	Objectives
1 FLOWDIRECTION.EXE	Convert flow direction file into model input format
2 DRAINAGE.EXE	Generate drainage network using flow direction and flow accumulation information
3 MAKEPLOT.EXE	Make a script file for drainage network visualization
4 MKBSN4.EXE	Specify the drainage network for the study domain using the selected outlet coordinate
5 MKBSN5.EXE	Make a summary file for the drainage network within the study domain
6 MKSLP.EXE	Calculate slope of the cells within the study domain
7 MKLU.EXE	Convert landuse data into model input format
8 MKRAIN-ZONE.EXE	Allocate rainfall information into the cells for modeling

표로부터 분리 또는 침식된 표토는 Fig. 2의 빨간색 실선으로 구분된 사면에서 배수계통도를 따라 녹색으로 표시된 하천망으로 집수되어 사용자가 지정한 최종유출구로 이송되게 된다. 실제로 하천에서의 유사량은 하천 하상 고유의 소류사(bed material)과 유역에서 유입된 부유사량(suspended sediment) 등을 종합적으로 고려해야 하나 본 시스템의 표토침식-유사유출의 기본가정은 하천에서의 유사량은 부유사량이 지배적이며, 부유사량은 유역에서 발생하는 침식에 의해서만 기인한 것으로 가정한다.

이러한 표토침식의 물리적 해석과정은 Lee et al. (2013)에 매우 상세히 기술되어 있으며 이를 요약하면 다음과 같다. 표토침식해석과정은 크게 강우-유출과 침식-유사유출 과정으로 구분할 수 있으며 강우-유출의 경우, 강우발생 시 각 격자에서 강우는 지표하(subsurface)로 직접적으로 더해지고 격자의 토양층이 포화되면서 지표흐름이 생성되며, 지표하 흐름은 비포화 흐름과 포화흐름으로 구분되어 모의된다(Tachikawa et al. 2004). 침식-유사유출의 경우, 토양입자는 빗방울의 충격과 흐름의 침식성이 그 침식성에 저항하는 토양 능력을 초과할 때 분리되며, 그 후 토양입자는 지표류에 의해 이송된다. 토양입자의 퇴적은 입자의 중량이 이송시키려는 힘을 초과할 때 발생하며, 이 조건은 이송능력(transport capacity)을 초과하는 유사량으로 표현된다. 이러한 유출의 생성, 토양 침식과 퇴적은 격자별로 계산되고 흐름방향을 따라 상류격자로부터 하류격자로 추적 모의된다(Aprip, 2008). 본 연구에서 개발된 시스템은 유출수문곡선, 유사량 유출수문곡선이외에도 침식과 퇴적에 대한 2차원 정보를 제공해준다. 모형의 적용성 평가는 3절에서 보다 상세하게 다루기로 한다.

3. 표토침식 모델링 시스템의 적용성 평가

본 연구에서 개발된 표토침식 모델링 시스템의 적용성 평가를 위하여 용담댐 상류지역을 대상으로 하여 (1) 강우-유출 및 표토침식-유사유출에 대한 검증을 수행하였으며, (2) 대상유역의 가능최대강수량(probable maximum precipitation, PMP)을 산정 후 대상유역의 최대유사발생량(probable maximum sediment, PMS) 정보를 생성하였다. 개발된 모형의 검증에 위해 유량 및 유사량 자료 등 수문자료가 비교적 잘 구축된 용담댐 시험유역을 대상으로 하였으며, (1)의 연구목적에 위해 용담댐 상류 천천유역(유역면적: 약 290 km²)을 대상으로 하였으며, (2)의 연구목적의 경우, Fig. 3과 같이 용담댐 전유역(유역면적: 약 980 km²)을 대상으로 하였다.

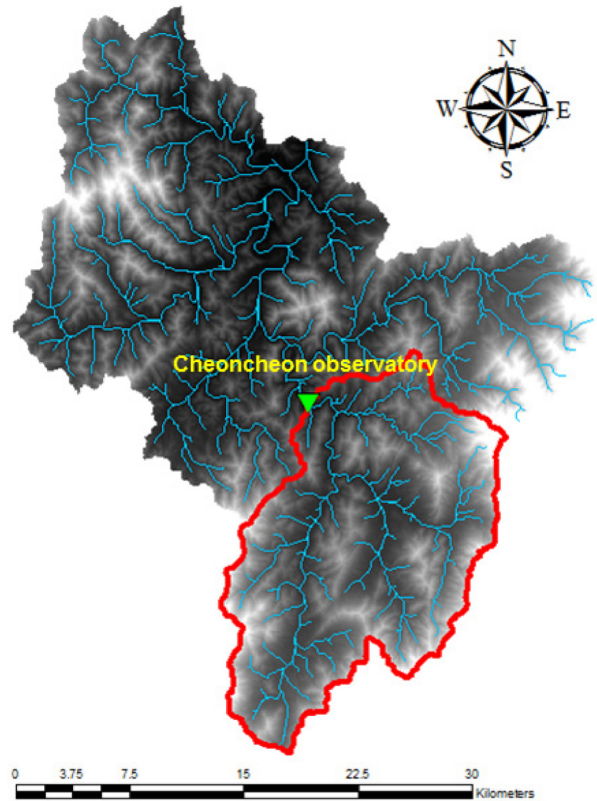


Fig. 3. Study domain: Shaded area: Yongdam-dam basin & red solid line: Cheoncheon sub-catchment.

3.1. 강우-유출 및 침식-유사유출 결과

강우-유출 및 침식-유사유출의 재현성 평가를 위해 2002년 태풍 ‘루사’ 사상(2002.08.30.~09.02.)을 대상으로 강우입력자료를 구축하였으며, 모의결과와의 비교를 위해 수위-유량관계곡선 및 유량-유사량관계곡선식을 활용하였다. 또한 모형의 주요 매개변수는 전역최적화기법인 SCE-UA(Duan et al., 1992; 1994)을 활용하여 보정하였다. Fig. 4는 보정된 매개변수를 이용하여 모의된 (a) 유출수문곡선과 (b) 유사량곡선을 나타내고 있다. 강우-유출의 경우, 모의된 수문곡선은 관측치와 매우 유사하게 모의되었으며, 모형의 평가지수 NSE는 0.98로 매우 우수한 것으로 분석되었다. 첨두유량은 실측치에 비해 조금 과소모의되었으며, 첨두유량비(peak ratio of discharge)는 0.971로 매우 우수하게 나타났다. 반면에 표토침식에 따른 유사유출량 수문곡선의 경우, 관측유사량의 불확실성 등을 고려했을 때 NSE가 0.88로 비교적 재현성이 우수한 것으로 분석되었으나 첨두유량의 경우 모의결과가 실측치에 비해 18% 정도 과소산정된 것으로 나타났다. 다만, 첨두유사유출량의 오차는 유량-유사량 곡선 작성시 고농도와 저농도

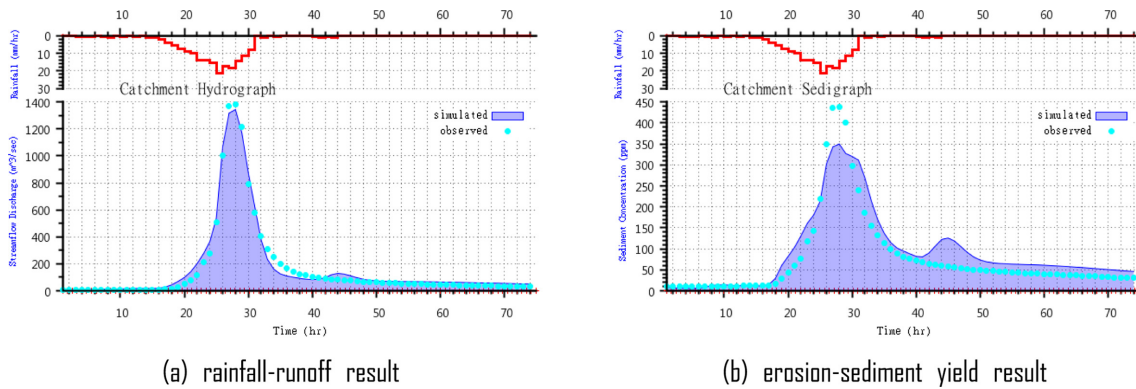


Fig. 4. Rainfall-runoff-sediment yield simulation results (Typhoon Rusa in 2002).

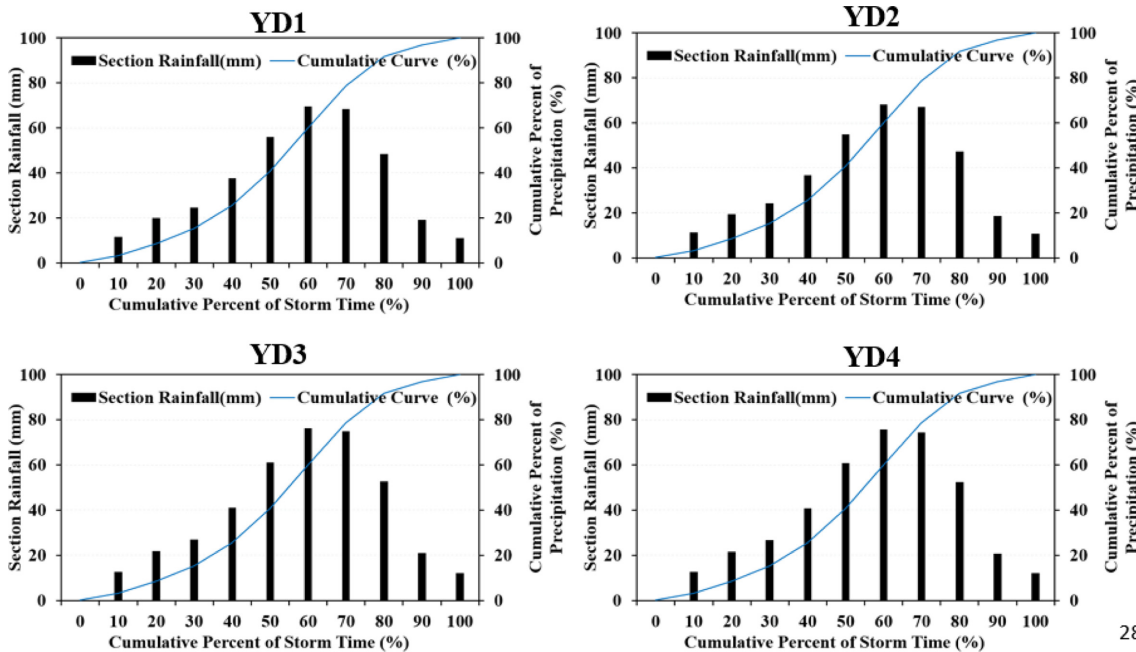


Fig. 5. Temporal variation of PMP for the Yongdam-dam basin.

에 대한 정보없이 회귀분석된 자료로부터 작성된 관계곡선식에 의한 것으로 추정된다. 그러나 Johnson et al. (2000)은 일반적으로 유사유출의 경우 -50%~200% 범위의 오차는 유사량 자료의 불확실성을 고려하였을 때 적합한 결과라고 언급하였으며, 따라서 본 시스템의 모의결과는 타당하다고 할 수 있다.

3.2. 가능최대유사량 산정결과

용담댐 유역에서 발생할 수 있는 가능최대유사량(PMS)를 산정하기 위해서는 대상유역에 대한 가능최대강수량(PMP)을 산정해야하며, Kim (2017)은 Kim et al. (2014)이 제안한 Advanced point-tracking 방법을 이용하여 용

담댐 유역을 4개의 소유역으로 분할하여 PMP-DAD (duration-area-depth) 곡선을 제안하였다. Fig. 5는 4개의 소유역에 대한 PMS를 산정하기 위해 Huff 분포를 이용하여 작성된 24시간 지속시간에 대한 PMP의 시간분포곡선이다.

최종적으로 Fig. 5의 PMP를 개발된 시스템의 강우입력 자료로 하여 용담댐 전역에 대한 PMS를 산정하였으며 그 결과는 Fig. 6과 같다. PMP 발생 후 15시간 후에 침투 유사유출량 696 ppm으로 산정되었으며, PMP 적용시 유역에서 발생하는 침식량은 PMP 발생시간 15시간 이후 격자별 시간별 최대 침식량은 1.93 cm로 분석되었다. Fig. 7은 유사이송능력과 격자의 유입 유사량과의 비교를 통해

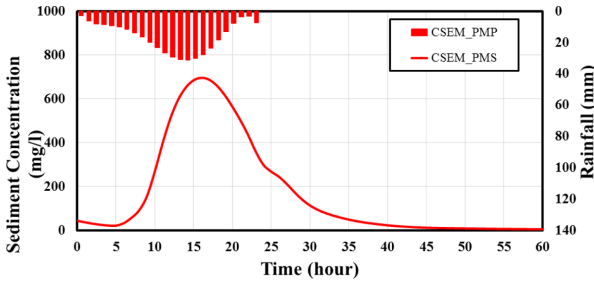


Fig. 6. PMS of 24-Hour PMP for the Yongdam-dam Basin.

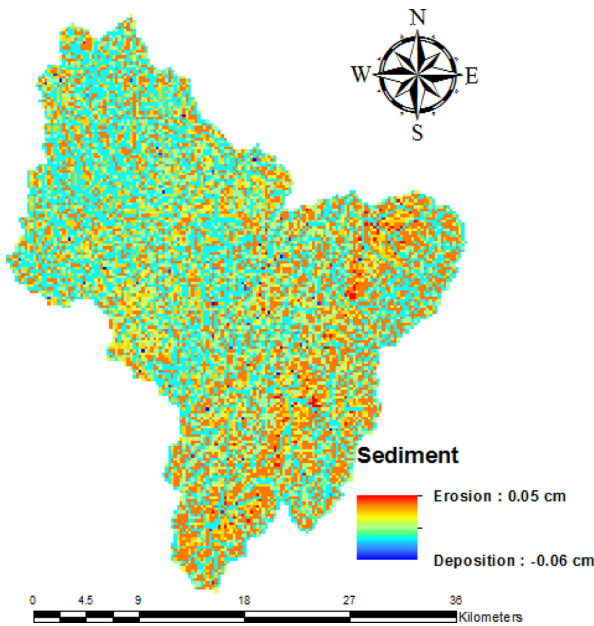


Fig. 7. Spatial Distribution of Erosion and Deposition within the Yongdam-dam basin.

계산된 유역 내 침식 및 퇴적의 공간분포를 나타낸다. PMP에 따른 침식 및 퇴적의 공간분포를 살펴보면 최대 0.05 cm의 침식이 발생하였고, 최대 0.06 cm의 퇴적이 발생하였다. Fig. 7과 같이 유역 내 격자별 침식 및 퇴적의 양상의 시각화를 통해 유역의 토양유실 취약지역을 선별 및 최우심 지역을 결정할 수 있는 기초자료로 제공하고, 극한 호우현상에 대한 유역대응 유사관리방안 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있으리라 판단된다.

4. 요약 및 결론

표토침식을 감지하고 침식량을 산정하기 위한 가장 직접적이고 효율적인 방법은 모니터링 시스템의 구축일 것이다. 하지만, 전 국토를 대상으로 표토침식 측정망을 구축하는 것은 무리가 따르며, 이에 중장기 표토침식량을 산

정하고 향후 다양한 시나리오에 따른 표토침식량의 변동성을 평가하기 위해서는 모형의 개발 및 이용이 요구된다. 현재까지도 USLE 기반의 다양한 방법론에 의해 표토침식량의 정량적 평가가 수행되고 있으나 이러한 경험적 모형은 모형의 구조적 한계에 의해 실제 침식량과의 비교가 어려울 뿐만 아니라 침식이 주로 발생하는 우기 시 강우의 변동성에 따른 침식과 퇴적의 공간적 변동성을 모의할 수 없다. 이에 보다 고도화된 물리적 모형이 필요하며, 본 연구에서는 지표-지표하수를 연계해석할 수 있는 강우-유출 모듈과 유사공급량과 유사이송능력의 비교를 통해 침식과 퇴적을 모의할 수 있는 침식-유사유출 모듈을 결합한 물리적 기반의 표토침식 모의 시스템 개발하였다.

개발된 시스템은 강우입력자료 전처리 부시스템, 지형 입력자료 전처리 부시스템을 통해 입력자료를 가공하게 되고 침식연산 부시스템에서 상기 입력자료를 활용하여 강우-유출, 침식-유사유출 해석을 수행하게 된다. 시스템에서 제공되는 최종성과물은 유출수문곡선, 유사량수문곡선, 침식 및 퇴적의 공간분포도이다. 시스템의 적용성을 평가하기 위해 금강수계 용담댐 유역을 대상으로 강우-유출-유사유출 모의를 수행하였으며, 가능최대강수량을 입력 자료로 하여 용담댐 유역에서 발생할 수 있는 최대가능유사량을 산정하였다.

향후 대상유역의 다양한 수공구조물 (농업용 저수지, 침사지, 보 등)의 운영률을 반영할 수 있는 부시스템을 개발 후 기개발된 시스템과 연계할 경우, 수식에 의한 유역에서의 자연적 유사발생뿐만 아니라 구조물에 의한 인위적 유사포집(sediment trapping) 등에 따른 하천유사량 변동 등을 모의할 수 있는 시스템으로 확장개발이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구에서 개발된 시스템은 다양한 시나리오의 입력이 가능하므로 향후 국가 표토보전종합계획 수립 시 기초자료를 제공할 수 있는 유용한 도구로 활용이 가능할 것으로 기대된다.

사 사

본 연구는 환경부의 토양지하수 오염방지 기술개발사업 (과제번호: GAIA-2014000540005)에서 지원받았습니다.

References

APIP, 2008 Watershed hydrological modeling based on runoff and sediment transport processes: a physically-based distributed model and its lumping, *Master's Thesis*, Kyoto University.

- Bathurst, J.C., 2002, Physically-based erosion and sediment yield modelling: the SHETRAN concept, In W. Summer and D.E. Walling(ed.), *Modelling erosion, sediment transport and sediment yield*, UNESCO, Paris, p.47-68.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K., 1992, Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, *Water Resour. Res.*, **28**(4), 1015-1031.
- Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V.K., 1994, Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models, *J. Hydrol.*, **158**, 265-284.
- Johnson, B.E., Julien, P.Y., Molnar, D.K., and Watson, C.C., 2000, The two dimension-upland erosion model CASC2D-SED, *J. of the AWRA*, **36**(1), 31-42.
- Kim, Y.K., 2017, Watershed-based PMP and PMF Estimation by considering Spatio-temporal Characteristics, *Master's Thesis*, Chungnam National University.
- Kim, Y.S., Song, M.Y., Lee, G.H., and Jung, K.S., 2014, Development and application of automatic rainfall field tracking methods for depth-area-duration analysis, *J. of Korea Water Resour. Assoc.*, **47**(4), 357-370.
- Kim, Y.S., Lee, G.H., An, H.U., and Yang, J., 2015, Uncertainty Assessment of Soil Erosion Model Using Particle Filtering, *J. of Mountain Sci.*, **12**(4), 828-840.
- Lee G.H., Lee, K.H., Jung, K.S., and Jang C.L., 2012, Analysis of the effect of spatial distribution of rainfall on soil erosion and deposition, *JJ. of Korea Water Resour. Assoc.*, **45**(7), 657-674.
- Lee G.H., Yu W.S., Jung K.S., and Apip, 2013, Catchment-scale soil erosion and sediment yield simulation using a spatially-distributed erosion model, *Environ. Earth Sci.*, **70**, 33-47.
- Morris, G.L. and Fan, J., 1997, Reservoir sedimentation handbook, McGraw-Hill, New York.
- Tachikawa, Y., Nagatani, G., and Takara, K., 2004, Development of stage-discharge relationship equation incorporating saturated-unsaturated flow mechanism, *Annual J. of Hydraulic Eng.*, JSCE **48**, 7-12.
- Toy, T.J., Foster, G.R., and Renard, K.G., 2002, Soil Erosion: Processes, Prediction, Measurement and Control, John Wiley & Sons, Inc.