GIS 공간분석 기반의 토석류피해지 토사유출 특성 연구

Characteristics of Sediment Discharge Based on GIS Spatial Analysis of Area Damaged by Debris Flow

서준표* · 우충식** · 이창우*** · 김동엽****

Seo, Junpyo*, Woo, Choongshik**, Lee, Changwoo***, and Kim, Dongyeob****

Abstract

When landslides and debris flows occur, predicting sediment discharge is important for soil erosion control. In this study, aerial photography and GIS spatial analysis were carried out on a landslide and debris flow area. The sediment discharge was most affected by the flow length, flow width, and the amount of slope failure within the source area. In particular, the sediment discharge was highly correlated with the flow length. We have developed an equation that can estimate sediment discharge. The developed equations are grouped and four estimation equations are proposed. The developed sediment discharge equation can predict the amount of soil runoff downstream when a landslide and debris flow occur in a forest watershed. In addition, it can be used to make design decisions concerning the scale and location of erosion control dams, contributing to disaster prevention in downstream areas.

Key words : Spatial Analysis, Erosion Control Dam, Sediment Discharge, Airborne LiDAR

요 지

산사태·토석류가 발생했을 때, 하류로 유출되는 토사량을 예측하는 것은 사방댐 규모·배치 등 사방사업에서 중요하다. 본 연구에서는 산사태·토석류 피해지역에 항공영상 촬영을 실시하고, GIS 공간분석을 수행하였다. 토석류 발생시 하류로 유출되는 토사량에는 계류길이, 계류폭, 발생원의 붕괴량이 영향을 미치는 것으로 나타났다. 하류로 유출되는 누적 토사량은 계류길이와 높은 상관관계로 나타났고, 이를 이용하여 토사유출량을 추정할 수 있는 식을 개발하였다. 개발된 식은 그룹화를 실시하고, 최종적으로 4가지 추정식을 제안하였다. 제안된 토석류 토사유출량 추정식은 토석류 발생시 하류로 유출되는 토사량을 예측하고, 사방댐 설계시 규모·배치 의사결정에 활용함으로써 재해예방 등 산지 하류지역의 방재효과에 기여할 수 있다.

핵심용어 : 공간분석, 사방댐, 토사유출량, 항공라이다

1. 서 론

최근 기후변화로 인한 재해관리는 더욱 중요해 지고 있다 (O'Brien et al., 2006). 우리나라의 대표적인 자연재해는 여름철 집중되는 강우로 인한 풍수해가 대부분이다. 특히,

산에서 발생하는 산사태·토석류와 같은 산지토사재해로 인해 인명과 재산피해가 매년 발생하고 있다.

이러한 산지토사재해로 인한 피해를 예방할 수 있는 효과적인 방법은 사방댐이다(Ryu and Jang, 1998; Piton and Recking, 2017). 사방댐의 재해방지 효과를 극대화하기 위해

*정회원, 국립산림과학원 산림방재연구과 연구원(E-mail: seojunpyo@korea.kr)

Member, Assistant Researcher. Department of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

**교신저자, 정회원, 국립산림과학원 산림방재연구과 연구사(Tel: +82-2-961-2684, Fax: +82-2-961-2699, E-mail: woocs@korea.kr)

Corresponding Author, Member, Researcher. Department of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

***국립산림과학원 산림방재연구과 연구관

Senior Researcher. Department of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

****국립산림과학원 산림방재연구과 연구사

Researcher. Department of Forest Disaster Management, National Institute of Forest Science

서는 설계단계에서 해당 구역의 토사유출량을 예측하여 사방댐 규모·배치를 결정할 필요가 있다.

국내 산림유역에서 토사유출량 예측에 관한 연구는 범용 토양유실예측공식(USLE, Universal Soil Loss Equation, Wischmeier and Smith, 1978), 수정범용토양유실예측공식(RUSLE, Revised Universal Soil Loss Equation, Renard et al., 1991)을 이용한 연구가 대부분이다(Lee, 1994; Son, 2001; Youn et al., 2007). 일부에서는 MUSLE, WEPP 등을 이용하여 토사유출량에 관한 연구를 수행하기도 하였다(Kim et al., 2007; Jung et al., 2014). 그러나 이러한 연구들은 단순히 해당 지점·지역의 강우로 인한 평시 토사유출량을 계산하기 위한 경험적 산정기법 또는 물리적 모델로써 산사태·토석류 피해 규모를 고려한 것은 아니다.

산사태·토석류 특성이 반영된 연구는 무한사면안정해석을 통하여 산사태 위험도를 예측하는 SINMAP 모형을 이용하거나, 그리드 기반의 토석류 피해범위를 예측하는 FLO-2D 모형을 이용한 연구가 있다(Oh et al., 2006; Kim, 2012). 또한, KANAKO 2D를 이용하여 사방댐의 토석류 저감효과를 평가한 연구가 수행되기도 하였으며(Sumaryono et al., 2009; Lim, 2017), RWM(Random Walk Model)과 같은 응답모형을 이용하여 광역단위의 토석류 피해 위험도를 제작하기도 하였다(Lee et al., 2011).

현재까지 이러한 연구들은 산사태 위험성 예측 또는 토석류 발생을 고려하여 사방댐 유·무에 따른 피해범위를 예측하는 것이 대부분이다. 그러나 어디에서 토석류가 발생할지 알 수 없는 불확실성이 있기 때문에 분석범위에 대한 한계가 있고, 특히 대상지역의 정확한 물리적 성질 값과 적용식에 따라서 결과에 중요한 영향을 미친다는 단점이 있다(Marchi and D'Agostino, 2004).

실제 토석류가 발생한 피해지의 GIS 공간분석을 통하여 재해발생시 유출되는 토사특성을 파악하고, 이를 통하여 토석류 규모 즉, 토석류로 인하여 하류에 피해를 받을 수 있는 토사유출량을 산정할 필요가 있다.

GIS 공간분석에는 지상 LiDAR, 항공영상(사진·LiDAR) 자료를 많이 이용하고 있다. 특히, 항공영상은 토석류 발생지에 대한 현장조사를 직접 하지 않고, 촬영당시의 피해지 상황을 공간 DB화 할 수 있는 장점이 있다(Woo et al., 2014).

항공영상을 이용한 전국단위의 산지토사재해 관련 연구로는 Woo et al. (2014)이 수행한 산사태 발생지(1,912개소)에 확률기반 로지스틱 회귀모형을 통하여 산사태 위험도를 개발한 연구가 대표적이라 할 수 있다. 이 연구에서 산사태 발생에 영향을 주는 13개 인자는 그 지점(10 m×10 m)의 붕괴 위험성에 대한 결과이다. 반면, 토석류가 발생했을 때, 하류로 유출되는 토사량에 영향을 주는 인자 또는 토사유출 특성에 대한 연구는 수행되지 않았다.

산림유역에서 토석류가 발생했을 때, 하류로 유출되는 토사량을 산정할 수 있다면, 사방댐 규모·배치 결정 등

사방사업에 효과적으로 활용될 수 있다.

본 연구는 GIS 공간분석을 통하여 토석류 토사유출에 영향을 주는 인자 특성과 토사유출량을 추정할 수 있는 방법을 개발하고자 수행되었다.

2. 재료 및 방법

2.1 공간분석 DB

본 연구는 인제(2006년), 봉화(2008년), 제천(2009년) 각각 1개 지역, 서울 우면산 3개 지역(2011년), 여주·이천 각각 5개 지역(2013년)에서 발생한 산사태·토석류 피해지역에 항공영상 촬영을 통하여 공간정보 DB를 구축하였다(Fig. 1). 각 지역의 항공영상 촬영 일시, 면적, 점밀도 등에 대한 정보는 Table 1과 같다. 피해 이전의 항공영상 DB가 없는 인제·봉화·제천 지역은 지형복원 기법을 이용하여 분석에 활용하였다.

각각의 공간정보 DB 구축은 다음과 같은 방법으로 수행하였다.

Fig. 1. Aerial Photographs Area

2.1.1 항공 LiDAR

항공 LiDAR는 지표면 고도를 측정하는 것으로 레이저가 반사되어 오는 시간과 속도를 이용하여 거리가 결정되고, X, Y, Z의 3차원 포인트를 획득할 수 있다(Lovell et al., 2005; Woo, 2011).

본 연구는 Table 1에서처럼 산지토사재해 피해지역에 대한 항공 LiDAR 촬영을 실시하였고, 촬영된 지역 중에서 발생원의 붕괴량, 총 토사유출량 등 공간정보를 명확하게 분석할 수 있는 피해지 16개소를 선별하여 분석에 활용하였다.

2.1.2 지형복원기법

지형복원기법은 토석류 발생이후 항공 LiDAR 자료를 통하여 발생이전의 정밀지형자료를 제작하는 기법으로 토석류 발생이전의 항공 LiDAR 자료가 없는 경우에만 지형복원을 수행하였다.

Table 1. Specifics of Aerial Photographs

Location	Area (km ²)	Date	Point density (points/m ²)	LiDAR system
Inje	40	2007. 11. 19.	4	Optech ALTM3070
Bonghwa	40	2008. 12. 06.	7	Leica ALS50
Jecheon	900	2009. 09. ~ 11.	4	Leica ALS50
Seoul	16	2011. 08. 05.	4	Leica ALS50
Yeoju · Icheon	40	2013. 09. 06.	4	Leica ALS50

본 연구에서 지형복원은 Woo (2011)와 Woo et al. (2012)이 수행한 방법과 동일한 방법을 적용하여 수행하였다(Fig. 2).

Fig. 2. Flow Chart of the Topography Restoration Method (Woo et al., 2012)

항공 LiDAR 자료에서 지면점 분류를 통하여 DEM을 제작하고, 산지토사재해 발생지역을 탐지하였다. 이후 일정한 간격으로 횡단면을 추출하고, 중심점 추정 후 가우시안 혼합모델을 통하여 산지토사재해 발생이전 지형을 추정하였다(Woo et al., 2012).

2.2 토사유출 경계탐지 및 지형복원

토석류가 발생하면 붕괴 · 침식 · 유하 · 퇴적으로 인해 지형변화(凹, 凸 형태)가 생기게 된다. 이는 경사도가 주위에 비해서 급격하게 달라졌다는 것을 의미한다(Woo et al., 2012). Zevenbergen and Thorne (1987)에 의하면 DEM을 2차 미분하게 되면 지형의 오목 또는 볼록한 정도를 구할 수 있는 곡률과 유사하게 되는데, 즉 경사를 미분하게 되면 경사도가 증가 또는 감소하는 위치를 탐지할 수 있다. 탐지결과를 바탕으로 ArcGIS 10.2를 이용하여 육안판독에 의한 디지털타이핑을 수행하였다.

계곡의 지형특성을 알기 위해서는 수계를 중심으로 좌 · 우측이 동일한 고도의 횡단면에 있어야 한다(Woo et al., 2012). 본 연구의 지형복원에는 1 m 격자의 DEM에서 수계의 수직방향으로 횡단면을 추출하였고, 수계망 추출은 GIS 프로그램의 수문분석을 이용하였다.

2.3 토석류 피해지 토사유출량 계산

토석류 토사유출량은 항공 LiDAR 및 지형복원기법을 통하여 최종 구축된 각각의 DEM을 이용하였으며, Eq. (1)을 이용하여 산정하였다.

$$\Delta z_{ij} = z_{ij}(1) - z_{ij}(2) \quad (1)$$

여기서, Δz_{ij} : 개별 격자의 변위량, $z_{ij}(1)$: 변위후 개별 격자의 높이, $z_{ij}(2)$: 변위전 개별 격자의 높이, i : 라인 수, j : 행 수를 의미한다.

즉, ArcGIS 10.2를 이용하여 돌발성 산지토사재해 발생 전, 후 지형에 대한 DEM 고도 차이를 토석류 피해로 인한 하류로 유출된 토사량으로 계산하였다. (-)는 침식, (+)는 퇴적 지점으로 토석류 발생후 지형이기 때문에 토석류가 유하하면서 침식과 퇴적이 반복되는 것은 알 수 없는 단점은 있지만, 피해이후의 침식량, 퇴적량 분석에는 활용할 수 있는 것으로 판단하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토석류 피해지 토사유출 공간 분석

인제, 봉화, 제천 지역은 Woo et al. (2012)이 지형복원기법을 이용하여 토석류 발생시 토사변화에 대한 공간분석을 수행한 결과를 활용하였다(Fig. 3). 서울, 여주 · 이천 지역은 2011년과 2013년 각각 항공영상 촬영을 실시하고, 토석류 피해 전 · 후 자료를 비교하여 공간분석을 수행하였다(Fig. 4).

공간분석은 토사유출량 추정의 현장 활용도를 높이기 위해서 간단하게 수치지형도를 이용할 수 있는 인자를 분석하였다. 토석류에 대해서 총 토사유출량, 발생원의 붕괴량, 계류 총길이(분류+지류), 계류 분류 길이로 구분하여 공간분석을 수행하였다. 본 연구에서 계류 분류는 토사가 유출되어 퇴적 되는 하천차수를 분류로, 분류로 유입되는 계류, 즉 하천차수가 낮은 계류를 지류로 정의하였다.

인제 지역은 총 토사유출량 약 10,000 m³, 발생원의 붕괴량 약 200 m³, 계류 총길이 791 m, 계류 분류 길이 791 m로 나타났고, 봉화 지역은 총 토사유출량 약 2,600 m³, 발생원의 붕괴량 약 490 m³, 계류 총길이 542 m, 계류 분류 길이

Fig. 3. Spatial Analysis by using the Topography Restoration

Fig. 4. Spatial Analysis by using the Airborne LiDAR

265 m, 제천 지역 총 토사유출량 약 8,000 m³, 발생원의 붕괴량 약 700 m³, 계류 총길이 837 m, 계류 본류 길이 471 m로 분석되었다(Table 2).

또한, 서울 우면산 지역(래미안, 신동아, 보덕사)은 총 토사유출량 71,240 m³, 발생원의 붕괴량 5,434 m³, 계류 총길이 3,039 m, 계류 본류 길이 1,882 m, 여주 5개 지역은 총 토사유출량 31,721 m³, 발생원의 붕괴량 1,828 m³, 계류 총길이 2,643 m, 계류 본류 길이 1,985 m, 이천 5개 지역은 총 토사유출량

15,079 m³, 발생원의 붕괴량 1,462 m³, 계류 총길이 2,975 m, 계류 본류 길이 1,675 m로 분석되었다(Table 2).

토석류 피해지에서 항공영상을 이용한 공간분석 결과, 침식·퇴적 지점을 시각적으로 쉽게 확인할 수 있었고, 공간별 토사량 변화도 알 수 있는 장점이 있었다. 이러한 공간분석 결과는 토석류 피해지역의 피해면적 구획, 복구면적 선정, 복구비용 산출 등에 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 2. Results of GIS Spatial Analysis in Debris Flow Damaged Area

Area	Occurrence year	Total sediment discharge amount (m ³)	The amount of slope failure on source area (m ³)	Total flow length (m) (main stream + tributary)	Flow length (m) (main stream)
Inje	2006	10,000	200	791	791
Bonghwa	2008	2,600	490	542	265
Jecheon	2010	8,000	700	837	471
Seoul Mt. Umyeon (I)	2011	29,382	3,282	971	592
Seoul Mt. Umyeon (II)		20,554	855	1,090	680
Seoul Mt. Umyeon (III)		21,304	1,297	978	610
Yeoju (I)	2013	940	225	607	575
Yeoju (II)		11,803	506	462	295
Yeoju (III)		16,548	980	934	475
Yeoju (IV)		2,171	99	285	285
Yeoju (V)		259	18	355	355
Icheon (I)	2013	1,593	72	215	215
Icheon (II)		2,234	108	265	265
Icheon (III)		917	245	235	235
Icheon (IV)		1,595	383	853	415
Icheon (V)		8,740	654	1,407	545

3.2 토석류 피해지 토사유출 특성

항공영상 자료를 이용하여 산사태 붕괴에 영향하는 인자에 관한 연구는 Woo et al. (2014)이 수행한 산사태 위험지도 개발에 활용되었다.

본 연구는 붕괴발생에 영향을 주는 인자보다는 토석류가 발생했을 때, 유출되는 토사량에 영향을 주는 인자를 이용하여 토사량을 추정하는 방법에 대한 연구이다.

붕괴 발생원에서부터 하류까지 유출하면서 토사량에 영향을 미칠 수 있는 인자로는 발생원의 붕괴량, 계류 총길이,

계류 분류 길이를 토석류 토사유출에 영향을 미치는 인자로 선정하였다(Table 2).

발생원의 붕괴량, 계류 총길이, 계류 분류 길이가 토석류 토사유출에 미치는 영향을 보기위해 단순회귀분석을 통하여 선형식을 유도하였다(Fig. 5).

영향 인자들을 선형식 1, 2차식으로 유도한 결과, 계류 총길이(분류+지류)와 계류 분류 길이는 $R^2 = 0.4728, 0.3749$ 로 각각 나타났다.

반면, 발생원의 붕괴량은 $R^2 = 0.8376$ 로 토석류 발생시

(a) The amount of slope failure on source area - Total sediment discharge

(b) Total flow length - Total sediment discharge

(c) Flow length - Total sediment discharge

Fig. 5. Factors Affected Total Sediment Discharge

토사유출 특성에 가장 영향을 주는 것으로 나타났다. 이는 Huang et al. (2007)의 연구에서처럼 토석류는 유하하면서 크고 무거운 입자들이 앞으로 모이기 때문에 선단부의 에너지가 가장 높은 것으로 알려져 있다. 따라서 발생원에서 초기 붕괴된 토사가 하류로 유하하면서 계상과 양안의 침식을 유발하기 때문에 토사유출에 가장 영향한 것으로 판단된다.

3.3 계류길이에 따른 토석류 유출특성 및 분류

사방댐을 설계할 때 설계자가 규모·배치 의사결정에 쉽게 활용할 수 있도록 토사유출량을 계산할 수 있어야 한다.

사방댐 규모·배치를 결정하기 위해서 Fig. 6과 같이 계류 길이에 따른 누적된 토사유출량을 알 수 있어야 한다. 그 이유는 사방댐을 무조건 최하류에 시공하는 것은 아니고, Figs. 6 (A) 또는 (B)에 시공한다고 했을 때, 누적되는 토사량이 다르기 때문에 사방댐 규모도 달라져야 한다. 또한, (A), (B) 모두 시공하는 계통적 사방댐을 시공한다고 했을 때에도 규모는 각각 달라야 한다.

Fig. 6. Schematics of Accumulative Sediment Discharge in Erosion Control Works

Fig. 7(a)은 붕괴 발생원에서부터 하류까지 5m 간격으로 누적 토사량을 나타낸 것이다. 하류로 내려갈수록 누적되는 토사량은 많아졌고, 계류길이와 높은 상관관계로 나타났다 ($R^2 = 0.9$ 이상).

그러나 모암, 경사, 입상 등이 동일한 조건에서 계류 길이가 같다고 해서 누적되는 토사량이 같지는 않았다(Fig. 7(a)). 이는 계류 형태가 본류 또는 지류의 차이일 수 있지만, Fig. 7(b)에 나타낸바와 같이 계류폭에 따라서 누적 토사량이 다른 것으로 판단하였다.

계류폭에 대한 영향은 Jang (2014)이 국내 토석류 발생 48개소를 대상으로 토석류 규모와 관련인자에 관한 연구에서 유역면적, 토석류 길이, 토석류 길이의 평균 폭이 토석류 규모에 영향을 미친다는 결과와 유사하게 나타났다.

(a) accumulative sediment discharge and flow length

(b) schematics of flow length and width

Fig. 7. Relation Between Accumulative Sediment Discharge and Flow Length (ex. Mt. Umyeon)

연구대상지의 계류길이에 따른 누적 토사량을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8 점선처럼 계류길이가 같아도 누적 토사량은 대상지에 따라서 다르지만, 계류길이는 누적 토사량과 높은 상관성($R^2 = 0.83$ 이상)을 갖는다고 판단하였다.

Fig. 8. Grouping of Accumulative Sediment Discharge

임의의 특정 지점에 토석류가 발생했다고 가정했을 때, 계류길이를 이용하여 누적되는 토사유출량 추정 방법을 4가지로 그룹화 하였다.

$$(I) V = -0.8306x - 12.672 \quad (R^2 = 0.8373)$$

$$(II) V = -3.5655x - 3.5395 \quad (R^2 = 0.9648)$$

$$(III) V = -7.8506x + 226.08 \quad (R^2 = 0.9572)$$

$$(IV) V = -8.0066x - 166.27 \quad (R^2 = 0.9421)$$

여기서, V = 토석류 발생시 토사유출량, x = 계류길이(m)이다.

제시된 4가지 유형의 추정식을 통하여 토석류 발생시 유출되는 토사량을 추정할 수 있고, 이를 통하여 사방댐 규모·배치 의사결정에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

토석류 피해를 대상으로 항공영상 촬영을 실시하고, GIS 공간분석을 통하여 토석류 발생시 토사유출 특성과 유출량을 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

GIS 공간분석 결과, 계류길이, 계류폭, 발생원의 초기붕괴량이 토석류로 인하여 하류로 유출되는 토사량에 가장 영향을 주는 인자로 분석되었다. 계류길이를 이용하여 토석류 발생시 토사유출량을 추정할 수 있는 4가지 유형을 제시하였다. 4가지 유형에 따른 계류폭과 초기붕괴량을 반영할 수 있는 방법은 추후 연구에서 이루어져야한다.

그러나 본 연구는 국내의 실제 토석류 피해지에 대한 공간 DB를 통하여 토석류 유출에 영향을 미치는 인자와 유출량을 추정할 수 있는 방법을 제시하였다는 것에 의의가 있다.

또한, 토석류는 발생할 장소에 대한 불확실성이 있고, 사방사업이 매년 시행되고 있는 상황에서 본 연구에서 제안된 토석류 토사유출 추정법은 현장 활용도 및 연구적 가치가 있는 것으로 생각된다.

향후, 토석류 토사유출량 산정 모델 개발 등 사방댐 적정 규모·배치 의사결정 지원 시스템이 개발된다면 사방사업 등 방재적 측면에서 효율적으로 활용될 수 있을 것이다.

References

- Huang, C.J., Yin, H.Y., Chen, C.Y., Yeh, C.H., and Wang, C.L. (2007). Ground vibrations produced by rock motions and debris flows. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, No. F2, doi:10.1029/2005JF000437
- Jang, C.B. (2014). *A study on behavior characteristics and scale of debris flow in Korea*. Master's thesis, Kangwon National University.
- Jung, Y.G., Lee, S.W., Lee, K.H., Park, K.Y., and Lee, H.H. (2014). Application of RUSLE and MUSLE for prediction of soil loss in small mountainous basin. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 103, No. 1, pp. 98-104.
- Kim, M.S., Kim, J.K., and Yang, D.Y. (2007). Application and comparison of GeoWEPP model and USLE model to natural small catchment: A case study in Danwoldong, Icheon-si. *Economic and Environmental Geology*, Vol. 40, No. 1, pp. 103-113.
- Kim, P.K. (2012). *Numerical modeling for the detection and movement of debris flow using detailed soil maps and GIS*. Ph.D. dissertation, Kyungpook National University.
- Lee, C.W., Woo, C.S., and Youn, H.J. (2011). Analysis of debris flow hazard zone by the optimal parameters extraction of random walk model: Case on debris flow area of Bonghwa county in Gyeongbuk province. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 100, No. 4, pp. 664-671.
- Lee, K.S. (1994). Application of GIS to the universal soil loss equation for quantifying rainfall erosion in forest watersheds. *Journal of Korean Forest Society*, Vol. 83, No. 3, pp. 322-330.
- Lim, Y.H. (2017). *A study on the application of numerical simulation to erosion control facility using KANAKO 2D*. Ph.D. dissertation, Kangwon National University.
- Lovell, J.L., Jupp, D.L.B., Newnham, G.J., Coops, N.C., and Culvenor, D.S. (2005). Simulation study for finding optimal lidar acquisition parameters for forest height retrieval. *Forest Ecology and Management*, Vol. 214, pp. 398-412.
- Marchi, L., and D'Agostino, V. (2004). Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 29, No. 2, pp. 207-220.
- O'Brien, G., O'Keefe, P., Rose, J., and Wisner, B. (2006). Climate change and disaster management. *Disasters*, Vol. 30, No. 1, pp. 64-80.
- Oh, K.D., Hong, I.P., Jun, B.H., Ahn, W.S., and Lee, M.Y. (2006). Evaluation of GIS-based landslide hazard mapping. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 1, pp. 23-33.
- Piton, G., and Recking, A. (2017). Effects of check dams on bed-load transport and steep-slope stream morphodynamics. *Geomorphology*, Vol. 291, pp. 94-105.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., and Porter, J.P. (1991). RUSLE: Revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 46, No. 1, pp. 30-33.
- Ryu, T.K., and Jang, K.K. (1998). Effect of soil erosion control dam in the hillside area. *Journal of Life Science and Natural Resources Research*, Vol. 20, pp. 42-47.
- Son, K.I. (2001). Applicability examination of the RUSLE

- sediment yield prediction equations in Korea. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 3, pp. 199-207.
- Sumaryono, Nakatani, K., Satofuka, Y., and Mizuyama, T. (2009). One-dimensional numerical simulation for sabo dam planning using Kanako (Ver. 1.40): A case study at Cipanas, Guntur Volcanoes, West Java, Indonesia. *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 22-32.
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. USDA Agriculture Handbook, No. 537, U.S. Department Agriculture, Washington D.C.
- Woo, C.S. (2011). *Development of the restoration method of topography for debris flow area using airborne lidar data*. Ph.D. dissertation, Inha University.
- Woo, C.S., Kwon, H.J., Lee, C.W., and Kim, K.H. (2014). Landslide hazard prediction map based on logistic regression model for applying in the whole country of South Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 6, pp. 117-123.
- Woo, C.S., Youn, H.J., Lee, C.W., and Lee, K.S. (2012). Estimation of spatial soil distribution changed by debris flow using airborne lidar data and the topography restoration method. *Journal of the Korean Forest Society*, Vol. 101, No. 1, pp. 20-27.
- Youn, H.J., Lee, C.W., and Jeong, Y.H. (2007). Study on quantifying erosion control function of forest. *Journal of the Korea Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology*, Vol. 10, No. 1, pp. 36-43.
- Zevenbergen, L.W., and Thorne, C.R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 12, No. 1, pp. 47-56.

Received	■ April 10, 2018
Revised	■ April 16, 2018
Accepted	■ June 28, 2018