

토석류 피해지역 토사유출량 산정 방법의 적정성 분석

김기중¹ · 전계원^{2*} · 강배동³

¹강원대학교 방재전문대학원 석사, ²강원대학교 방재전문대학원 교수, ³강원대학교 방재전문대학원 박사과정

Analysis of Appropriateness of Estimation Methods for Sediment Yields in Damaged Areas by Debris Flow

Gi Jung Kim¹, Kye Won Jun^{2*}, and Bae Dong Kang³

¹Master, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

²Professor, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

³Ph.D Course, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

요약

본 연구에서는 토석류 피해 발생지역에 대해 토사유출량 산정에 많이 사용되고 있는 RUSLE와 NILIM 그리고 Marchi의 경험식을 통해 토사유출량을 산정하였으며, 토사유출량 산정 방법의 국내 적용성을 검토하기 위해 정밀측량 및 현장조사를 통해 측정된 토사유출량을 비교하였다. RUSLE 방법은 실측 토사유출량에 비해 평균 2.13배 과다 산정되었으며, Marchi의 경험식은 평균 2.83배, NILIM 경험식의 경우 평균 1.26배로 세 가지 경험식 중 가장 낮은 오차가 발생하였다.

핵심용어: 토석류, 토사유출량, RUSLE, NILIM, Marchi, 경험식

ABSTRACT

In this study, the amount of debris flow was calculated through the empirical equations of RUSLE, NILIM, and Marchi, which are widely used to calculate areas affected by debris flow, and debris flow measured through precise measurements and field surveys was compared. The RUSLE method over estimated by 2.13 times in the average sense compared with the measured sediment quantify and Marchi's empirical equation over estimated by 2.83 times while NILIM's empirical equation 1.26 times, which is the lowest error among the three empirical equation.

Keywords: Debris flow, Sediment yield, RUSLE, NILIM, Marchi, Empirical equation

1. 서론

우리나라는 연평균 강수량의 약 60%가 6~8월인 여름철에 집중되어 있으며, 이상기후로 인한 태풍 및 국지성 집중호우의 영향으로 산지의 비중이 높은 지형 특성상 토석류 재해가 발생할 가능성이 높다. 토석류는 산지 및 급경사지에서 강수로 포화된 표층의 붕괴와 계곡에 퇴적된 흙, 유목 등이 계곡을 따라 짧은 시간에 하류지역으로 유하하여 주택, 도로, 하천 등 광범

*Corresponding author: Kye Won Jun, kwjun@kangwon.ac.kr

Received: 20 March 2022, Revised: 22 March 2022, Accepted: 25 March 2022



위한 피해를 발생시킨다. 이러한 토석류의 피해사례는 태풍에 의해 동반되는 호우와 집중호우에 의해 주로 발생하고 있다. 특히 2011년 7월 도심지에 발생한 국지성 집중호우로 서울시 우면산, 춘천시 마적산에서 많은 인명 및 재산피해가 발생하였고 최근엔 2019년 태풍 미탁으로 인해 강원도 삼척시 갈남리, 부산 사하구에 주택침수 및 사망사고가 발생하였다. 이 밖에도 크고 작은 토석류의 피해가 지속적으로 발생하고 있는데, 이러한 피해는 도시개발로 인해 도심지의 경계가 산지와 급접하게 되면서 생활권이 산지재해위험구역과 중첩되어 그 피해가 더욱 가중되고 있다.

생활권 지역에 발생하는 토석류의 피해를 저감하기 위해 정부 및 지자체에서는 구조적인 대책을 확대하고 있으며, 재해저감시설인 사방댐을 설치하고 있다. 사방댐은 계곡 상에서 돌·자갈·모래·흙 및 유송잡물의 이동을 억제하기 위하여 계곡을 횡단하여 설치하는 댐으로, 계상기울기의 완화, 종·횡단 침식의 방지, 산각조정 및 산복붕괴의 방지, 하류보호 등의 방재적 목적을 가진다(Woo, 1997). 1986년 31기 설치를 시작으로 2000년대 초 태풍 루사, 매미 등의 피해로 인해 시공이 점차 증가하고 있으며, 2019년 기준 전국적으로 12,292기의 사방댐이 시공되어 있다.

재해저감시설을 설치하기 위해서는 하류지역의 피해범위를 예측하기 위해 발생가능 홍수량, 피해 예상 면적 등을 정확히 예측하여 저감효과의 정량적인 평가를 실시하며, 이를 기초로 재해저감시설의 용량, 형식, 배치 등의 시공계획을 세워야 한다. 하지만 국내의 실정은 자료 및 연구의 부족으로 인해 경험적이고 주관적인 재해저감 대책이 적용되고 있다. 정량적인 평가를 실시하기 위해 재해저감시설 설치 시 토석류의 규모를 산정하는데 있어 토사유출량은 중요한 인자이다. 재해영향평가 실무지침(MOIS, 2019)에 채택된 토사유출량의 산정방법은 원단위법과 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation) 방법을 채택하여 사용하고 있다. 일본에서 제시된 원단위법은 유역의 특성이 고려되지 않고, 경험자료를 이용하여 제시된 원단위에 유역면적을 곱하여 산정되는 단순 평균값이기 때문에 신뢰성이 부족하다. 또한 RUSLE 방법은 유역 전체의 연평균 또는 단일 호우에 의한 표면 유실량을 계산하는 것으로서, 집중호우로 인한 사면붕괴로 발생하는 토석류의 토사유출량과는 적정성의 문제가 있을 것으로 예상된다. 따라서, 국내 산지유역의 특성을 반영하여 사용할 수 있는 정확한 토사유출량의 경험식이 필요할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구의 목적은 재해저감시설의 능력을 평가하는데 있어 중요한 인자인 토사유출량을 산정하기 위해 국내·외에서 사용되는 경험식을 비교분석하여 국내 유역 특성에 적합한 경험식을 선정함을 목표로 한다.

2. 연구대상지역

본 연구의 대상지역은 실측된 토사유출량과 경험식의 차이를 확인하기 위해 집중호우와 태풍의 영향으로 토석류가 발생한 3개 지역을 선정하였다. 2006년 7월 태풍 에위니아의 영향을 받은 강원도 인제군 북면과 2009년 7월 집중호우의 영향을 받은 충청북도 제천시 봉양읍, 2019년 10월 태풍 미탁의 영향을 받은 강원도 삼척시 원덕읍을 연구대상지로 선정하였다. 토석류 피해 발생 당시 누적 강우량과 최대 시우량은 강원도 인제군 북면 395 mm와 66 mm, 충청북도 제천시 봉양읍은 203 mm, 64 mm, 강원도 삼척시 원덕읍 487 mm, 110 mm로 집중호우와 태풍을 동반한 강우로 인하여 토석류가 발생하였다. 각 연구대상지역의 현황 및 특성은 Fig. 1과 Table 1과 같으며 Table 1의 I 는 1시간 강우강도를 I_{30} 은 30분 강우강도이다.

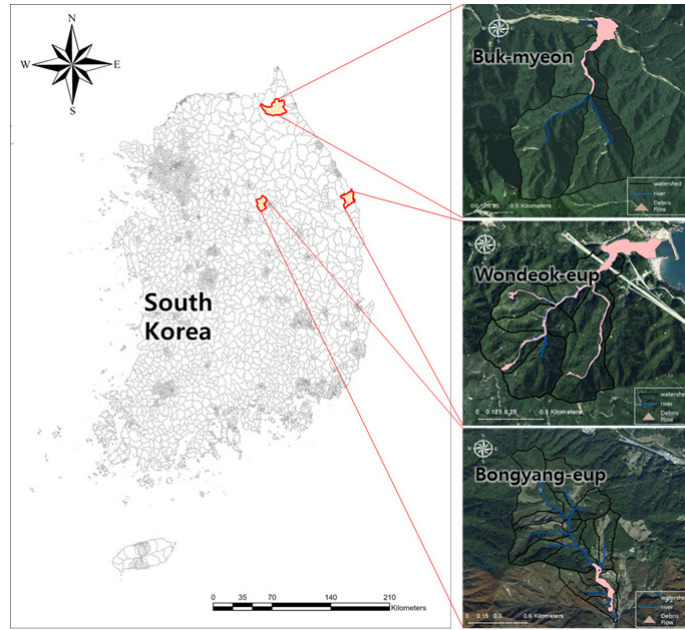


Fig. 1. Study areas

Table 1. Characteristics of study areas

Study areas	Area (km^2)	Slope ($^\circ$)	Elevation (m)			Rainfall observation station	I (mm/hr)	I_{30} (mm/min)
			min	max	avg			
Buk-myeon	2.00	16.1	504	946	658	Wontong	66.0	27.0
						Osek	77.5	34
Bongyang-eup	1.22	12.0	275	680	464	Baegun	64.0	31.5
						Jecheon	62.0	23
Wondeok-eup	0.84	17.0	12	317	163	Gungchon	110.5	43.5
						Wondeok	64.5	39.5

3. 토사유출량 산정 방법

3.1 RUSLE 토사유출량 산정 방법

토사유출량을 예측하는 대표적인 경험적 모형은 Wischmeier and Smith(1960)가 개발한 연평균 토사유출량을 산정하는 USLE(Universal Soil Loss Equation), Williams(1978)가 개발한 단일 호우시의 유출량과 침투유출량을 고려하는 MUSLE (Modified Universal Soil Loss Equation) 그리고 Renard et al.(1997)에 의해 제시된 RUSLE(Revised Universal Soil Loss Equation, 수정범용토양손실공식)은 본래 나대지에서 유출되는 토사량을 예측하기 위해 개발된 공식이지만 국내 사방댐 설계에서 사방댐의 용량을 결정하기 위해 사용되고 있다(Choi, 2019). 또한, 재해영향평가 실무지침(MOIS, 2019)에서도 토사 유출량을 계산하기 위한 방법으로 원단위법과 RUSLE를 권고하고 있다. 본 연구에서 토사유출량을 산정하기 위한 방법인 RUSLE는 Eq. (1)과 같다.

$$A = R \times K \times LS \times C \times VM \tag{1}$$

여기서 A 는 강우침식인자(R)의 해당 기간 중 단위면적당 토양침식량(ton/ha), R 은 강우침식인자($10^7/ha \cdot mm/hr$), K 는 토양침식인자($ton/ha/R$), LS 는 지형인자(무차원), VM 은 토양침식조절인자(무차원)이다.

3.1.1 강우침식인자(R)

강우침식인자는 연평균과 단일호우에 대한 강우침식인자를 이용할 수 있다. 연평균 강우량에 의한 토양침식량을 나타내는 연평균 강우침식인자는 통상 기존 연구 결과를 사용한다. 단일호우 강우침식인자는 단일호우에 대한 강우강도를 고려하여 토양침식량을 나타내는 인자로서 재현기간과 지속기간을 결정해야 한다. 본 연구에서는 집중호우에 의해 발생하는 토석류의 특성으로 단일호우 강우침식인자를 이용하였으며, 집중호우가 발생한 일시의 강우량(Table 2)을 통하여 산정하였으며, 단일호우 강우침식인자 산정식은 Eqs. (2)~(4)와 같다.

$$R = \sum E \cdot I_{30} \tag{2}$$

$$E = \sum e \cdot \Delta P \tag{3}$$

$$e = 0.029[1 - 0.72\exp(-0.05 \cdot I)] \tag{4}$$

여기서 R 은 단일호우 강우침식인자($10^7 J/ha \cdot mm/hr$), E 는 강우충에너지($10^7 J/ha$), I_{30} 는 설계재현기간의 30분 강우강도(mm/hr), e 는 강우운동에너지($10^7 J/ha/mm$), $TRIANGLEP$ 는 강우지속기간 구분 시 간격당 강우증가량(mm), I 는 강우강도(mm/hr)이다.

Table 2. Rainfall data (Factor R)

Study Area	Rainfall observation station	$I(mm/hr)$	$I_{30}(mm/min)$
Buk-myeon	Wontong	66.0	27.0
	Osek	77.5	34.0
Bongyang-eup	Baegun	64.0	31.5
	Jecheon	62.0	23.0
Wondeok-eup	Gungchon	110.5	43.5
	Wondeok	64.5	39.5

3.1.2 토양침식인자(K)

토양침식인자는 강우의 영향으로 토양의 박리되는 정도를 나타내며, 토양의 구조, 입도분포, 유기물 함량 등에 관계된다. 주로 극세사-실트의 구성비가 70% 이하인 토양에서 적용이 가능한 Wischmeier(1971)의 방법을 사용하며, 식은 Eqs. (5)와 (6)과 같다.

$$K = 1.32 \left[\frac{2.1 \times 10^{-4}(12 - OM)M^{1.14} + 3.25(S_1 - 2) + 2.5(P_1 - 3)}{100} \right] \tag{5}$$

$$M = (MS + VFS)(100 - CL) \quad (6)$$

여기서 K 는 토양침식인자($ton/ha/R$)이며, 인자의 산정은 농촌진흥청에서 제공하는 정밀토양도를 활용하여 토성을 분류하였다(Table 3).

Table 3. Soil data (Factor K)

Study Area	Soil series		(%)				Organic matter (%)	Wischmeier $K (ton \cdot ha \cdot hr / ha / MJ / mm)$
	Code	Name	Sand	Very fine sand	Silt	Clay		
Buk-myeon	SgC	Samgak	56.30	3.50	30.00	10.20	0.60	0.026
	SqB	Suam	61.20	13.60	19.70	5.50	1.64	0.025
	OdD	Odae	32.40	6.30	41.60	19.70	7.60	0.014
	Hi	Hwangnyong	65.80	15.40	13.40	5.40	0.24	0.026
	MuB	Mui	40.50	6.50	35.80	17.20	6.55	0.014
Bongyang-eup	OnC2	Osan	41.10	14.70	24.70	19.50	1.96	0.020
	Wo	Wolgok	45.20	9.90	35.30	9.60	2.70	0.030
	SqB	Suam	61.20	13.60	19.70	5.50	1.64	0.025
	SNC2	Songsan	46.80	10.90	25.00	17.30	2.41	0.022
Wondeok-eup	OnC2	Osan	41.10	14.70	24.70	19.50	1.96	0.020
	ScB	Sachon	26.20	6.30	42.30	25.20	3.80	0.026
	SgC	Samgak	56.30	3.50	30.00	10.20	0.60	0.026
	YeB	Yecheon	38.60	14.60	34.20	12.60	1.46	0.039
	SAB	Sangju	61.40	9.50	22.90	6.20	1.08	0.023
	NkB	Noegok	66.20	5.50	21.30	7.00	0.52	0.021
	CaD2	Cheongsan	21.70	4.10	56.20	18.00	3.61	0.029

3.1.3 지형인자(LS)

지형인자는 경사지역의 길이와 경사도에 따라 달라지는 지형 특성이 토양침식량에 반영되는 효과를 나타낸 것이다. 사면 길이(L)와 사면경사인자(S)의 곱으로 구성되며 산정방법은 Eq. (7)과 같다.

$$L = \left(\frac{\lambda}{22.13} \right)^m \quad (7)$$

$$m = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (8)$$

여기서 λ 는 평면에 투영된 수평길이(m), Eq. (8)의 m 은 사면경사길이의 멱지수이며, 세류간의 침식에 대한 세류 침식의 비로 제안하였다(Foster et al., 1974).

β 는 토양이 세류와 세류간 침식에 모두 영향을 받는 조건에 대한 세류와 세류간 침식비로 산정하며 Eq. (9)와 같다 (McCool et al., 1989).

$$\beta = \frac{(\sin\theta/0.0896)}{[3.0(\sin\theta)^{0.8} + 0.56]} \quad (9)$$

여기서 θ 는 사면의 경사각으로 McCool et al.(1987)에 의해 제시된 Eqs. (10)과(11)에서는 사면경사인자 S 를 사면경사 9% 기준으로 적용하도록 하고 있다.

$$S = 10.8\sin\theta + 0.03, (\sin\theta < 0.09) \quad (10)$$

$$S = 16.8\sin\theta - 0.50, (\sin\theta \geq 0.09) \quad (11)$$

3.1.4 토양침식조절인자(VM)

USLE에 기술되어 있는 토양피복인자인(C)는 지표의 침식을 제어하는 요인이고, 토양보존대책인자(P)는 지표면에 설치된 토양보존 대책을 고려하는 인자이다. 그러나 농경지의 토양침식량 산정이 중심으로 되어 있어 RUSLE의 인자로 적용하는데 임의성이 높은 문제가 있다. 이를 개선하기 위해 RUSLE은 지상인자, 지표인자, 지하인자 등 세부인자를 산정하고 곱하여 결정하는 방법을 사용하고 있으나, 이러한 세부인자의 적용에는 연구를 통한 발전이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 미국교통연구단(TRB)에서 제시한 방법인 토양피복인자(C)와 토양보존대책인자(P)에 대응하는 무차원인자를 간략화한 토양침식조절인자(VM)를 사용하였다(Table 4).

Table 4. Soil erosion factor application standard by land use

Land use	Soil erosion factor
Barren	0.80
Agricultural Land	0.02
Forest Area	0.01
Pasture	0.01
Water	0.00
Urban and dry area	0.00

3.1.5 유사전달률 산정

RUSLE에 의해 산정되는 토양침식량은 중량단위의 유역 토양침식량으로 하류로 유출되는 유역 출구에서의 토사유출량을 산정하는 것과 차이가 있어 유사전달률(Sediment delivery ratio, SDR) 개념을 도입하여 토양침식량에서 토사유출량을 산정한다. 유사전달률은 미국교통연구단에서 유역면적과 유사전달률의 관계를 Clay와 Sand의 토립자 크기에 따라 제시한 Fig. 2를 통해 산정하였다(Table 5).

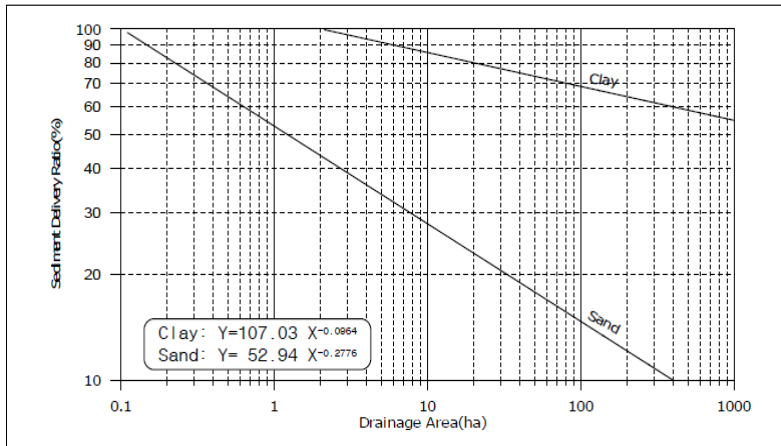


Fig. 2. Estimation of sediment delivery ratio

Table 5. Calculated sediment delivery ratio

Study Areas	Sediment delivery ratio (%)
Buk-myeon	42.39
Bongyang-eup	56.43
Wondeok-eup	24.05

3.2 Marchi의 경험식

Marchi(2004)는 이탈리아의 북부지역 알프스에서 발생한 토석류 127개의 데이터를 이용하여 토석류 토사량 회귀식을 개발하였다. 이탈리아 북부지역 알프스의 연평균 강수량은 500~600 mm로 적은 연평균 강수량에 비해 토석류가 발생한 연도의 연평균 강수량은 1,500 mm~2,000 mm, 많은 곳은 3,000 mm의 강수량으로 다수의 토석류가 발생하였다. Marchi(2004)가 제안한 유로 평균경사와 유거수(지표면을 흐르는 빗물) 부피의 관계를 이용한 토석류 유출토사량 회귀식은 다음 Eq. (12)와 같다.

$$M = V_r (\alpha S^\beta) \tag{12}$$

M 은 토사유출량이며, V_r 은 유거수의 부피, α 는 1.6~2.9 사이의 값, β 는 2의 값을 사용한다. V_r 은 Eq. (13)으로 구할 수 있다.

$$V_r = Q_p \times T_c \tag{13}$$

Q_p 는 침투유량으로 Forti(1920)에 의해 제안된 Eq. (14)를 통해 산정된 값이며 다음과 같이 구한다.

$$Q_p = \left(2.35 \frac{500}{A + 125} + 0.5 \right) \tag{14}$$

T_c 는 유출시간(s)으로 Ferro(2002)에 의해 Eq. (15)으로 제안되었다.

$$T_c = 3600(0.675A^{0.5}) \quad (15)$$

위 내용으로 Marchi(2004)는 토석류의 유출토사량이 유로평균 경사 및 유역면적에 상관성이 있다고 판단하였으며, 연구 대상지역의 입력변수는 Table 6과 같다.

Table 6. Input variables for Marchi's empirical equation

Study Areas	A (km^2)	S (m/m)	Q_p (m^3/s)	T_c (s)	a_{min}	a_{eve}	a_{max}
Buk-myeon	2.00	2.59	9.75	3,436.54			
Bongyang-eup	1.22	0.28	9.81	2,684.03	1.60	2.23	2.90
Wondeok-eup	0.88	1.28	9.83	2,271.76			

3.3 NILI 토사유출량 경험식

본래 침투유량을 산정하는 일본 국토기술정책종합연구소(NILIM)의 경험식은 토사유출량을 근거로 하는 것이 기본(NILIM, 2016)으로 토석류 발생 당시의 강우량, 발생 유역의 토사농도와 토양의 공극률 등을 식의 인자로 사용하여 대상 유역의 특성을 반영할 수 있다. NILIM(2016)에서 제안한 토사유출량 경험식은 아래 Eqs. (16)~(21)로 구성되어 있다.

$$Q_{sp} = 0.01 \sum Q_p \quad (16)$$

$$Q_p = \frac{P_v \cdot C_*}{C_d} \quad (17)$$

$$P_v = \frac{10^3 R_T A}{1 - \lambda} \left(\frac{C_d}{1 - C_d} \right) f_r \quad (18)$$

$$R_T = \left[\frac{r_{24}}{24} \right]^{1.21} \cdot \left[\frac{24 f^2}{\frac{C}{60} A^{0.22}} \right]^{0.606} \quad (19)$$

$$f_r = 0.05(\log A - 2.0)^2 \quad (20)$$

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (21)$$

여기서 Q_{sp} 는 토석류 피크유량, Q_p 는 유출량, P_v 는 유출토사량(m), R_T 는 유효강우강도(mm/hr)로 토석류가 발생한 시점의 최대 시우량을 사용하였다. A 는 유역면적(km^2), λ 는 공극율, f_r 는 유출 보정율, C_* (= 0.65)는 토석류 최대 용적 토사농도이다. NILIM(2016)에서 제안한 토사유출량 산정식에 입력한 연구대상지역의 변수는 Table 7과 같다.

Table 7. Input variables for NILIM empirical equation

Study Areas	A (km^2)	θ ($^\circ$)	ρ (kg/m^3)	σ (kg/m^3)	ϕ ($^\circ$)	R_T (mm/hr)	f_r	C_d
Buk-myeon	2.00	12.20				446.80	0.20	0.41
Bongyang-eup	1.22	13.30	1,000.00	2,650.00	37.00	353.30	0.21	0.33
Wondeok-eup	0.88	1.4.90				484.00	0.21	0.33

3.4 현장조사 자료를 이용한 토사유출량 산정

본 연구에서는 연구대상 지역인 인제군 북면 한계리 일대와 제천시 봉양읍 일대에 발생한 토석류의 하류부 지점에 지상 LiDAR를 이용한 정밀 측량을 진행하였으며, GIS를 통한 데이터 연산으로 하류부의 퇴적량을 토사 유출량으로 산정하였다 (Fig. 3). 이러한 산정 방법은 산지에서 유출된 토사가 모두 퇴적되었다는 가정하에 수행되며, 퇴적되지 않고 유실된 부유사들은 측정에서 제외되어 실제 토사유출량보다 과소 산정되는 경향이 나타난다.

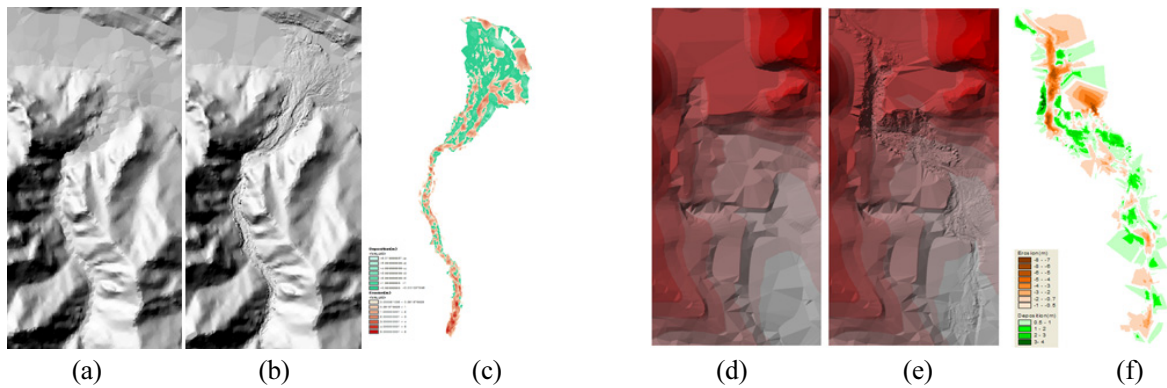


Fig. 3. Construction of topographic data in the study areas (a), (b), (c) : Buk-myeon, (d), (e), (f) : Bongyang-eup

삼척시 원덕읍 갈남리 일대는 현장조사 당시 퇴적부 지점에 민가의 피해로 인해 신속한 복구가 진행되어 발생지부터 복구가 진행되지 않은 퇴적부까지 현장조사를 실시하였고, RTK GPS를 이용하여 좌표와 고도값을 측정하였으며, 토석류의 발생지부터 퇴적부까지의 거리, 침식이 진행된 계곡의 심도, 폭을 측정하였다(Fig. 4). 그리고 Eq. (22)에 적용하여 유출된 토사의 전체 체적을 계산하였다(Table 8).

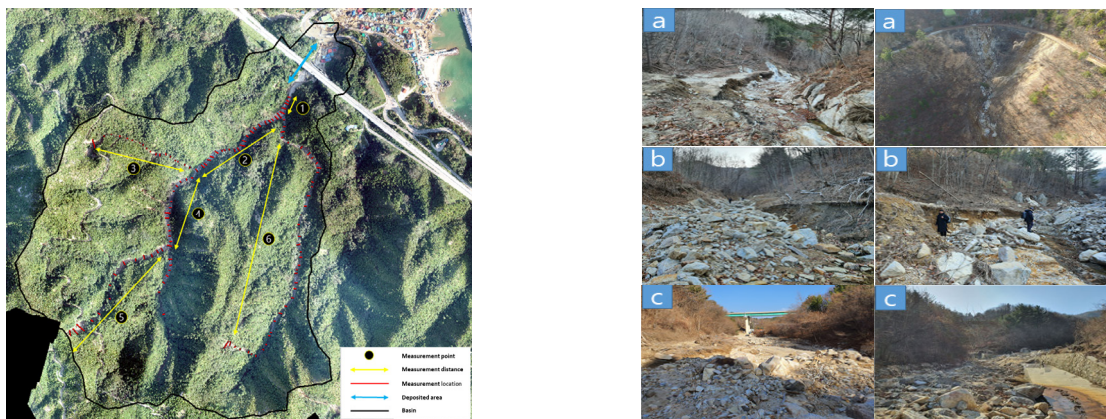


Fig. 4. Overview of on-site research (Wondeok-eup)

Table 8. Result of On-site research

No.	Average erosion width (m)	Average erosion depth (m)	Distance (m)
1	13.9	0.6	80
2	12.9	2.2	339
3	7.5	1.7	230
4	10.1	0.6	298
5	14.0	3.4	452
6	9.2	1.9	1,014

$$V = \sum_{i=1}^n (L \times B \times D)_i \tag{22}$$

4. 토사유출량 산정 결과 및 비교

4.1 토사유출량 산정 결과

본 연구에서는 지상 LiDAR를 활용하여 인제군 북면과 제천시 봉양읍 지역의 정밀측정 결과로 생성된 지형자료를 GIS 프로그램의 지형 연산과 삼척시 원덕읍의 현장조사를 통해 연구대상지역의 토사유출량을 산정하였다. 연구대상지역의 토사유출량은 인제군 북면, 제천시 봉양읍, 삼척시 원덕읍 순으로 204,131 m³, 10,066 m³, 54,266 m³으로 나타났다(Table 9).

Table 9. Calculation result of on-site research and precise survey sediment yield

Study Areas	Sediment Yield (m ³)
Buk-myeon	204,131
Bongyang-eup	10,066
Wondeok-eup	54,266

RUSLE, Marchi(2004), NILIM(2016)의 토사유출량 산정식을 이용하여 토사유출량을 계산한 결과는 Table 10과 같이 나타났다.

Table 10. Comparison of sediment yield according to empirical equations

Study Areas	Proposed equations RUSLE (m ³)	Marchi (m ³)			NILIM (m ³)
		min	max	avg	
Buk-myeon	356,212	358,918	650,538	504,728	201,093
Bongyang-eup	29,895	32,431	58,710	45,602	16,531
Wondeok-eup	91,110	58,504	106,039	82,272	62,763

4.2 토사유출량 산정 비교

토석류 피해지역의 현장조사 및 정밀측정을 하여 산정된 토사유출량과 경험식에 의한 토사유출량을 비교한 결과는 Table 11과 같다. Marchi의 경험식의 경우 입력변수 a의 값에 따라 최대, 최소, 평균으로 나타나 토사유출량 비교 시 평균 값을 사용하였다. 현장조사를 통한 토사유출량 산정에는 3.4장에서 언급한 것과 같이 퇴적되지 않고 유실된 부유사가 제외되어 과

소 산정되는 경향이 있어 과소 산정되었으나 이를 배제하고 비교하였다.

RUSLE 방법에 의한 토사유출량의 경우 단일호우 강우량 및 토양침식인자 등 우리나라 산지 유역 특성을 반영하였지만 현장조사 및 정밀측정 토사유출량보다 연구대상지 전체 평균 2.13배 과다 산정되었고 특히 제천시 봉양읍 지역에서 약 2.97 배 과다 산정되었음을 확인하였다. 그리고 Marchi 경험식의 토사유출량은 연구대상지 전체 평균 2.8배 과다 산정되었으며, 제천시 봉양읍에서 약 4.5배가 과다 산정되었다. 마지막으로 NILIM의 경험식 토사유출량은 연구대상지 전체 평균 약 1.26 배 과다 산정되었으며, 다른 두 경험식에 비해 낮은 오차가 나타났다. 인제군 북면에서는 현장조사와 유사한 토사유출량이 나타났으며, 제천시 봉양읍에서 1.6배, 삼척시 원덕읍에서 1.2배 과다 산정되었다.

세 가지 토사유출량 산정 방법 중 NILIM에서 제안한 경험식으로 산정한 토사유출량의 오차가 낮았다. 그러나 제천시 봉양읍에서 1.6배의 차이가 나타난 이유는 해당 지역의 경우 유역 면적에 비해 토석류의 규모가 작고 NILIM 경험식에서는 유역의 면적을 입력변수로 사용하기 때문에 나타난 것으로 판단된다. 그리고 오차범위가 크게 산정된 Marchi의 경험식은 이탈리아의 산지 유역 특성이 반영된 경험적 계수가 우리나라 유역 특성과 차이가 있어 이를 반영하지 못하여 나타난 것으로 판단된다.

Table 11. Result of sediment yield

Study Areas	Sediment yield (m^3) / Difference (multiple)						
	Field measurement	RUSLE		Marchi (avg)		NILIM	
Buk-myeon	204,131	356,212	1.75	504,728	2.47	201,093	0.99
Bongyang-eup	10,066	29,895	2.97	45,602	4.53	16,531	1.64
Wondeok-eup	54,266	91,110	1.68	82,272	1.52	62,763	1.16

5. 결론

본 연구에서는 집중호우 및 태풍의 영향으로 토석류 재해가 발생했던 강원도 인제군 북면, 삼척시 원덕읍, 충청북도 제천시 봉양읍을 대상으로 정밀측량 및 현장조사를 진행하였고, 토사유출량을 산정하는 방법 중 RUSLE, Marchi, NILIM 세 가지 방법을 이용하여 토사유출량 산정 및 비교에 관한 연구를 수행하였다. 인제군 북면, 제천시 봉양읍, 삼척시 원덕읍 순으로 실측 토사유출량은 204,131 m^3 , 10,066 m^3 , 54,266 m^3 로 측정되었으며, 경험식에 의한 토사유출량은 RUSLE, Marchi, NILIM 순으로 인제군 북면에서 356,212 m^3 , 504,728 m^3 , 201,093 m^3 , 제천시 봉양읍에서 29,895 m^3 , 45,602 m^3 , 16,531 m^3 , 삼척시 원덕읍에서 91,110 m^3 , 82,272 m^3 , 62,763 m^3 로 나타났다. 세 경험식 중 NILIM에서 제안한 토사유출량 경험식이 다른 경험식보다 오차가 낮게 나타났으며, 국내에 적용하기에 적합한 것으로 나타났으며, 향후 연구에서는 국내 유역 특성에 맞게 입력변수를 산정하고 연구대상 지역을 확장하여 국내에 적합한 토사유출량 산정식에 관한 연구를 추가적으로 진행하고자 한다.

Acknowledgment

This paper work was financially supported by Ministry of the Interior and Safety as Human Resource Development Project in Disaster Management(C2001777-01-01).

References

- Choi, Y. N. (2019). Estimation of Debris-flow Volume by Field Survey and GIS Based Numerical Analysis of the Behavior. Ph. D. Dissertation. Kangwon National University.
- Ferro, V. (2002). Discussion of ‘Simple Flume for Flow Measurement in Open Channel’ by Zohrab Samani and Henry Magallanez. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 128(2): 129-131.
- Forti, A. (1920). Elementi per la progettazione delle piene catastrofiche nei corsi d’acqua montani. *Annali del Consiglio Superiore delle Acque*. 2(3): 55-74.
- Foster, G. R. and Wischmeier, W. H. (1974). Evaluating Orregular Slopes for Soil Loss Prediction. *Transactions of the ASAE*. 23: 305-309.
- McCool, D. K., Foster, G. R., Mutchler, C. K., and Meyer, L. D. (1989), Revised Slope Length Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*. 32(5): 1571-1576.
- McCool, D. K., Brown, L. C., Foster, G. R., Mutchler, C. K., and Meyer, L. D. (1987), Revised Slope Steepness Factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*. 30(5): 1387-1396.
- National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM). (2016), Manual of technical standard for establishing sabo master plan for debris flow and driftwood. Technical note of national institute for land infrastructure management, No. 364. Japan. pp.25-32
- Marchi L. and D’Agostino V. (2004). Estimation of Debris Flow Magnitude in the Eastern Italian Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*. 29(2): 207-220.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2019). Practice Guidelines for Consultation on Disaster Impact Assessment. Sejong: MOIS.
- Renard, K. G. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Government Printing.
- Williams, J. R. and Hann, R. W. (1978). Optimal Operation of Large Agricultural Watersheds with Water Quality Restraints. Texas Water Resources Institute.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. (1960). A Universal Soil-loss Equation to Guide Conservation Farm Planning. *Transactions 7th int. Congr. Soil Sci.* 1: 418-425.
- Wischmeier, W. H., Johnson, C. B., and Cross, B. V. (1971). Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites. *Jour. Soils and Water. Cons.* 26: 189-193.
- Woo, B. M. (1997). Soil Conservation Engineering. Hyangmunsa.

Korean References Translated from the English

- 우보명 (1997). 개정 사방공학. 향문사.
- 최영남 (2019). 현장실측에 의한 토석류 규모 산정과 GIS 기반의 수치적 거동 분석. 강원대학교 박사학위논문.
- 행정안전부 (2019). 재해영향평가등의 협의 실무지침. 세종: MOIS.