The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 32, No. 4, December, 2022, pp. 547-558
https://doi.org/10.9720/kseg.2022.4.547

RESEARCH ARTICLE

유량과 지형조건에 따른 Flo-2D에서의 토석류 확산 민감도 분석

김남균[1] · 전병희[2*]

[1]산림조합중앙회 산림종합기술본부 선임연구원, [2]강원대학교 방재전문대학원 교수

Sensitivity Analysis of Debris Flow Simulation in Flo-2D Using Flow Discharge and Topographic Information

Namgyun Kim[1] · Byonghee Jun[2*]

[1]Senior Researcher, Forest Technology Division, National Forestry Cooperative Federation
[2]Professor, Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University

Abstract

In August 2020, a debris flow occurred in Gokseon, Jeollanam-do, that resulted in the death of five residents. In this study area, high-resolution 0.03 m topographic information was generated through photogrammetry, and the amount of soil movement/loss was measured. In addition, sensitivity analysis was performed for flow depth, flow velocity, and debris flow area with the program Flo-2D using the difference in simulation parameter that discharge and topographic information. Wth increasing debris flow input discharge, increases were seen in flow depth, flow velocity, and debris flow area, as ell as in the gap in results from high-resolution topographic information and low-resolution topographic information. Also, when high-resolution topographic information was used, the results were similar to the actual (measured) flow direction of the debris flow. Therefore, the application of high-resolution topographic information increases the accuracy of the debris flow analysis results compared with low-resolution information. Results could be further imporved in the future by considering geological information such as yield stress and viscosity.

Keywords: debris flow, flow discharge, high-resolution DSM, DEM, numerical simulation

초 록

2020년 8월 집중호우로 인하여 전라남도 곡성지역에 토석류가 발생하여 5명이 사망하는 재난이 발생하였다. 이 지역을 대상으로 하여 사진 측량을 통해 0.03 m의 고해상도 지형정보를 구축하고 토사의 붕괴량을 측정하였다. 또한 Flo-2D를 이용하여 토석류의 유량과 지형정보의 차이에 따라 유동심, 유속, 확산면적에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 유량이 높아질수록 토석류의 유동심, 유속, 확산면적이 높아지며 고해상도 지형정보와 저해상도 지형정보와의 결과 차이도 높아지는 것으로 나타났다. 그리고, 고해상도의 지형정보를 적용하였을 때 실제의 토석류 흐름방향과 유사하게 계산되어 고해상도 지형정보의 적용이 토석류 해석 결과의 정확성을 높이는 결과를 정량적으로 분석하였다. 추가로 항복응력과 점성과 같은 지질정보에 대해 고려하면 전반적으로 실제 토석류의 확산 정보보다 작게 계산된 결과를 보완할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 토석류, 유량, 고해상도 지형정보, 수치고도모델, 수치시뮬레이션

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Byonghee Jun
E-mail: byongheejun@gmail.com

Received: 8 November, 2022
Revised: 28 November, 2022
Accepted: 28 November, 2022

Ⓒ 2022 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

토석류는 물, 바위, 토사, 공기, 유목 등이 혼합되어 흐르는 현상을 의미한다. 우리나라에서는 주로 강우에 의하여 발생하고 얇은 층에서 붕괴된 산사태나 토사붕괴가 토석류로 전이되는 유형이 많아 여름철에 대부분 발생한다. 이러한 토석류는 매년 주민의 생명과 재산의 피해를 가져옴에 따라 산림청에서는 '산사태정보시스템'을 이용하여 산사태 발생의 예방, 대비, 대응, 복구 등의 관리를 수행 중에 있다.

산사태를 예측하는 정보는 기상청 714개 관측소의 5 km × 5 km 격자단위 강우정보와 화성암류, 변성암류, 퇴적암류의 지질구분을 통하여 국내 11개 권역을 구분하여 토양 내 빗물의 양을 토양함수지수로 산정한 Korea Landslide Early Warning System(KLES) 모델에서 토양함수지수 대비 80% 도달할 경우 산사태 주의보, 100% 도달할 경우 산사태 경보로 발령한다. 산사태 예측 정보 뿐만 아니라, 산사태가 발생할 수 있는 지역을 1~5등급으로 구분하여 10 m × 10 m 격자별로 산사태위험지도를 공개하고 있으며, 매년 산사태 기초조사를 통한 지자체의 정보전달과 지자체에서의 산사태 실태조사를 통하여 위험지역에 대하여 시스템적으로 관리되고 있다. 산사태라는 현상에 대해서만 관리되는 것으로 보일 수 있으나 실질적으로는 산사태와 토석류를 모두 포함하고 있고, 국립산림과학원에서는 2011년 Random Work Model을 이용하여 토석류 위험예측지도를 제작하여 산사태와 토석류를 구분하여 관리되고 있다.

토석류를 예측하는 연구는 다양한 연구자들에 의해 발전되어오고 있으며, 현장정보를 이용한 통계적 정보 분석, 수치모델을 이용한 다이나믹 분석, 현장정보를 재현하는 실험적인 분석, 이들의 방법을 서로 상호보환적인 검증과 분석 기법의 개발 등으로 구분할 수 있다. 최근에는 딥러닝 기법을 이용한 토석류의 예측에 관한 연구(Di et al., 2019; Malgorzata et al., 2020; Li et al., 2022)가 활발히 진행되고 있으나, 토석류의 유발 강우, 지형, 지질 등의 정보가 다양하여 지역적으로 한정되는 한계성이 있어, 통계정보와 수치모델을 이용한 토석류의 예측 정보가 위험성을 판단하는데에 주로 사용되고 있다.

Chae et al.(2004)은 로지스틱 회귀분석을 이용하여 자연사면에서의 토석류 발생에 관하여 확률론적으로 예측하였고, Jun et al.(2010)은 지상 Lidar를 이용하여 토석류의 침식과 퇴적량을 추정하였으며, Kim et al.(2015)은 토석류의 도달 거리를 이용하여 도시 내의 산지 토석류 위험 구역을 예측, Kim and Han(2017)은 SINMAP 모형을 이용한 토석류 발생지역 에측, Song et al.(2021)은 물리기반모델에 지형항적 특성을 결합하여 토석류가 발생할 수 있는 위치 추정 등 토석류의 예측에 관한 선행연구가 수행되고 있다. 특히 수치모델을 이용한 토석류의 분석 연구에는 Kim et al.(2013)은 우면산 토석류에 대한 Flo-2D의 매개변수 분석과 모형의 적합성 분석, Lee and Kim(2019)은 같은 지역에 대하여 Flow-R을 이용하여 매개변수들이 시뮬레이션 결과에 미치는 영향을 확인, Tak et al.(2015)은 RAMMS와 Flo-2D 모형 비교를 통한 모형의 현장 적용성 검토, Kim and Kim(2021)은 울릉지역의 토석류 발생에 따른 사방댐의 효과를 파악하기 위하여 KANAKO-2D를 이용, Choi et al.(2021)은 LS-Rapid를 이용하여 절토사면의 붕괴에 따른 토석류 발생의 확산 범위를 예측 등 다양한 소프트웨어를 이용한 토석류의 분석이 이루어지고 있다.

토석류를 해석하는 방법 다양한 이론들이 있지만, 일반적으로는 유체로써 해석하기 때문에 지배방정식은 나비에-스토크스 방정식에서 유도되며, 이러한 과정에서 토석류에 작용하는 힘에 대하여 어떠한 매개변수를 사용하는지에 따라 수치해석의 결과가 달라질 수 있다. 우리나라에서는 산사태 실태조사에서 토석류를 예측하기 위해 사용되는 프로그램이 주로 Flo-2D가 사용되고 있음에 따라 본 연구에서는 Flo-2D를 이용하여 토석류의 확산 범위 민감도 분석을 수행하고자 하였다. 연구지역은 2020년도 곡성군 토석류에 대하여 적용하였고, 매개변수 중에서도 민감도가 높은 지형과 토석류의 입력유량에 따라서 비교 분석하였다.

연구지역 및 지형정보 분석

2020년도는 우리나라 전국에 걸쳐 태풍과 집중호우로 인해 최근 10년간 산사태 발생 빈도와 복구비가 가장 높았던 해이다. 연구지역은 전라남도 곡성군 오산면 선세리에서 발생한 토석류이고 8월 7일 집중호우에 기인하였다(Fig. 1). 자연사면에서 발생한 것이 아닌 15번 국도의 성토사면에서 붕괴가 시작되었으며, 붕괴된 토사는 강우에 의하여 계곡부를 따라 유출되어 사면붕괴가 토석류로 전이된 유형이다. 토석류의 발생부부터 확산부까지의 거리는 약 500 m이고, 너비는 발생부 약 60 m, 유하부 약 80 m, 퇴적부 약 100 m로 조사되었다. 이러한 토석류로 인하여 5명이 사망하였고 주택 3동의 파손과 농경지 및 차량의 피해가 발생하였다(Fig. 2).

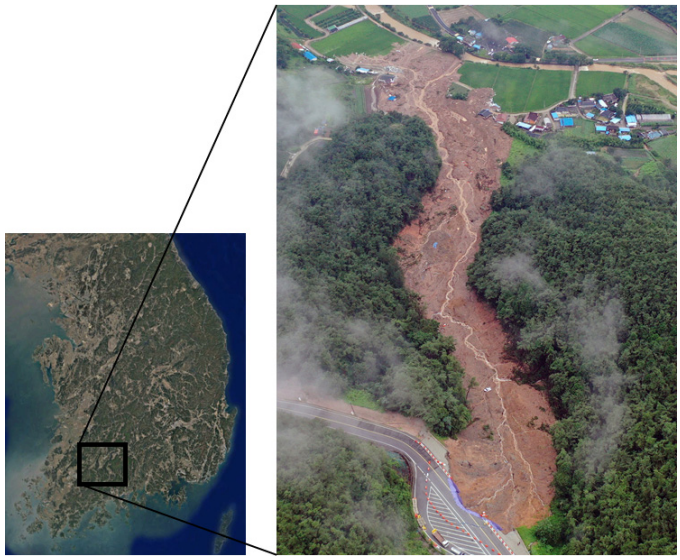

Fig. 1. Aerial photographs of the study area, showing the location (left) and the debris flow (right).

Fig. 2. Photographs of the damage caused by the debris flow.

토석류가 발생한 지역에 대하여 Flo-2D 해석을 위해 유역분석을 수행하였다. 유역의 지형정보는 국토지리정보원에서 제공하는 1:5,000 수치지형도를 이용하여 5 m 간격의 Digital Elevation Model(DEM)을 구축하였고, UAV를 이용한 사진측량을 수행하여 고해상도인 3 cm 간격의 Digital Surface Model(DSM)을 구축하였다(Fig. 3). Fig. 3a는 토석류가 발생한

유역을 나타낸다. 유역의 면적은 0.138 km^2이고, 유역 내 토석류의 확산 면적은 0.04 km^2이다. 파란색으로 표신된 부분은 강우시 계곡부를 따라 흐르는 유로를 나타내고 빨간색 부분은 토석류의 시작지점, 즉 성토사면이 붕괴된 지점을 나타낸다. 해당 유역에 대하여 Fig. 3b는 5 m 간격의 DEM 지형정보를 생성하여 고도값을 나타내었으며 평균 고도는 201.27 m로 나타났고, Fig. 3c는 3 cm 간격의 생성된 DSM 지형정보를 나타내며 평균 고도는 211.22 m로 나타났다.

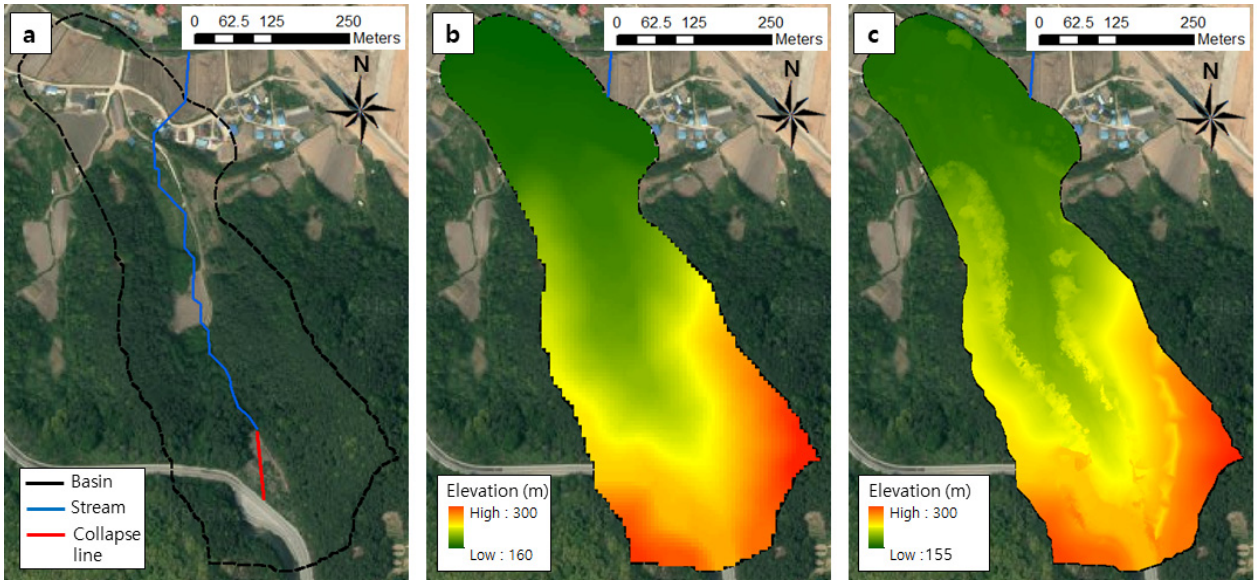

Fig. 3. Basin terrain information: (a) Satellite image, (b) DEM, (c) DSM.

Fig. 4는 토석류의 발생부 이다. Fig. 4a는 강우에 의해 도로의 성토사면이 붕괴된 지점을 나타내며 빨간색 선을 따라 지형의 단면을 나타낸 그래프가 Fig. 4b이다. 거리 약 90 m인 단면에서 토석류가 발생하기 이전 지형 정보는 1:5,000 수치지도를 통해 도출한 결과로써, 평균 고도는 243 m로 직선형태로 나타나는 것을 볼 수 있다. 토석류가 발생한 이후의 지형은 사진측량을 통해 도출한 결과로써, 파선으로 나타냈으며 43 m 지점에서 최저 고도인 233 m로 나타나 약 10.5 m 깊이의 붕괴가 발생한 것을 보여준다. Fig. 4b와 같이 최대로 붕괴된 지점을 중심으로 좌우로 점점 작게 붕괴된 원호 파괴 형태로 나타났다. 가장 끝지점인 0~10 m 지점과 80~90 m 지점에서 파선이 높게 나타난 것은 나무의 높이를 나타냈기 때문이다. 생성된 고해상도 정보는 토석류 발생 이후의 실제 지형을 정확하게 반영하고 있다.

토석류의 유량을 추정하기 위하여 토석류 발생 이전과 이후의 정보를 통해 실제로 붕괴된 토사의 량을 계산하였다(Fig. 4c). 발생부의 최상단 지점은 15번 국도가 붕괴된 시점이고, 발생부의 최하단 지점은 성토사면의 최하단지점, 계류부와 변곡점이 생기는 지점으로 설정하여 5 m 격자의 크기로 붕괴토사량을 계산하였다. 토석류가 발생한 이후의 지형정보 해상도는 0.03 m로 고해상도이지만 토석류가 발생하기 이전의 지형 정보는 1:5,000 수치지도에서 5 m의 해상도로 제작되었기 때문에, 이를 기준으로 계산하였다. 해상도를 더욱 높여서 계산 할 수 있으나, 1:5,000 수치지도의 등고선의 주곡선 간격이 5 m이므로 더 높은 해상도로 계산 할 경우, 등고선에서부터 DEM을 제작하는 과정에서 보간이 이루어지기 때문에 오히려 오차가 더 크게 발생할 수 있기 때문이다. 발생부에서의 최대 붕괴된 토사의 높이는 12.1 m로 나타났고, 붕괴 중심부를 중심으로 양쪽 하단에 약간의 퇴적이 발생하여 최대 퇴적이 0.48 m로 나타났다. 최종 붕괴된 토사량은 21,336 m^3으로 계산되었다. 다시 말해, 성토사면의 21,336 m^3 토사가 붕괴되어 계곡부로 흘러내려, 높은 강우강도에 의해 붕괴된 토사가 토석류로 전이되어 계곡부를 따라 마을로 흘러내려온 것으로 분석되었다.

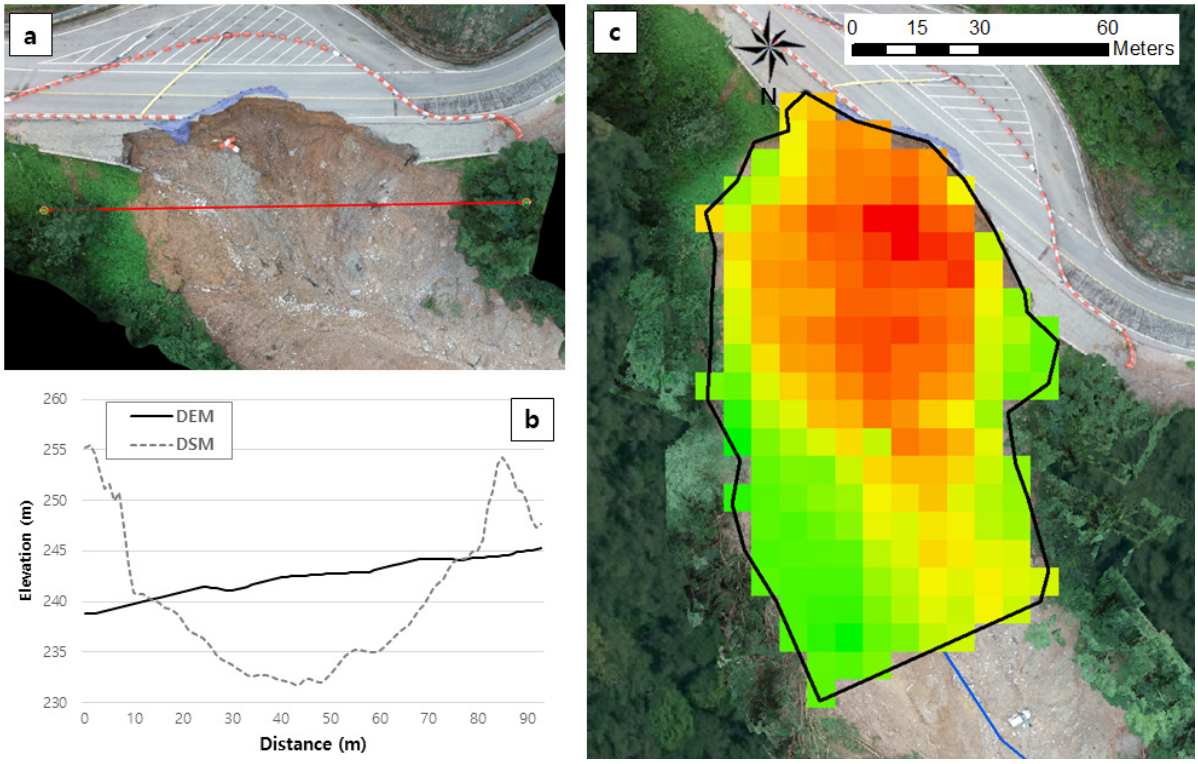

Fig. 4. Debris flow area: (a) debris flow initiation area, (b) comparison of topography changes before and after debris flow along the red line in (a), (c) collapse height.

Flo-2D 모형 및 해석 조건

연구지역의 토석류를 해석하기 위하여 사용된 Flo-2D 모형은 물과 토사의 보존 및 운동량방정식의 적분에 의해서 수행되며 식 (1)~식 (2-2)와 같다(Flo-2D, 2009).

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial h V_x}{\partial x}+\frac{\partial h V_y}{\partial y}=i \tag{1}$$

$$S_{fx}=S_{0x}-\frac{\partial h}{\partial x}-\frac{V_x}{g}\frac{\partial V_x}{\partial x}-\frac{V_y}{g}\frac{\partial V_x}{\partial y}-\frac{1}{g}\frac{\partial V_x}{\partial t} \tag{2-1}$$

$$S_{fy}=S_{0y}-\frac{\partial h}{\partial y}-\frac{V_y}{g}\frac{\partial V_y}{\partial y}-\frac{V_x}{g}\frac{\partial V_y}{\partial x}-\frac{1}{g}\frac{\partial V_y}{\partial t} \tag{2-2}$$

여기서, h는 유동심, V는 유속, i는 강우강도, S_f는 에너지 경사, S_0는 하천의 경사, x, y는 각각 토석류의 흐름 방향, t는 시간, g는 중력가속도를 의미한다. 토석류의 총체적은 토사와 물의 각각의 합에 의하여 결정되며 그 규모는 부피 팽창계수(Bulking Factor, BF) 식 (3)과 같이 결정되고 토석류의 농도(C_v)에 따라 규모가 달라진다.

$$BF = \frac{1}{(1 - C_v)} \tag{3}$$

토석류를 수치모델링하기 위한 입력변수는 강우정보와 현장에서 수집한 토질시료의 물성분석을 통한 결과값을 이용하였다. 유출량 산정공식인 식 (4) 합리식을 이용하여 모델에서의 입력유량을 결정하였다.

$$Q = \frac{1}{3.6} CIA \tag{4}$$

여기서, C는 유출계수로 국토교통부의 도로배수시설 설계 및 관리지침에서 제시하는 값을 이용하여 산지 0.7과 비탈면 0.8의 값을 이용하였다. I는 시간당 강우강도를 의미하고, 토석류가 발생한 시점에서의 강우강도인 12.5 mm/h와 토석류의 발생에 영향을 미친 최대 강우강도인 52 mm/h의 값을 각각 적용하였다. A는 유역의 면적으로 위에서 기술한 유역의 면적인 0.138 km^2의 값을 적용하였다. 사실, 시뮬레이션의 입력조건을 위한 유량 산정 뿐만 아니라 실제로 토석류의 유량을 추정하기 위한 선행연구들이 다양하게 있으며 Rickenmann and Zimmermann(1993)은 스위스 알프스지역의 붕괴 토사의 체적이 4,000~60,000 m^3일 때, 토석류의 유량은 120~650 m^3/s로 추정하였고, Okuda and Suwa(1981)는 붕괴 토사의 체적이 214~14,800 m^3일 때, 토석류의 유량은 13~124 m^3/s로 추정하였고, Rickenmann(1999)은 이러한 사례들의 문헌 조사를 통하여 붕괴토사량으로부터 유량을 계산하는 경험식을 식 (5)와 같이 제시하였다.

$$Q_* = 0.1 M_*^{5/6} \tag{5}$$

여기서, M_*은 토사의 최대 체적이고 Q_*은 토석류의 피크 유량을 나타낸다. 합리식 이외에도 다른 선행 연구와 경험공식을 이용하여 입력조건을 설정할 수 있었으나 곡성지역 토석류는 선행 연구들에 비하여 유역이 작아 상대적으로 유량이 과하게 계산되어 이를 적용하기에는 무리가 있다고 판단하였다. 그러나, 연구지역에 적용할만하다고 예상되는 Ou et al.(1991)과 Jitousono et al.(1996)이 제시한 아래와 같은 경험식을 각각 적용하여 시뮬레이션 조건을 추가하였다.

$$Q = 0.0188 M^{0.790} \tag{6}$$

$$Q = 0.0135 M^{0.560} \tag{7}$$

여기서, M은 토사의 체적이고 Q은 토석류의 유량을 나타낸다.

Table 1은 지형 정보와 입력 유량에 따른 Flo-2D 해석 조건을 나타낸다. 총 20가지의 조건에 따라 시뮬레이션을 수행하였으며, 각각의 변수는 유출계수, 강우강도, 유량, 토석류 농도, 지형 정보이며, 유량과 지형에 따른 토석류의 확산면적, 유동심, 유속을 비교하였다. Case 1 to Case 8은 0.03 m의 고해상도 지형정보에서 각각의 유출계수와 강우강도, 토석류의 농도일 때의 유량을 적용하였고, Case 9 to Case 16은 상기 언급한 유량에 대하여 5 m의 저해상도 지형정보에서 적용하였다. Case 17 to Case 20은 식 (6) and 식 (7)의 경험식을 적용하였다.

Table 1. Flo-2D simulation condition

	Terrain information	Run off coefficient	Rainfall intensity (mm/h)	Sediment concentration (%)	Debris flow discharge (m^3/s)
Case 1	DSM (resolution: 0.03 m)	0.7	12.5	30	0.623
Case 2				40	0.872
Case 3			52	30	2.591
Case 4				40	3.627
Case 5		0.8	12.5	30	0.711
Case 6				40	0.996
Case 7			52	30	2.961
Case 8				40	4.146
Case 9	DEM (resolution: 5 m)	0.7	12.5	30	0.623
Case 10				40	0.872
Case 11			52	30	2.591
Case 12				40	3.627
Case 13		0.8	12.5	30	0.711
Case 14				40	0.996
Case 15			52	30	2.961
Case 16				40	4.146
Case 17	DSM (resolution: 0.03 m)	-	-	-	49.448
Case 18					7.882
Case 19	DEM (resolution: 5 m)	-	-	-	49.448
Case 20					7.882

결과 및 토론

유량과 지형조건에 따라 Flo-2D의 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 Fig. 6에 나타났으며 각각 유동심과 유속을 보여준다. 20개의 Case 중에서 Case 19는 계산 오류가 발생하여 결과값이 도출되지 않았다. 이러한 이유는 과다한 유량이 입력되어 오류가 발생하였으며, 같은 조건에 지형의 해상도 조건만 다른 Case 17은 계산이 진행되는 것으로 보아 흐름의 방향을 결정하는 고도값이 충분이 낮은 방향으로 흘러갈 수 있도록 구축되어야 오류가 발생하지 않는다. 다시말해, 계산되는 격자 내에서 유입량을 입력하는 셀을 중심으로 8개의 격자가 계곡부의 형상으로 충분한 지형정보가 생성되어야 하며, 과다한 유량이 입력될 경우 초기의 유동심이 지형의 높이보다 높아지기 때문에 계곡부의 역방향으로 흐르는 현상이 나타나 오류가 발생한다. 본 연구에서 구축된 DSM의 경우 고해상도의 지형정보로써, 충분한 경사를 가진 계곡부를 나타내고 있기 때문에, Case 17에서는 오류가 발생하지 않았다.

Table 2는 각 Fig. 5와 Fig. 6의 결과 값을 수치로 정리한 결과이다. Case 19를 제외한 19개의 시뮬레이션 결과에서 최대 유동심과 유속은 Case 17에서 계산되었고, 최소 유동심과 유속은 Case 9에서 계산되었다. 단순비교로 입력 피크유량이 Case 17에서 49.448 m^3/s로 가장 높고 Case 9에서 0.6229 m^3/s로 가장 작기 때문이다. 즉, 입력유량이 많을수록 유동심과 유속, 토석류 확산 면적이 넓어지는 것으로 보여짐에 따라 시뮬레이션의 결과가 적절한 것으로 판단된다.

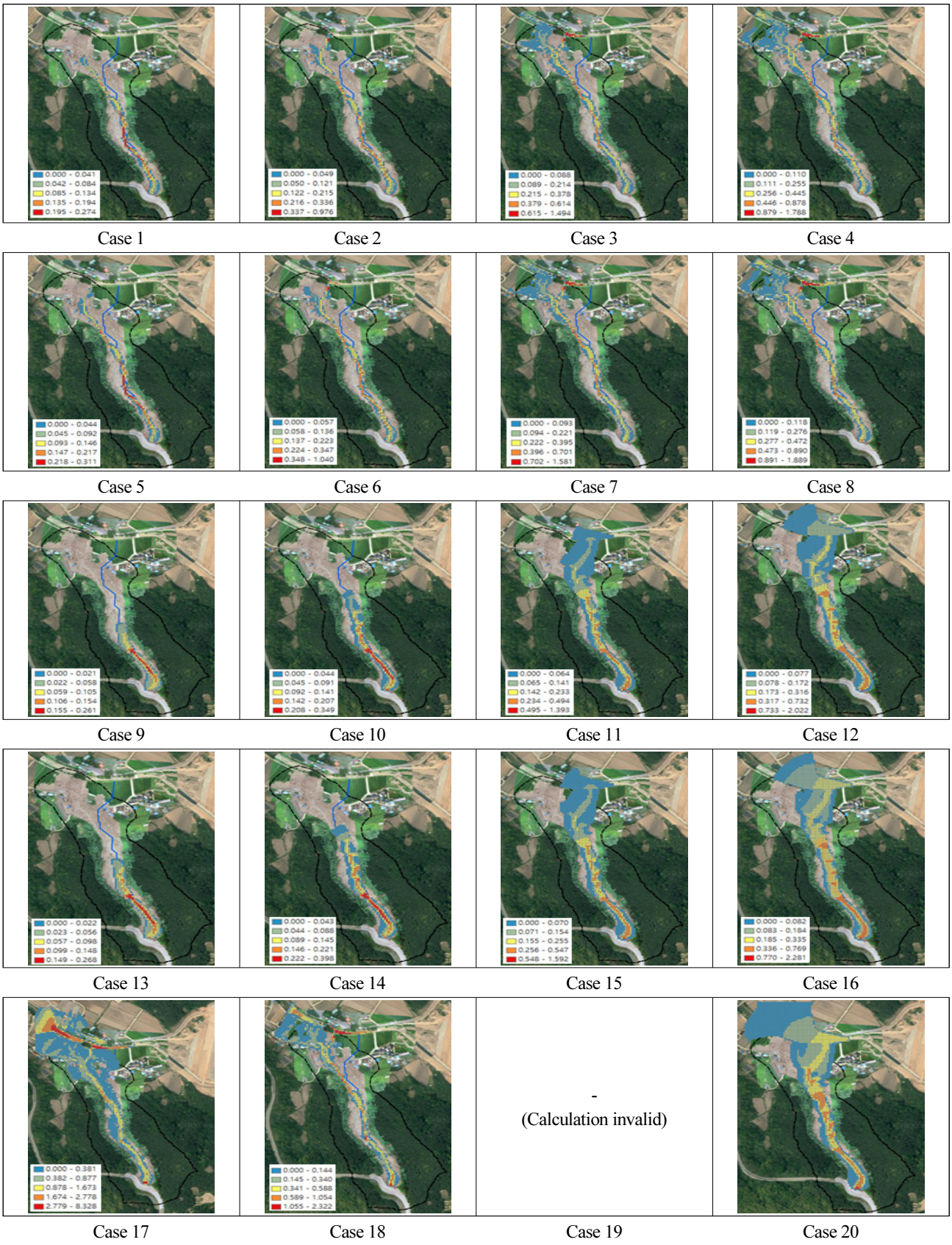

Fig. 5. Flo-2D simulation results for flow depth.

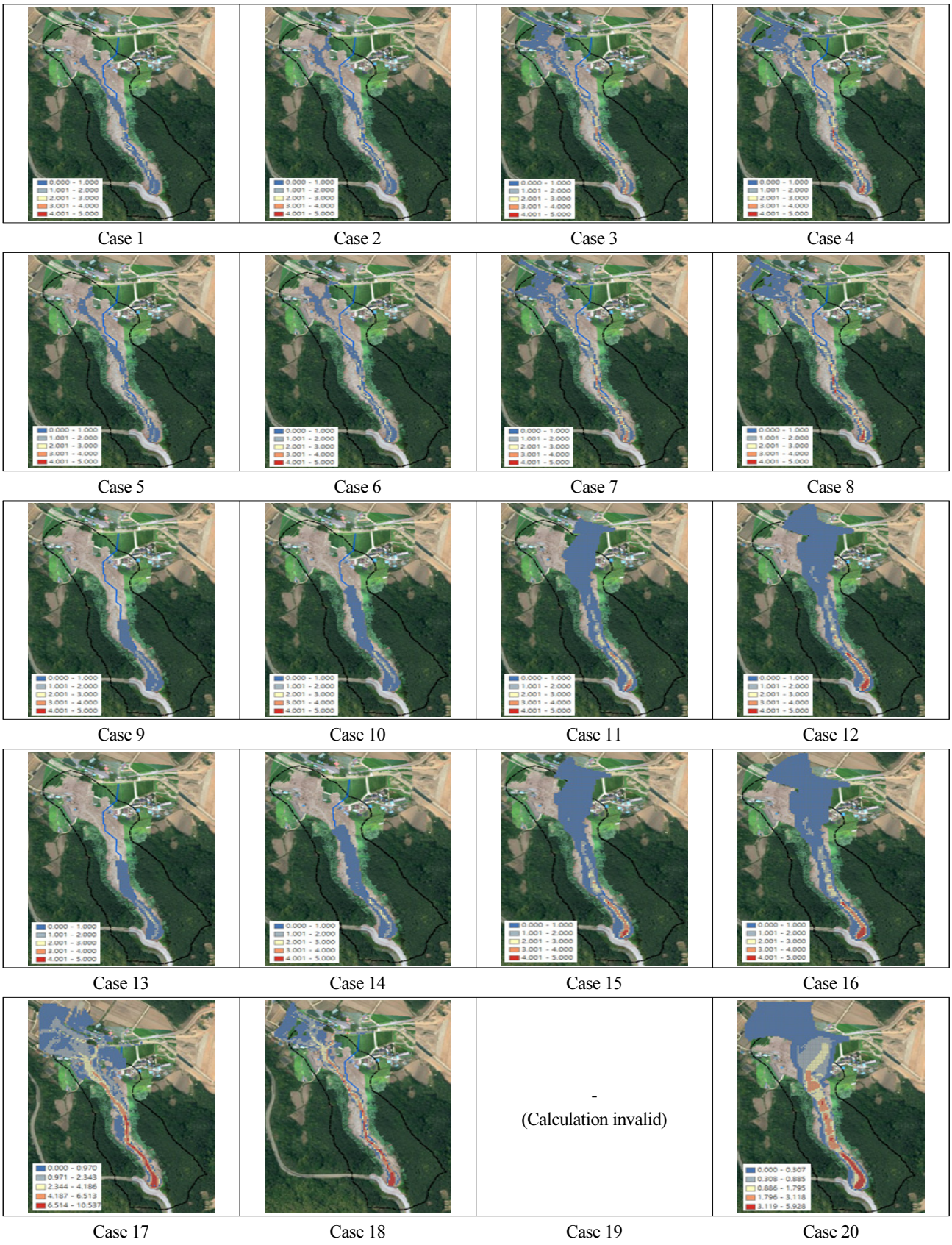

Fig. 6. Flo-2D simulation results for velocity.

Table 2. Flo-2D simulation results

	Debris flow area (m^2)	Maximum flow depth (m)	Mean flow depth (m)	Maximum flow velocity (m/s)	Mean flow velocity (m/s)
Case 1	7,800	0.274	0.084	2.228	0.569
Case 2	9,750	0.976	0.115	2.717	0.640
Case 3	17,675	1.494	0.155	3.997	0.840
Case 4	20,875	1.788	0.193	4.720	0.849
Case 5	8,950	0.311	0.088	2.415	0.586
Case 6	10,625	1.040	0.120	2.679	0.677
Case 7	18,875	1.581	0.163	4.147	0.862
Case 8	22,450	1.889	0.202	4.959	0.868
Case 9	8,250	0.261	0.060	2.144	0.409
Case 10	12,400	0.349	0.078	2.330	0.399
Case 11	32,325	1.393	0.083	4.391	0.514
Case 12	41,850	2.022	0.115	5.175	0.521
Case 13	9,325	0.268	0.062	2.330	0.443
Case 14	13,800	0.398	0.082	2.480	0.408
Case 15	35,800	1.592	0.089	4.750	0.541
Case 16	45,825	2.281	0.120	5.418	0.527
Case 17	61,175	8.328	0.616	10.537	1.607
Case 18	27,425	2.322	0.258	6.505	1.111
Case 19	-	-	-	-	-
Case 20	64,925	1.327	0.128	5.928	0.629

입력조건에 따라 결과값을 비교하기 위하여 해상도의 차이인 DSM과 DEM의 차이와 유량의 크기에 따라 유동심, 유속, 토석류 확산 면적에 대하여 민감도를 분석하였다(Fig. 7). 평균 유동심의 분포는 0.06~0.616 m로 작게 계산되었다. 이러한 이유는 토석류가 흘러내린 모든 지점에서의 평균 유동심을 계산한 값으로써, 넓게 확산되어 유동심이 상대적으로 낮은 퇴적부까지 모두 고려되었기 때문이다. 다시 말해, 토석류의 유하부에서의 유속만을 고려한다면 실제 유동심의 높이와 Flo-2D에서 계산된 유동심의 높이는 비슷할 것으로 예상된다. DSM과 DEM의 차이를 비교하자면 평균 유동 유동심의 토석류의 피크유량이 0~2 m^3/s일 때, 유동심은 평균 0.031 m의 차이를 나타냈고, 토석류의 피크유량이 2~5 m^3/s일 때, 평균 0.076 m의 차이를 나타냈으며, 그 이상일 경우에는 0.13 m의 차이를 나타냈다. 즉, 유량이 증가할수록 유동심도 증가하고, 동시에 고해상도와 저해상도의 지형에 따른 유동심 차이도 높아지는 것으로 나타났다. 이러한 정보를 바탕으로 유역

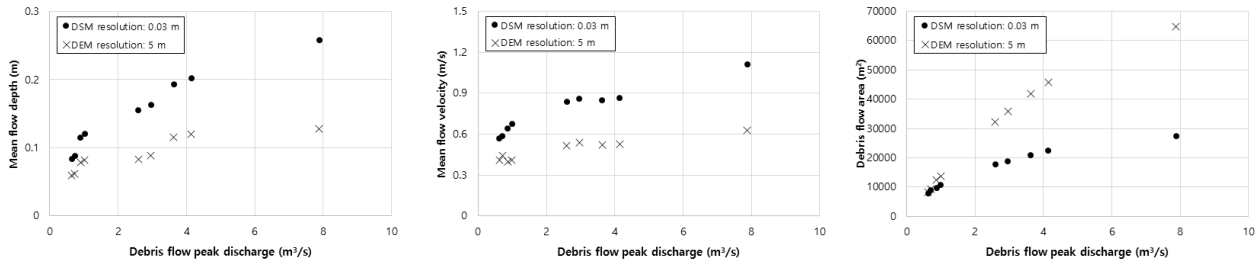

Fig. 7. Results of sensitivity analysis results.

의 크기가 클수록 유출량이 높아지기 때문에 상대적으로 고해상도의 지형정보를 구축하는 것이 실제 유동심과의 오차율을 줄일 수 있다고 추측할 수 있다.

평균 유속의 분포는 0.399 m/s to 1.607 m/s로 나타났으며 실제 유속은 측정되지 않아 정확한 검증은 어려웠다. 보통 실제 토석류의 유속은 규모와 지질조건에 따라 매우 달라지지만, 프루드수 1을 기준으로 고려하였을 때의 유속이 약간 낮게 계산된 것으로 나타났다. 하지만 토석류의 유속에 관한 실측값은 강우와 지반환경에 따라 매우 달라지게되므로 유량의 증가에 따른 유속의 증가는 적절한 결과로 판단될 수 있다. DSM과 DEM의 차이를 비교하자면 평균 유속의 토석류의 피크유량이 0~2 m^3/s일 때, 유속은 평균 0.203 m/s의 차이를 나타냈고, 토석류의 피크유량이 2~5 m^3/s일 때, 평균 0.329 m/s의 차이를 나타냈으며, 그 이상일 경우에는 0.482 m/s의 차이를 나타냈다. 유량이 높아질수록 고해상도와 저해상도의 지형에 따른 유속의 차이가 높아지는 것으로 나타났다.

확산면적의 경우 7,800~64,925 m^2로 나타났으며, 확산면적은 평균 유동심과 평균 유속과는 반대로 DSM보다 DEM에서 더 높게 나타났다. 토석류의 피크유량이 0~2 m^3/s일 때, 유동심은 평균 6,650 m^2의 차이를 나타냈고, 토석류의 피크유량이 2~5 m^3/s일 때, 평균 18,981 m^2의 차이를 나타냈으며, 그 이상일 경우에는 37,500 m^2/s의 차이를 나타냈다.

지형정보와 유량정보의 종합적인 고려를 통해 실제와 가장 유사하게 해석된 결과는 Case 7인 것으로 판단된다. Case 7에서의 토석류 유량은 2.961 m^3/s이고, 이때 사용된 변수는 급격한 산지의 유량 계수인 0.8, 강우강도 52 mm/h, 토석류의 농도 0.3으로 계산되었으며, 사용된 지형정보는 0.03 m의 해상도를 가지는 DSM이다. 이때의 평균 유동심은 0.163 m, 평균 유속은 0.862 m/s, 확산 면적은 18,875 m^2으로 실제 토석류의 정보 보다 작게 계산이 되었지만 이러한 부분은 앞서 기술하였듯이 항복응력과 점성을 고려하면 개선될 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 2020년 8월 곡성 선세리에서 발생한 토석류에 대하여 토석류의 시작되는 붕괴 토사량을 계산하였고 이를 기초로 Flo-2D를 이용하여 토석류의 유량과 지형정보에 따른 유동심, 유속, 확산면적에 대한 민감도 분석을 수행하였다. 지형정보는 1:5,000 수치지도로부터 5 m 격자 크기인 해상도와 사진측량으로부터 0.03 m 격자 크기인 해상도를 고려하였고, 유량의 경우 유량계수, 강우강도, 토석류의 농도를 이용한 합리식과 선행연구의 경험식을 고려하였다. 유량이 증가할수록 유속, 유동심, 확산면적이 증가하는 결과가 도출되었고, 고해상도와 저해상도의 결과 차이가 높아지는 것으로 나타났다. 또한 고해상도일 경우에는 실제 토석류의 흐름 방향을 그대로 재현했지만, 저해상도일 경우에는 확산 방향이 실제와는 다르게 계산되었다. 이러한 정보로부터 토석류의 발생 유역이 크고 유량이 클수록 고해상도의 지형정보를 적용하는 것이 토석류 확산예측의 오차를 줄일 수 있으며, 특히 토석류 퇴적부지역에 적용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 가장 적절하게 계산되었다고 판단한 Case 7의 경우에는 실제의 유량, 유속, 확산면적보다 작게 계산되었으나, 이러한 부분은 항복응력과 점성과 같은 지질정보의 보완을 통해 개선할 수 있을 것으로 판단된다. 추가적으로 사진측량을 통해 고해상도 지형정보를 생성하는 과정에서 도출한 토사의 붕괴량을 정확하게 측정하였기 때문에 우리나라에서 흔하게 발생하는 사면붕괴 및 산사태의 토석류 전이에 관한 연구 기초자료로써 활용될 수 있다.

사사

이 논문은 행정안전부 기후변화대응 AI기반 풍수해 위험도 예측기술 개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022-MOIS61-001).

References

Chae, B.G., Kim, W.Y., Cho, Y.C., Kim, K.S., Lee, C.O., Choi, Y.S., 2004, Development of a logistic regression model for probabilistic prediction of debris flow, The Journal of Engineering Geology, 14(2), 211-222 (in Korean with English abstract).

Choi, J.H., Choi, B.J., Kim, N.G., Lee, C.W., Seo, J.P., Jun, B.H., 2021, Estimation of potential risk and numerical simulations of landslide disaster based on UAV photogrammetry, Journal of Civil and Environmental Engineering Research, 41(6), 675-686 (in Korean with English abstract).

Di, B., Zhang, H., Liu, Y., Li, J., Chen, N., Stamatopoulos, C.A., Luo, Y., Zhan, Y., 2019, Assessing susceptibility of debris flow in southwest china using gradient boosting machine, Nature, 9, 1-12, Article number: 122532.

Flo-2D, 2009, Reference manual, Retrieved from https://flo-2d.com/product/modeling-theory/.

Jitousono, T., Shimokawa, E., Tsuchiya, S., 1996, Debris flow following the 1994 eruption with pyroclastic flows in Merapi volcano, Indonesia, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 48, 109-116.

Jun, B.H., Jang, C.D., Kim, N.G., 2010, Analysis of erosion and deposition by debris-flow with LiDAR, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 13(2), 54-63 (in Korean with English abstract).

Kim, K.N., Jang, S.J., Lee, K.Y., Seo, G.B., Kim, B.S., Chun, K.W., 2015, Prediction of the debris flow-prone area in the hilly district within urban, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 15(3), 141-146 (in Korean with English abstract).

Kim, M.I., Kim, N.G., 2021, Analysis of debris flow reduction effect of check dam types considering the mountain stream shape: A case study of 2016 debris flow hazard in Ulleung-do Island, South Korea, Advances in Civil Engineering, 2021, 1-12, Article ID: 8899368.

Kim, P.G., Han, K.Y., 2017, Numerical modeling for the detection of debris flow using detailed soil map and GIS, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 37(1), 43-59 (in Korean with English abstract).

Kim, S.E., Paik, J.C., Kim, K.S., 2013, Run-out modeling of debris flows in Mt. Umyeon using FLO-2D, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 33(3), 965-974 (in Korean with English abstract).

Lee, H.N., Kim, G.H., 2019, Flow-R simulation of debris flow on Mt. Woomyeon, Journal of Korean Society for Geospatial Information Science, 27(6), 61-71 (in Korean with English abstract).

Li, Y., Chen, W., Rezaie, F., Rahmati, O., Moghaddam, D.D., Tiefenbacher, J., Panahi, M., Lee, M.J., Kulakowski, D., Bui, D.T., Lee, S., 2022, Debris flows modeling using geo-environmental factors: developing hybridized deep-learning algorithms, Geocarto International, 37(17), 5150-5173.

Malgorzata, C., Fabian, W., Michaela, W., Zhen, Z., Brian, W.M., Clement, H., 2020, Machine learning improves debris flow warning, Geophysical Research Letters, 48(3), 1-11.

Okuda, S., Suwa, H., 1981, Some relationships between debris flow motion and micro-topography for the Kamikamihori Fan, North Japan Alps, In: Burt, T.P., Walling, D.E. (Eds.), Catchment Experiments in Fluvial Geomorphology, Geo-Books, Norwick, UK, 447-464.

Ou, G., Kobashi, S., Mizuyama, T., 1991, Prediction of debris flow peak discharge, Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering, 44(4), 24-29 (in Japanese with English abstract).

Rickenmann, D., 1999, Empirical relationships for debris flows, Natural Hazards, 19, 47-77.

Rickenmann, D., Zimmermann, M., 1993, The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis, Geomorphology, 8, 175-189.

Song, C.H., Lee, J.S., Kim, Y.T., 2021, Predicting the initiation area of a debris flow using geomorphological characteristics and a physically-based model, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, 21(2), 137-147 (in Korean with English abstract).

Tak, W.J., Jeon, K.W., Jeon, B.H., Lee, H.J., 2015, Comparsion between RAMMS and FLO-2D through danaged by debris flow analysis, Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference, Goseong, 112.