

산지지역 개발에 의한 산사태 위험 분석

김남균¹ · 박윤성^{2*}

¹산림조합중앙회 산림종합기술본부 산림공학연구소 선임연구원, ²산림조합중앙회 산림종합기술본부 산림공학연구소 책임연구원

Landslide Risk Analysis due to Development of Mountain Area

Namgyun Kim¹ and Yunseong Park^{2*}

¹Senior Researcher, Forest Technology Division, National Forestry Cooperative Federation

²Principal Researcher, Forest Technology Division, National Forestry Cooperative Federation

요약

본 연구에서는 산지 지역의 개발 예정지에 대하여 산사태의 발생 위험성을 분석 하였다. 개발 예정지의 위치를 고려하여 사면에서의 위험성과 계류에서의 위험성을 구분하여 현장조사를 수행하였고, 산사태의 발생 위험성 평가 기준은 산림청고시 제2023-10호 산사태 발생 우려지역 조사 및 취약지역 지정·관리 지침의 평가표를 이용하였다. 사면13개소와 계류 11개소에 대하여 각각 위험도를 평가한 결과 사면 2개소, 계류 2개소에서 위험한 것으로 조사되었다. 위험한곳으로 조사된 지역에 대하여 토석류 피해가 발생할 것으로 예상되어 수치시뮬레이션을 이용하여 토석류 확산 범위를 분석하였다. 예상되는 토석류는 유역 하부에 위치한 도로 및 건물에 영향이 있을 것으로 시뮬레이션되어, 피해를 최소화 하기 위한 재해방지시설이 필요할 것으로 판단하였다. 이러한 정보는 산지 개발을 수행하기 전 사전 재해영향성 검토에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

핵심용어: 산사태, 위험도 평가, 현장조사, 산지개발

ABSTRACT

In this study, the risk of landslides was analyzed for planned development sites in mountainous areas. Field survey was conducted on the research area with the slope and valley site. The criteria for evaluating the risk of landslides in the field survey were based on the risk assessment table of the Korea Forest Service Notice No. 2023-10. The research area has 13 slopes and 11 valleys. As a result of evaluating the risk area, two slopes and two valley were found to be dangerous sites in each. Numerical simulation was performed on the investigated risk areas to predict the spread of damage. The debris flow was simulated to have an affect on roads and buildings located in the lower part of the basin, and it was determined that a disaster prevention facility was necessary to minimize damage. This information can be used to determine the impact of disasters before carrying out mountain development.

Keywords: Landslide, Risk assessment, Field survey, Mountain development

*Corresponding author: Yunseong Park, gomttangee@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2600-796X>

Received: 11 December 2023, Revised: 19 December 2023, Accepted: 21 December 2023



1. 서론

최근 10년간 산사태 발생에 의한 피해 면적은 68.02 km², 인명피해는 약 60명, 복구비는 약 3,400억 원으로 막대한 재산 및 인명 피해가 발생한 것으로 보고되었다(KFS, 2023). 최근 산사태의 발생 원인은 대표적으로 기상환경의 변화와 산림환경의 변화를 꼽을 수 있다. 기상청에서 발간한 ‘한국 기후변화 평가보고서 2020’에 따르면 여름철 열대야의 발생 증가, 겨울과 봄 가뭄은 심해지고 있지만 집중호우의 증가, 한반도 주변의 태풍활동은 빈도와 강도 모두 증가하였음을 분석하였고, 관계부처 합동으로 발간한 ‘2022년 이상기후 보고서’에서는 강수량과 관련하여 수원시 6월 30일 일 강수량 285 mm 역대 1위, 서산시 6월 29일 1시간 최다 강수량 105.4 mm 역대 1위, 부여군 8월 14일 1시간 최다 강수량 110.6 mm 역대 1위, 포항시 9월 6일 일 강수량 342.4 mm 역대 2위, 영덕군 11월 22일 일 강수량 146.7 mm 역대 1위 등 지역별로 역대급 호우 기록을 보고하였다(KMA, 2023). 여름철 집중 강수량 뿐만 아니라 국지성 집중호우의 발생이 증가하고 일별 강수량이 증가하는 추세를 보임에 따라 산사태의 발생 가능성이 높아지고 예측하기 더욱 어려워지고 있다. 기상환경과 더불어 산림환경의 변화 또한 산사태의 발생에 영향을 준다. 산지전용, 임도, 급경사지, 도로 비탈면, 태양광 등 개발에 따라 대규모 절토나 성토가 발생하여 집수면 적, 산지형태 등의 지형적인 변화가 발생하고 이는 지반의 응력의 변화를 일으켜 사면을 불안정하게 하는 요인이 된다. 따라서 산사태의 발생가능성이 높아지기 때문에 이에 대한 대책을 수립할 필요가 있다.

산지의 경영을 위한 작업로 개설이나 시설물의 설치를 위한 개발 등에 따라 산사태의 위험성을 평가하기 위한 연구들이 진행되고 있다. 산지 전용 기준을 제시하기 위한 사면의 유형이나 경사 등에 따른 관리 방안 연구(Kim and Kwon, 2014; Choi et al., 2018)가 주로 선행되었고, Sassa et al.(2004)은 인구가 밀집된 도시지역의 지진으로 인한 산사태 위험도를 평가, Sidle et al.(2014)은 산악 도로 시스템의 확장에 따른 토사침식량을 계산하여 산사태 및 토사재해의 위험성 증가 검증, Chuang and Shiu(2018)는 산사태와 산지 개발의 관계성을 로지스틱 회귀분석을 통해 집수구역의 관리를 통해 재해 예방에 관한 참고자료를 제공, Li et al.(2020)은 Three Gorges 지역에 대하여 인간의 활동이 산사태의 취약성에 미치는 영향에 대하여 다섯가지의 관점을 제시하며 강우와 인간활동의 결합작용에 의한 산사태 취약성의 감소를 언급하는 등 산림환경의 변화에 따른 산사태의 위험성 또는 취약성 등에 대한 평가들이 주로 사례연구를 통하여 수행되고 있다.

본 연구에서는 산지 지역의 개발 예정지에 대하여 산사태와 토석류의 발생에 대하여 현장조사를 수행하여 위험성을 판단하였다. 위험성을 판단한 기준은 산림 고시 제2023-10호 ‘산사태발생 우려지역 조사 및 취약지역 지정·관리 지침’의 평가표를 이용하였고, 위험한곳으로 조사된 지점에 대하여 수치시물레이션을 이용한 토석류 위험도 평가를 수행하였다. 사면의 붕괴에 따라 토석류로 발전하여 산지 개발 예정지의 하부에 영향을 미치는 확산 범위를 파악하여 재해 예방시설의 필요성 여부를 판단하였다.

2. 본론

2.1 연구지역 및 위험 분석

연구지역은 산지 능선을 따라 개발이 진행될 예정지로 세 개의 구역으로 구성되어 있다(Fig. 1). 개발이 진행되는 지점을 중심으로 사면과 계류에 대한 위험성 분석을 수행하였다. GIS를 이용하여 구역단위별로 산사태위험지도, 토석류 위험지도를 참고하여 위험정도를 파악하였다. 그리고 ‘산사태 발생 우려지역 조사 및 취약지역 지정·관리 지침’에 고시되어 있는 산사태 발생 우려지역 기초조사 평가표를 이용하여 현장조사를 수행 후, 위험성을 판단하였다. 위험성이 있다고 판단되는 구역의 사면이나 계류에 대하여 적절한 재해방지시설의 계획을 제시하였다.

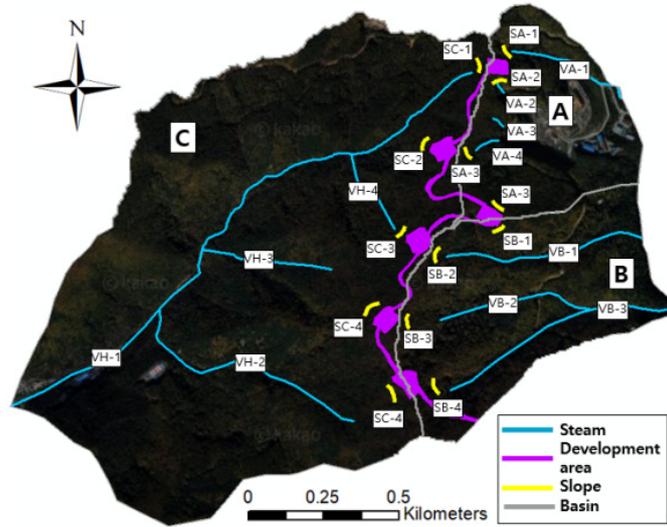


Fig. 1. Research areas including field survey of slope and steam

Fig. 2는 연구 순서를 나타낸다. 개발지역에 대하여 산지 재해의 위험성을 평가하기 위해 선정된 연구지역의 산사태위험 지도, 토석류 위험지도 등 정보를 수집하고, 등고선을 이용하여 유역분석을 수행 후, 사면과 계류의 위치를 추출하여 대략적인 위험성을 판단한다. 추출된 사면과 계류에 대하여 현장조사를 수행하여 위험하다고 판단되는 지역에 대하여 수치시물레이션을 수행후, 재해를 저감할 수 있는 방법을 제시하고자 하였다.

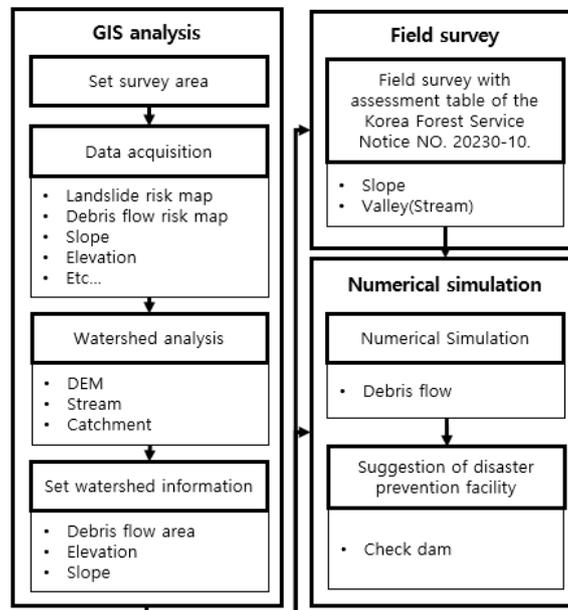


Fig. 2. Research flow chart

Fig. 3은 연구지역의 산사태 위험지도, 토석류 위험지도, 경사, 고도를 나타낸다. 3개의 유역에서 산사태 위험등급이 1~5 등급으로 다양하게 분포하는 것으로 나타났고 등급이 낮을수록 산사태의 발생 위험도가 높은 것을 의미한다. A유역의 면적은 309,596 m²이고, 산사태 위험 1등급의 면적은 13,311 m²으로 전체 면적의 4.3%로 나타났다. B유역의 면적은 461,137 m²이고, 산사태 위험 1등급의 면적은 18,403 m²으로 전체 면적의 4.0%로 나타났다. C유역의 면적은 1,704,358 m²이고 A, B유

역보다 상대적으로 유역이 크다. 산사태 위험 1등급의 면적은 149,232 m²으로 전체 면적의 8.8%로 나타나 A, B유역보다 산사태의 발생 위험도의 비율이 높은 것으로 나타났다. 토석류위험지도 확인결과 A, B유역에서 토석류의 확산이 나타나지 않았고, C유역에서 유출구 지점을 중심으로 토석류의 확산이 나타나 상시흐름이 없는 계류형태로써 분석되었다. 토석류가 발생시 확산지역은 주로 농경지와 지방도로에 영향을 주는 것으로 분석되었다. 연구지역 전체의 평균경사는 22.9°로 분석되었고, 최대 경사는 69.6°, 최소경사는 0°로 분석되었다. 10~40°사이의 분포가 87%로 대부분의 경사를 차지하였다. A유역의 평균 경사는 22.4°, B유역의 평균 경사는 23.9°, C유역의 평균경사는 22.3°로 유역별 평균경사는 비슷한 것으로 분석되었다. 표고는 평균 890.6 m이고 최대 고도는 1,130 m, 최소 고도는 690.1 m로 분석되었다. 개발되는 예정지는 약 900~1,100 m 사이의 표고에 위치하고 있다. A유역의 평균 고도는 897.2 m, B유역의 평균 고도는 949.1 m, C유역의 평균 고도는 869.4 m로 분석되었다. Table 1은 이러한 정보를 종합적으로 보여주며, C유역이 A, B유역보다는 상대적으로 위험성이 높은 것으로 판단되었다. 지도상으로는 산사태나 토석류의 위험성을 판단하기에는 정보가 부족하기 때문에 현장 조사를 통하여 실제 위험한 정도를 파악하고자 하였다.

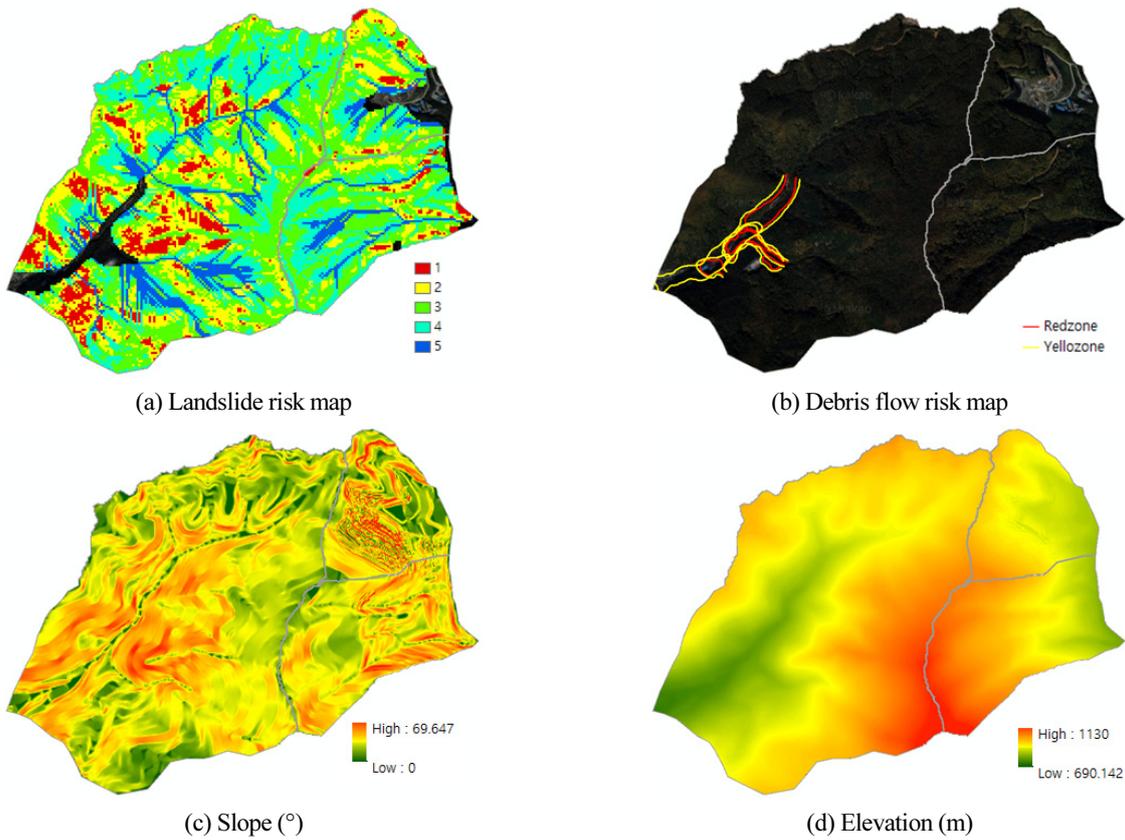


Fig. 3. Basin information

Table 1. Basin information of research area

Basin	A	B	C
Area (m ²)	309,596	461,137	1,704,358
1 grade landslide risk area (m ²)	13,311	18,403	149,232
Debris flow risk	X	X	O
Mean slope (°)	22.4	23.9	22.3
Mean elevation (m)	897.2	949.1	869.4

2.2 현장조사를 통한 위험성 평가

지도상으로 파악한 위험정보를 바탕으로 현장조사를 통해 실제 산사태나 토석류가 발생할 가능성이 있는 위험지역을 조사하였고, 평가방법은 ‘산지관리법’에 근거하여 ‘산사태 발생 우려지역 조사 및 취약지역 지정·관리 지침’의 시행규칙에 명시된 ‘산사태 발생 우려지역 기초, 실태조사 평가표’를 이용하였다. 평가표에는 보호대상, 경사, 집수면적 사면형상, 임상, 위험요인 등이 있으며 주요 조사내용은 산사태 발생 우려지역의 위치와 규모, 유형별 분류, 토사의 유출이나 붕괴, 침식 정도 등을 조사한다. A유역은 4개의 사면과 4개의 계류가 있고, B유역은 4개의 사면과 3개의 계류가 있으며, C유역은 5개의 사면과 4개의 계류가 있다.

각각의 사면과 계류에 대하여 코드를 분류하여 점수를 산정하였고, 위험요소를 파악하였다. 60점 이상인 지역에 대하여 정밀하게 조사를 수행하였고 위험 수준에 따라 A, B, C등급으로 구분하였다. A등급은 정밀조사 기기준 67점 이상 100점이 하로서 위험하여 집중관리대상으로 구조적, 비구조적 대책이 필요하고 B등급은 34점 이상 67점 이하로서 잠재적인 위험으로 필요시 구조적 대책 적용, C등급은 34점 미만으로 위험성이 낮아 일반산지로 관리한다. Table 2는 기초조사 점수 결과를 보여주고 기초조사 평가 결과 60점 이상인 지점으로 정밀 조사를 수행하여 등급으로 구분하였다. 평가결과 A유역은 점수가 모두 60점 이하로 위험한 지역은 없는 것으로 조사되었고 B유역은 사면 2개소와 계류 3개소가 60점 이상으로 조사되었다. 사면은 위험하다고 조사된 2개소 모두 C등급으로 분류되어 위험성이 낮은 일반산지로 관리하는 것으로 판단하였고 계류는

Table 2. Field survey results

Basin	Code (S: Slope, V: Valley)	Score	Grade
A	SA-1	51	-
	SA-2	26	-
	SA-3	26	-
	SA-4	58	-
	VA-1	59	-
	VA-2	42	-
	VA-3	35	-
	VA-4	39	-
B	SB-1	48	-
	SB-2	47	-
	SB-3	71	C
	SB-4	71	C
	VB-1	61	B
	VB-2	72	A
	VB-3	71	A
C	SC-1	54	-
	SC-2	43	-
	SC-3	50	-
	SC-4	54	-
	SC-5	52	-
	VC-1	64	C
	VC-2	75	C
	VC-3	59	-
VC-4	40	-	

A등급, B등급으로 분류되어 위험한 것으로 판단되었다. C구역은 사면은 모두 60점 이하로 조사되었고, 계류의 2개소는 C등급으로 분류되어 일반산지로 관리하는 것으로 판단하였다.

A등급으로 조사된 VB-2, VB-3의 경우 계류 전체에 침식된 토사가 퇴적되어있고 전석들이 분포하여 강우 발생시 토사와 전석들이 하부로 쓸려 내려올 가능성이 높은 상태로 조사되었다. 또한 노출된 기반암은 절리가 심하여 붕괴될 수 있는 가능성이 있고 일부 구간엔 침식과 세굴이 관찰되어 위험한 상태를 나타내었다. VB-1의 경우 계류 내 일부 구간의 침식과 붕괴가 관찰되었으나 돌망태 기슭막이가 기 설치되어 있고, 사방댐이 설치되어 있어서 B등급으로 분류되었다. 사방댐의 설치로 안전한 것으로 평가 될 수 있으나, 퇴적물이 만사인 상태로 유출되는 토사를 모두 포착하기는 어렵고 계류의 경사 완화와 강우시 잠재적으로 토석류의 포착 공간 역할과 속도완화 기능을 가지고 있는 상태이기 때문에 위험요소가 없는 상태로 분류되지 않았다. C등급으로 분류된 SB-3, SB-4, VC-1, VC-2의 경우 유실이나 붕괴의 흔적이 관찰되지 않아 취약구간은 없는 것으로 조사되었고, 암반의 노두가 직접적으로 관찰되는 부분은 매우 국소적으로 조사되었다. 또한, 계류에는 사방댐이 설치되어 있어 하류지역의 피해는 거의 없을 것으로 판단하였다(Fig. 4).

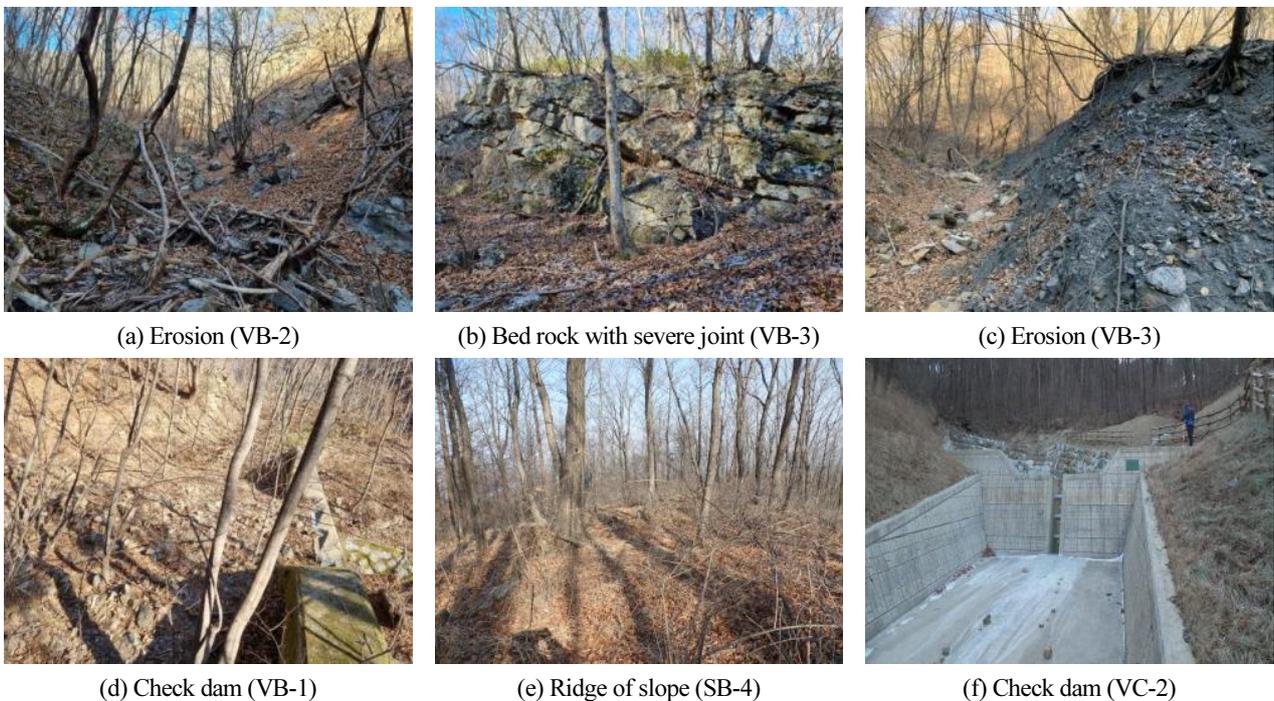


Fig. 4. Field survey results photo

2.3 안정해석과 재해 예방시설 설치 여부 검토

A등급으로 분류되어 위험한 지역으로 판단되는 VA-2와 VA-3 계류에 대하여 수치 시뮬레이션을 수행하였다. Flo-2D를 이용하여 유동심, 유속을 산정하였고 확산 범위를 추정하여 피해 정도를 예측하였다. 유출구의 침투유량을 산정하는 합리식을 이용하여 토석류의 유량을 적용하였고, 강우강도는 100년 빈도에 10분 지속시간 값인 96.4 mm를 적용하였다. 또한 계류 지역의 토질정보를 수집하여 점성은 25.26 g/cm·s, 항복응력은 97.29 N/mm²을 적용하였다. VA-2와 VA-3은 서로 합류되는 계류로써, 두 계류 모두 토석류가 발생한다고 가정하였으며 침투 토석류량은 2.342 m³/s, 도달시간은 240 s로 산정하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 결과 평균 유동심 0.606 m, 평균 유속 0.378 m/s의 토석류가 나타나며 유출지점을 지나 도로까지 확산되는 것

으로 분석되었다. 유하부의 중간지점에는 임도가 위치하고 있고, 하류의 건물 앞 계류까지 토석류가 흘러들어 토석류로 인한 피해가 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 유출되는 토사에 따른 도로 및 건물의 영향을 최소화하기 위하여 재해방지 시설이 필요할 것으로 분석되었다(Fig. 5).

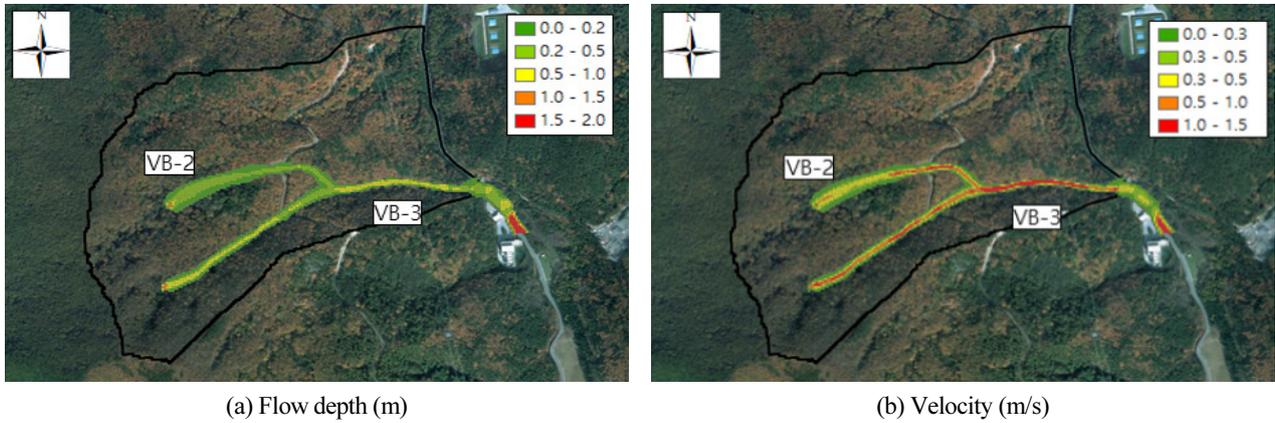


Fig. 5. Numerical simulation results (VA-2, VA-3)

토석류로 인한 건물과 도로의 피해가 예상됨에 따라 재해방지시설인 사방댐을 설치하는 것이 필요하다고 판단하였다. 사방댐의 합리적인 위치, 규모, 형식을 결정하기 위해서는 일반적으로 계상의 양안에 암반이 있고, 상류부의 계류 폭이 넓고 경사가 완만하여 저사효과가 큰 곳, 저류의 합류점 부근, 작업로등이 시설 가능하여 중장비의 진출이 용이한 곳 등을 고려해야 한다. 이러한 점을 고려하였을 때, 중장비의 진입이 용이하고 저사효과가 높은 경사가 완만한 지역인 유출구 지점에 사방댐을 설치하는 것이 합류지에 설치하는 것보다 효과적인 것으로 판단하였다. 사방댐의 규모는 토사의 유출량을 산정하는 수정 범용 토양손실 공식(RUSLE)을 활용하여 적용하였으며 불투수 지역은 전체 유역 면적의 2~4%, 계류의 길이 818 m와 평균 폭 2 m을 적용하여 토사의 유출량은 $1,725 \text{ m}^3$ 으로 계산하였다. 이에 따라 유출되는 토사의 양보다 저사의 양을 높게 하기 위한 사방댐으로써, 상장은 15 m, 높이 4 m로 적용 할 시, 최대 저사량은 $2,057 \text{ m}^3$ 으로 계산되어 토석류로 인한 피해를 막아줄 수 있을 것으로 분석하였다(Fig. 6).

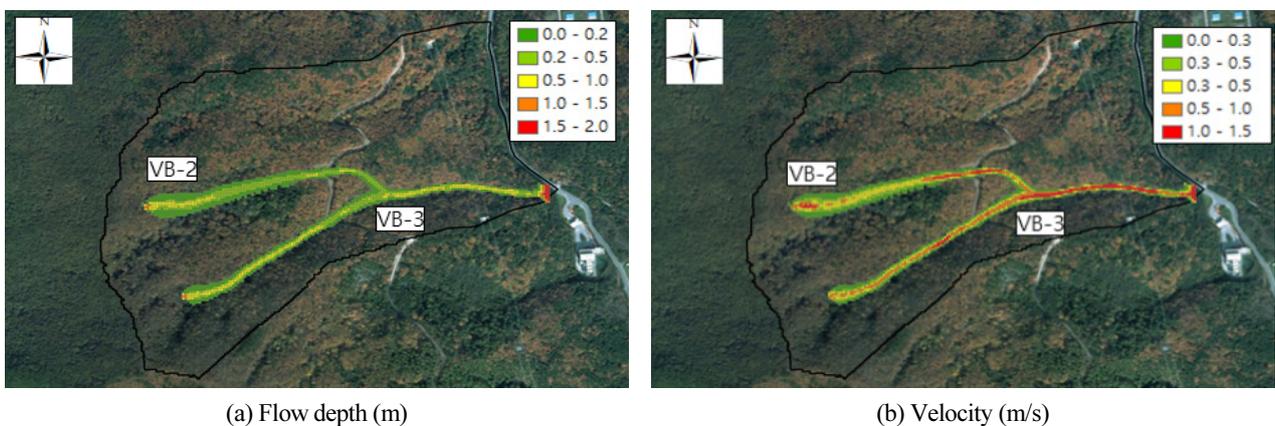


Fig. 6. Numerical simulation results with check dam

3. 결론

본 연구에서는 산지 지역의 개발 예정지에 대하여 산사태위험지도, 토석류위험지도 등 관련 지도를 이용하여 위험성을 판단하고, 현장조사를 통해 평가표를 이용한 정량적인 위험 분석을 수행하였으며, 위험하다고 판단한 지역에 대하여 수치시물레이션을 이용한 피해 범위의 추정과 이를 대비하기 위한 재해예방시설인 사방댐의 설치에 따른 예상 피해 지역의 보호여부를 판단하였다. 사면13개소와 계류 11개소에 대하여 각각 위험도를 평가하였고, 계류의 2개소에서 토석류의 발생 가능성이 높았으며 하류지역에 위치한 건물과 도로의 보호를 위한 사방댐의 위치와 규모를 산정하였다. 이러한 일련의 과정들은 산지 지역의 개발 예정지에 대하여 위험성을 판단하고 재해예방시설의 설치를 통한 피해 추정지에 대한 보호를 정량적으로 평가할 수 있다. 일반적으로 대규모의 산지 개발이 이루어질 경우 법적으로 사전재해영향성검토를 수행하게 되는데, 이러한 업무 수행에 본 연구의 프로세스가 도움이 될 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgments

This research was supported by the program of Research Program to Solve Urgent Safety Issue (2022M3E9A109753512) through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Korean government [Ministry of Science and ICT (MSIT)].

References

- Choi, Jung-Sun, Doo-Ahn Kwak, Soon-Duck Kwon, and Seung-A Baek. (2018). Study on Applicability of Slope Types to Permission Standard for Forestland Use Conversion. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*. 21(4): 145-157.
- Chuang, Yung-Chung and Yi-Shiang Shiu. (2018). Relationship between Landslides and Mountain Development—Integrating Geospatial Statistics and a New Long-Term Database. *Science of the Total Environment*. 622-623: 1265-1276.
- Korea Meteorological Administration. (2023). 2022 Abnormal Climate Report. Daejeon: KMA.
- Kim, Won-Kyung and Soon-Duk Kwon. (2014). Comparison of Average Slope Measurement Methods to Evaluate the Feasibility of Forest Land Conversion. *Journal of Agriculture & Life Science*. 48(1): 49-58.
- Korea Forest Service. (2023). Landslide Information System. Daejeon: KFS.
- Li, Y., X. Wang, and H. Mao. (2020). Influence of Human Activity on Landslide Susceptibility Development in the Three Gorges Area. *Natural Hazards*. 104: 2115-2151.
- Sassa, K., G. Wang, H. Fukuoka, F. Wang, T. Ochiai, M. Sugiyama, and T. Sekiguchi. (2004). Landslide Risk Evaluation and Hazard Zoning for Rapid and Long-Travel Landslides in Urban Development Areas. *Landslides*. 1: 221-235.
- Sidle, R. C., M. Ghestem, and A. Stokes. (2014). Epic Landslide Erosion from Mountain Roads in Yunnan, China - Challenges for Sustainable Development. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 14(11): 3093-3104.

Korean References Translated from the English

- 기상청 (2023). 2022년 이상기후보고서. 대전: 기상청.
- 김원경, 권순덕 (2014). 산지전용타당성평가기준 개선을 위한 평균경사도 분석방법 비교. *농업생명과학연구*. 48(1): 49-58.
- 산림청 (2023). 산사태정보시스템. 대전: 산림청.
- 최정선, 곽두안, 권순덕, 백승아 (2018). 산지의 사면유형을 고려한 산지전용허가기준에 관한 연구. *한국지리정보학회지*. 21(4): 145-157.