

산지유역 기반의 토석류 취약성 분석을 통한 재해방지 계획수립 연구

김만일* · 이문세 · 홍관표
산림조합중앙회 산림공학연구소

Disaster Prevention Planning through Analysis of Debris Flow Vulnerability Based on Mountain Basin Features

Man-Il Kim*, Moon-Se Lee, and Kwan-Pyo Hong

Forest Engineering Research Institute, National Forestry Cooperative Federation

Received 6 November 2017; received in revised form 28 November 2017; accepted 1 December 2017

최근 10년간(2005~2014) 산지재해 발생현황을 분석해 보면 산지재해 발생 총면적은 4,393 ha, 연평균 인명피해는 7명, 연평균 산지재해 복구비는 798억원으로 사회·경제적 피해가 발생하였다. 산지재해는 1차적으로 산지사면에서 산사태가 발생되어 2차적으로 계류를 따라 토석류로 이동 및 확산되면서 산지 하부지역의 시설지와 주거지에 피해를 발생시킨다. 이러한 산지재해의 발생원인은 자연적인 요인으로 태풍, 국지성 강우 등이 있으며, 인위적인 요인으로 산지 개발로 인한 산지지반의 훼손 등이 있다. 본 연구에서는 연구지역을 3개 유역으로 구획하고, 산지유역의 지형, 지질, 산림 특성을 고려하여 FLO-2D 분석 결과를 반영한 토석류 취약성 평가 방안을 제시하였다. 또한 잠재적 산지재해에 대한 조사, 분석, 평가 방안에 따라 산지사면 및 계류에 대한 취약성 분석을 통해 잠재적 산지재해의 발생 위험유역을 평가하였다. 이를 통해 산림유역 기반의 종합적인 재해방지시설 계획의 수립 방안을 제시하였다.

주요어: 산지재해, 산지유역, 취약성 분석, 재해방지계획

Mountain disasters in Korea have caused massive social and economic damage. During the period 2005-2014 there has been an annual average of 7 deaths and disaster recovery costs of 79.8 billion won in the country's 4393 ha of mountainous areas. The primary mountain disasters are landslides on mountain slopes, and secondary debris flows can spread along mountain streams, damaging facilities and settlements in lower areas. Typhoons and local rainfall can cause such disasters, while anthropogenic factors include development that damages the mountainous terrain. The study area was divided into three basins. For each basin, a debris flow vulnerability assessment method was proposed considering FLO-2D analysis results and the local topography, geology, and forestation. To establish an in situ investigation, analysis, and evaluation plan for potential mountain disasters, we selected mountain basins that are potentially vulnerable to mountain disasters through analysis of their mountain slopes and streams. This work suggests the establishment of a comprehensive plan for disaster prevention based on a mountain basin feature.

Key words: mountain disaster, mountain basin, vulnerability analysis, disaster prevention plan

*Corresponding author: mikim@nfcf.or.kr

© 2017, 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/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

산지를 중심으로 발생하는 산사태 및 토석류는 1차적으로 자연적 또는 인위적인 원인으로 산지가 일시에 붕괴되고, 붕괴 유실물 등이 산지 사면 및 산지 계류에 적치된 이후 집중호우 등에 의해 2차적으로 퇴적된 유실물 등이 계류를 따라 유하하는 재해 유형이다(Lee et al., 2014; Takahashi, 2014; Lee et al., 2015). 이와 같이 산사태 발생의 자연적인 요인으로는 태풍, 국지성 호우, 기후 변화에 따른 동결 수축, 지진 등에 의해 발생하며, 인위적인 요인으로는 산지 전용에 따른 산림 훼손에 의해 많이 발생하는 것으로 알려져 있다.

Fig. 1과 같이 최근 10년간('05~'14) 산사태 발생에 의한 피해 면적은 총 4,394ha, 연평균 인명 피해는 7명, 연평균 복구비는 798억원으로 막대한 재산 및 인명 손실이 발생한 것으로 보고되었다(Korea Forest Service, 2015a). 여기서, 2006년에는 태풍 에위니아로 인해 40명의 인명피해와 2,481명의 이재민이 발생되었으며, 2011년 발생한 국지성 집중호우로 강원도 춘천 산사태에서 인명피해 13명, 서울시 우면산 산사태에서는 인명피해 18명이 발생되면서 막대한 인명 및 재산 피해가 발생하였다.

산림의 면적이 국토의 약 63.7% 인 대한민국의 특성상, 도로, 휴양림, 주거지 등의 건설을 위해서는 산림 개발이 불가피한 상황이다. 현재 산림 개발로 인한 산지 전용면적은 '08년 13,739 ha → '10년 11,851 ha → '12년 7,753 ha로 '08년 이후 통계치로는 감소 추세를 보이고 있으나, 향후 산지 내 신규 대규모 시설지(풍력 및 태양광 발전시설 등)가 지속적으로 개발이 이루어질 경우 산지전용 면적은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.

따라서 현재 산림청에서는 “산지관리법 시행규칙” 개정을 통해 산지전용에 따른 허가기준을 강화하였으며, 재해 위험성 평가를 통해 안정대책 마련 후 산지전용허가를 받을 수 있도록 하고 있다.

산지전용 및 산지일시사용에 대해서는 “산지관리법” 제2조에서 명시하고 있으며, 재해방지, 수원보호, 자연생태계 보전, 자연경관 보전 등을 목적으로 자연친화적 방법을 적용하도록 제3조에 명시되어 있다. 산지전용타당성조사(산지관리법 제18조의2)에서 전용 대상지에 대해서만 조사를 실시토록 되어 있다. 즉, 산지 내 모든 개발행위에 대해서는 다양한 잠재적 재해에 적극 대처토록 하고 있으나, 이러한 산지재해 평가에 대한 구체적인 내용은 미흡한 실정이다(Kim et al., 2011).

산지 내 대규모 시설지가 건설될 경우에는 필연적으로 대규모 절토 및 성토사면이 조성됨에 따라 산지지형 변화가 발생하여 지반 내 응력의 변화를 초래하여 잠재적인 산사태 및 토석류 발생 가능성이 증가되기도 한다(Kim et al., 2017). 최근에는 절토 및 성토사면, 채석장 개발, 군부대 진지구축 등 인위적인 요인 등으로 인해 산지재해가 대형화되는 추세이다. 특히, 국내에서 발생하는 산사태 및 토석류의 발생유형은 대부분이 이동속도가 빠른 쇄설성 유동형으로 발생해 다수의 재산 및 인명피해가 발생하고 있다(Choi and Paik, 2012; Jang et al., 2017). 실제로 산사태 및 토석류로 인한 인명피해는 풍수재해로 발생하는 인명피해의 30% 이상을 차지하고 있다.

연구지역에 속하는 영남지역은 산사태 발생건수가 1,234건으로 전체의 34% 가량으로 중부지역에 이어 두 번째로 높은 발생건수로써 산사태의 고위험 지역에 속한다(Korea Forest Service, 2015a). 산지 내 대규모 시설지 조성으로 인해 잠재적인 사면붕괴, 산사태 및 토석류 등과 같은 산지재해의 발생 가능성을 체계적으로 평가할 수 있는 방안의 마련과 더불어 잠재적 위험지역에 대한 재해방지시설 계획의 수립이 이루어져야만 할 것이다.

본 연구는 산지 내 대규모 시설지 조성으로 인한 잠재적 산지재해에 대한 조사, 분석, 평가 방안을 제시함으로써 산지 및 계류에 대한 취약성 분석을 통하여 취약지역 중심의 잠재적 산지재해 발생 위험유역을 평가하고 그에 따른 종합

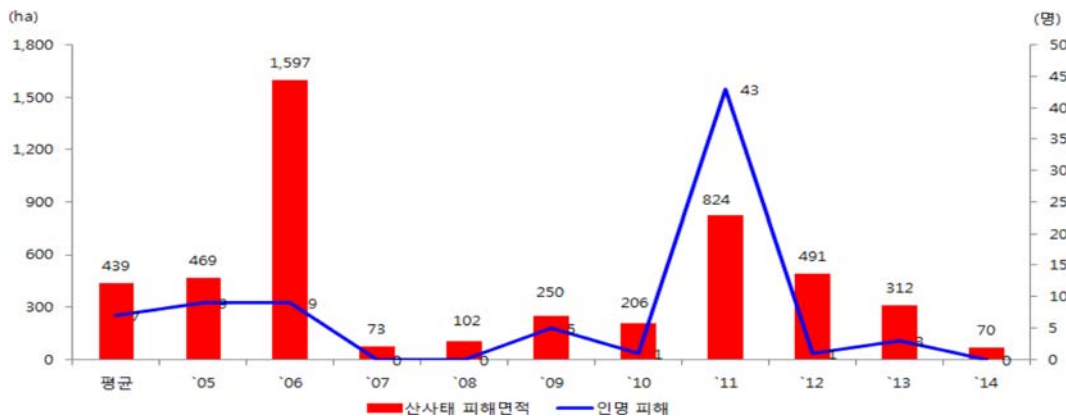


Fig. 1. Fatalities and landslide damage areas in Korea from 2005 to 2014 (Korea Forest Service, 2015a).

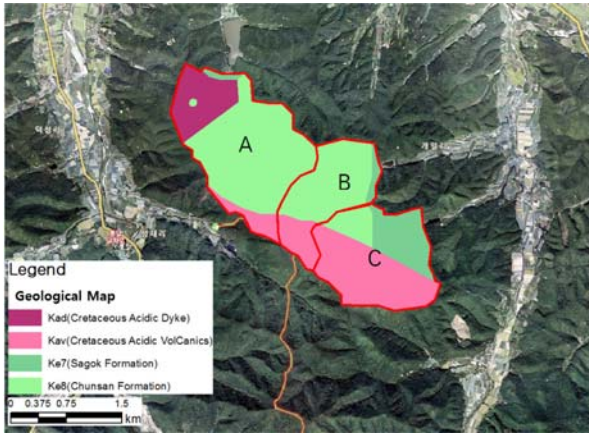


Fig. 2. Distribution of geological formations and basin classification (A, B, C) in the study area (red line : basin boundary) (KIGAM, 1976).

적인 재해방지대책을 마련하여 안전한 산지전용 계획수립에 활용하는데 그 목적이 있다.

연구방법

연구지역의 지질특성

연구지역은 경상남도 및 경상북도의 대부분 지역에 걸쳐 발달하는 대규모의 퇴적분지이며, 영남육괴의 시원생대 변성암을 기반암으로 약 9,000m 이상의 백악기 퇴적층을 포함하고 있다. 유천층군의 응회암이 얇은 두께의 풍화대로 피복되어있으며 하부는 핑크색에서 암회색으로 짙어지는 특징이 있다. 또한 응회암은 비교적 치밀 견고하기 때문에 풍화에 강하여 험준한 지형을 이루고 있으나 아직 중장년기 지형에 머무르고 있어 하부로 갈수록 절리가 발달하는 기이한 구조를 보이는 특징을 갖고 있다(KIGAM, 1976).

Fig. 2와 같이 본 지역에 대해 산계와 수계를 기준으로 총 3개의 A, B, C 유역으로 구분하여 지질적 분포 특성을 분석하였다. A유역은 하양층군 춘산층이 60%, 불국사관입암류 산성암맥이 31%, 하양층군 사곡층이 9% 분포하고 있으며, B유역은 하양층군 춘산층이 73%로 가장 우세하며, 유천층군 산성화산암이 20%, 하양층군 사곡층이 7% 순으로 분석되었다. C유역은 유천층군 산성화산암이 60%, 하양층군 춘산층 15%, 하양층군 사곡층 25% 가량 분포하고 있다.

Hwang et al. (2013)의 연구에 따르면 2011~2012년 사이 발생한 산사태 발생지의 지질별 특성은 화성암 21.4%, 변성암 64.9%, 퇴적암 13.7%로 분석되었으며, 지질면적 대비 산사태 발생확률은 화성암 15.8%, 변성암 61.5%, 퇴적암 22.7%로 분석되었다. 이러한 결과와 비교해 볼 때, 본 연구지역의 지질은 산성 화산암의 응회암과 퇴적암으로 구성되어 있어 산사태 발생확률은 다소 낮은 것으로 평가할 수도 있다. 하지만 산지재해의 발생 형상이 산지 상부에서

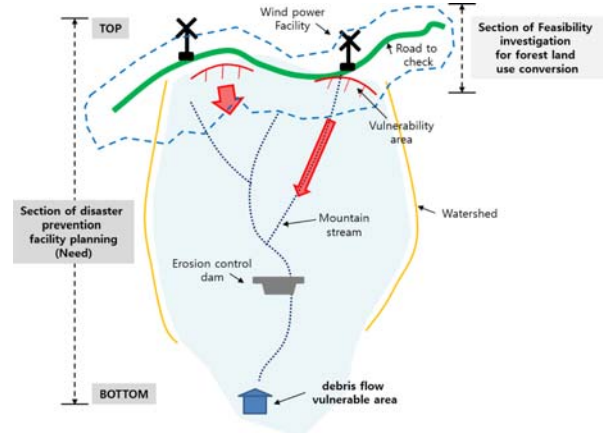


Fig. 3. Patterns of occurrence of potential mountain hazards (slope failure, landslide, and debris flow) on natural/artificial slopes and along mountain streams.

표층붕괴 형태로 시작하여 하부로 흘러내리면서 대규모 산지재해를 발생시키는 점을 고려할 때 대상지역의 지형, 지질, 토층 분포 특성 등을 고려해야 한다.

산지재해 취약구간 선정 및 이의 재해방지시설 계획수립 방안

잠재적 산지재해의 발생지점은 일반적으로 토층이 1m 내외로 사면 경사가 급한 구간에서 1차적으로 사면붕괴 내지 소규모 산사태가 발생되면서 붕괴 유실물이 계류 내로 유입 적치된 후 집중강우 등으로 인해 급격한 계류수가 증가하면서 계류에 적치되어 있던 유실물 등이 계류를 따라 하류로 곡류하면서 2차적인 토석류가 발생하게 된다. 이러한 토석류는 계류 최하단부에 위치한 시설지 및 주거지로 토석류가 유입되면서 광범위한 토석류 피해가 발생한다.

Fig. 3과 같이 산지 유역의 상단부에 인위적인 시설지가 조성될 경우, 인위적으로 성토사면 및 절토사면, 사면 보호 시설물 등이 함께 시공됨에 따라 향후 잠재적인 위험지 형태로 계류 상단부에 놓여져 있기 때문에 이들 잠재적 위험지에 대한 취약성 평가가 이루어져야 하며, 이를 토대로 재해방지시설 계획이 수립되어야만 한다.

유역별 산지재해의 잠재적 취약성을 분석하기 위하여 연구방법은 산지·계류 위험성 분석, 산지·계류 기초조사, 산지·계류 취약성 평가, 산지·계류 취약지 안정성 분석, 재해방지시설 계획수립 순으로 수행하였다(Fig. 4).

산지·계류 위험성 분석은 산사태 위험지도, 토석류 예측지도, 지질도, 수치지형도 등 기존 자료를 토대로 유역범위 설정 및 대상 유역 하부의 시설지 및 주거지 등의 공간적 위치를 파악하기 위하여 실시한다. 이를 통해 산지 내에서 산사태 내지 토석류가 발생할 경우, 유역 하부에 위치한 잠재적 피해지의 범위를 산정할 수 있다(Won et al., 2016; Papathoma-Köhle, 2016).

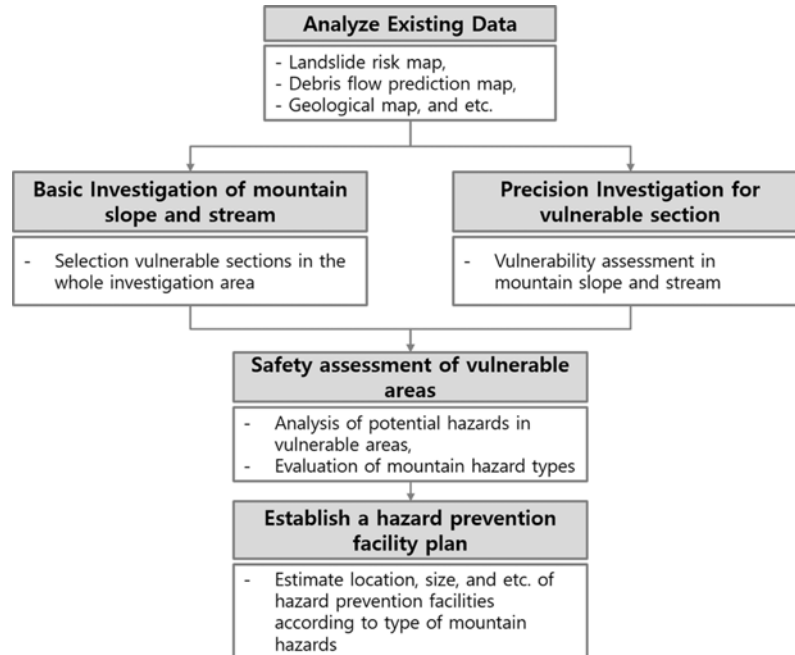


Fig. 4. Flowchart for evaluating the risk of mountain hazards and establishing a hazard prevention plan.

Table 1. Investigation sites and basin status.

| | Basic investigation of mountain stream (place) | Basic investigation of mountain slope (place) | Basin area (ha) | Existing erosion control facility (place) | Potential damage facility |
|---------|--|---|-----------------|---|--|
| A basin | 9 | 9 | 270.0 | Erosion control dam (3) | Reservoir, facility and residence area |
| B basin | 10 | 10 | 126.8 | - | Reservoir, facility and residence area |
| C basin | 6 | 4 | 178.9 | - | Reservoir, facility and residence area |
| Totoal | 25 | 23 | 575.7 | Erosion control dam (3) | - |

산지·계류 기초조사는 일반적인 지표지질조사 개념의 현장조사를 토대로 해당 유역 내 주계류와 계류주변 양안사면의 상태 및 붕괴이력 등을 파악하여 향후 잠재적 산지재해의 위험지를 선정한다.

산지·계류 취약성 평가 및 취약지 안정성 분석은 잠재적인 산지재해 위험지에 대한 정밀조사를 통해 산지사면의 안정성과 주계류를 기준으로 토석류의 발생 가능성 등을 분석하여 유역 하류부의 주거지와 시설지에서 발생할 수 있는 토석류의 피해확산 범위를 산정하기 위하여 수행한다.

이상의 조사, 분석, 평가 결과를 토대로 각 유역별 토석류 피해확산 범위와 시설지 및 주거지의 위치정보를 토대로 잠재적 토석류의 위험성을 산정한다. 이러한 분석 결과를 토대로 잠재적 산지재해 위험유역에 대해서는 산지사면과 계류 구간을 중심으로 재해방지시설계획을 수립하여 산지재해로부터 안전한 산지 환경을 확보하기 위한 자료를 제공한다.

연구결과

위험등급에 따른 유역별 분석

A유역의 면적은 270.0 ha로 유역 하부에 저수지, 시설지, 주거지가 위치해 있으며, 주계류 내 사방댐 3개소가 시공된 상태이다. B유역은 면적이 126.8 ha, C유역은 178.9 ha의 면적을 가지며, 각각 유역 하부에 소류지, 시설지, 주거지가 위치해 있다(Table 1). 이와 같이 대상 유역 하부에 저수지, 시설지, 주거지 등이 위치해 있어 산지재해가 발생할 경우에는 유역 하부지역에서 직간접적으로 산지재해의 피해발생 범위에 속해 있다.

본 연구지역에 대해서 Fig. 5와 같이 산림청의 산사태정보시스템에서 제공하는 산사태 위험지도의 위험등급을 면적별로 분석해 본 결과, A유역은 1등급(4.2%), 2등급(17.3%), 3등급(41.3%), 4등급(31.7%), 5등급(5.5%)이며, B유역은 1등급(22.3%), 2등급(17.2%), 3등급(34.3%), 4등급(22.6%),

5등급(3.6%), C유역은 1등급(5.2%), 2등급(18.4%), 3등급(45.3%), 4등급(26.2%), 5등급(4.9%)으로 분석되었다. 각 유역별 1등급과 2등급 면적비율을 기준으로 산사태 위험등급만을 보았을 때, B유역이 가장 산사태에 취약한 것으로 나타났다. A유역과 C유역은 3~5등급의 분포지가 더 넓으나 일부 계류에는 산사태 위험도가 높은 1~2등급이 분포하는 것으로 나타났다.

산지·계류 정밀조사 기준 설정

산지·계류 정밀조사는 산사태 및 급경사지 붕괴, 토석류 재해 등 전반적인 산지재해를 고려하여 연구지역 내 산지사면과 계류구간을 구분하여 수행하였다. Fig. 6은 연구지역인 A유역, B유역, C유역으로 구분하여 해당 유역 내 계류 분포 및 현장조사 현황을 나타낸 것이다. 넓은 지역의 산지사

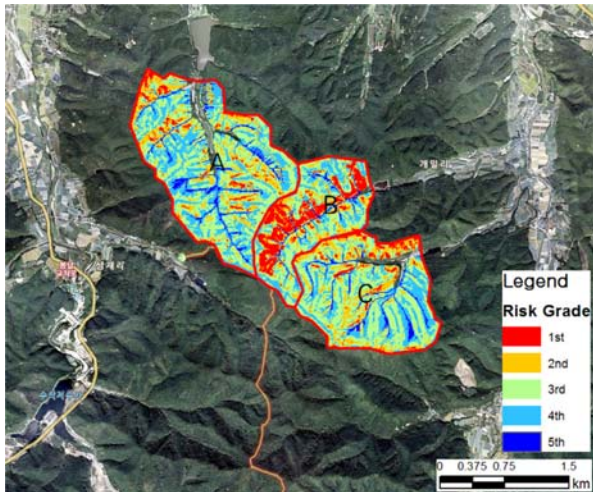


Fig. 5. Landslide hazard map from the Landslide Information System of the Korea Forest Service.

면을 대상으로 현장조사를 실시함에 있어 사면구간의 분할은 지형 및 수계 특성을 고려하여 사면의 경사가 10° 이상 변할 경우, 사면의 경사방향이 40° 이상 변할 경우, 동일한 구간의 연장이 200 m 이상일 경우, 사면을 구성하는 지질매질(토사, 연약암반, 파쇄암반, 절리암반 등)이 변할 경우 등의 기준에 따라 구획하였다.

토석류 발생시 유동경로가 되는 산지사면 및 계류에 대한 정밀조사는 우선적으로 산림청에서 제공하는 산사태위험지도 상에서 파악되는 산사태 위험등급 1등급과 2등급을 포함하였다. 또한, 계류 현황을 함께 고려해 상태평가 등급을 기준으로 산정하였다(Korea Forest Service, 2012; 2013; 2015b). 상태평가 등급은 주위험요소와 부위험요소를 함께 고려해 산사태 및 토석류 위험도 등급기준을 A (위험), B (잠재적 위험), C (위험도 낮음)등급으로 구분하여 적용하였다. 여기서, 주위험요소는 사면, 계류, 식생, 토질상태, 기존 시설 등이 포함되며, 부위험요소는 지형, 주변시설, 기타요소에 해당한다.

산지·계류 정밀조사 결과

산지·계류 정밀조사는 기초조사에서 파악된 위험지를 중심으로 수행된 것으로 실제 산지사면의 붕괴흔적 및 대규모의 토사유실 현상의 진행 유무, 이러한 산지 내 유실물이 계류구간에 적치되어 있거나, 계류 하상에 전석 및 유목이 다수 적치되어 있는 형태를 고려하여 산지재해가 발생할 수 있는 잠재적 위험요인으로 평가하였다. 이러한 위험요인의 평가는 Table 2와 같이 조사등급을 제시함으로써 대상 유역에 대한 위험성을 분석하였다.

A유역은 총 9개의 계류가 분포해 있으며, 이 중 주계류에 속하는 RA-1, RA-8의 계류 평균경사가 3~5° 내외로 작으나, 이외의 소계류는 계류 평균경사가 11~27° 내외로 산지

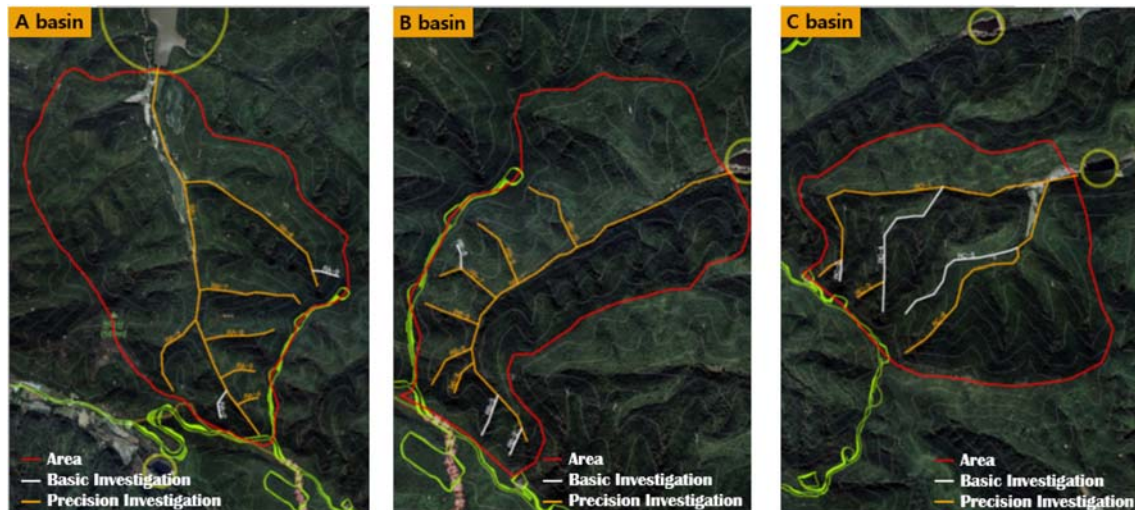


Fig. 6. Distribution of mountain streams in the study area (basins A, B, C) and field survey status.

Table 2. Status of basins A, B and C of mountain streams.

| No. | Mountain stream | | | Drift wood | length of Max. drift wood (m) | Left collapsed slope | Right collapsed slope | Existing mountain stream water | Depositional portion | Mean width of mountain stream (m) | Existing erosion control facility | Investigation grade |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|------------|-------------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| | Mean angle (°) | Upper angle (°) | Lower angle (°) | | | | | | | | | |
| RA-1 | 2.8 | 4.5 | 1.1 | Y | 22 | 2 | 1 | Y | Y | 5.6 | dam (3) | A |
| RA-2 | 16.2 | 15.8 | 16.6 | Y | 10 | 0 | 0 | N | Y | 2.1 | - | C |
| RA-3 | 11.9 | 13.1 | 10.7 | Y | 8 | 0 | 1 | N | Y | 4 | - | B |
| RA-4 | 27.6 | 28 | 27.3 | Y | 8 | 0 | 0 | N | Y | 1.3 | - | B |
| RA-5 | 23.4 | 21.8 | 25.3 | Y | 10 | 1 | 0 | N | Y | 1.6 | - | B |
| RA-6 | 11.0 | 14.5 | 7.5 | Y | 10 | 2 | 1 | Y | Y | 14 | - | A |
| RA-7 | 15.2 | 17.8 | 12.6 | Y | 10 | 1 | 1 | Y | Y | 4 | - | A |
| RA-8 | 5.9 | 9.1 | 2.8 | Y | 15 | 2 | 1 | N | Y | 3.3 | - | A |
| RA-9 | 29.0 | 30.1 | 28.0 | Y | 8 | 0 | 0 | N | Y | 1.1 | - | C |
| RB-1 | 10.6 | 17.7 | 3.6 | Y | 15 | 4 | 5 | Y | Y | 5.3 | - | A |
| RB-2 | 25.8 | 26.5 | 25.2 | N | 0 | 0 | 0 | N | Y | 1 | - | C |
| RB-3 | 24.8 | 18.7 | 30.9 | Y | 8 | 0 | 0 | N | Y | 4 | - | C |
| RB-4 | 12.1 | 19.2 | 5.1 | Y | 14 | 0 | 0 | Y | Y | 3.6 | - | B |
| RB-5 | 16.6 | 18 | 15.3 | Y | 12 | 1 | 1 | Y | Y | 3.5 | - | A |
| RB-6 | 23.8 | 33.6 | 14 | Y | 6 | 1 | 1 | Y | Y | 2.5 | - | A |
| RB-7 | 20.5 | 23.9 | 17.1 | Y | 8 | 2 | 1 | N | N | 3 | - | A |
| RB-8 | 15.3 | 23.1 | 7.5 | N | 0 | 0 | 0 | N | Y | 1.6 | - | C |
| RB-9 | 17 | 20.2 | 13.8 | Y | 20 | 1 | 0 | Y | Y | 2.3 | - | B |
| RB-10 | 22.2 | 30.2 | 14.3 | Y | 6 | 0 | 0 | N | Y | 2.5 | - | B |
| RC-1 | 6.6 | 10.9 | 2.4 | Y | 24 | 1 | 2 | Y | Y | 3.1 | - | A |
| RC-2 | 12.1 | 14.1 | 10.2 | Y | 24 | 2 | 1 | N | Y | 2.8 | - | A |
| RC-3 | 14.7 | 20.1 | 9.4 | Y | 8 | 0 | 0 | N | Y | 2.5 | - | C |
| RC-4 | 12.1 | 16.4 | 7.8 | Y | 7 | 2 | 1 | Y | Y | 2.3 | - | A |
| RC-5 | 9.4 | 13.5 | 5.3 | Y | 7 | 0 | 1 | Y | Y | 4.6 | - | B |

Table 3. Input variables for FLO-2D analysis of debris flows.

| DEM (m) | Grid size (m) | Simulation time (sec.) | Bulking concentration | Viscosity (poises) | Yield stress (dynes/cm ²) | Sediment specific gravity |
|---------|---------------|------------------------|-----------------------|--------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| 1×1 | 5×5 | 6 | 0.4 | 97.91 | 259.22 | 2.65 |

사면에 접해 있어 주계류보다는 높은 계류경사를 보이고 있다. B유역은 총 10개의 계류로 주계류인 RB-1의 계류 평균경사가 10° 가량으로 A 및 C유역의 주계류 평균경사보다 크게 형성되어 있으며, 소계류의 계류 평균경사도 큰 경사를 보이고 있다. C유역의 경우, RC-1이 주계류를 형성하고 있으나 전반적으로 소계류의 계류평균경사는 9~14° 내외로 완만한 형상을 갖는 것으로 분석되었다.

이상과 같이 유역별 계류 평균경사를 토대로 산지재해의 잠재적 위험성을 고려해 보면, B유역이 A유역과 C유역에 비하여 면적은 작으나, 계류가 분포해 있는 지형의 경사가 급하고 계류 양안의 산지사면의 붕괴지가 다수 분포해 있다. 따라서 이들 붕괴 유실물이 계류 하상에 다량 적치된 것으로 보아 산지재해 발생시 직간접적으로 토석류 재해의 발생 가능성이 높을 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 현장 기초 및 정밀조사 결과에서도 B유역 내 계류 양안사면에서의 사면붕괴 및 토사유실, 수목전도 등의 기재해 발생이력이 다수 확인된 결과를 토대로 볼 때 상대적으로 B유역에서 산지재해가 지속적으로 발생되고 있는 것으로 나타났다.

산지 취약성 분석 결과

연구지역에 대한 산지 취약성 분석은 산사태 위험등급인 1등급과 2등급이 분포하는 범위를 잠재적 산사태 발생지로 설정하였다. 이들 구간에서 발생한 붕괴 유실물이 산지 계류를 따라 흘러내릴 수 있는 토석류 유동 및 확산범위를

FLO-2D 프로그램을 활용하여 분석하였다. 붕괴 유실물의 유출량의 위치에 따라 case별로 분류하여 적용하였으며, 이를 위해 Table 3과 같이 DEM, 격자크기, 토사체적농도, 점성, 항복응력 등은 case별로 동일하게 적용하였다(FLO-2D software, 2009).

산지 내 소유역 단위로 유출량을 결정하는데 식(1)과 같이 합리식을 대부분 지역에 범용적으로 활용하고 있다. 합리식은 유출량, 강우강도, 유역의 크기 및 도달시간 등과의 관계를 고려한 것이다(Kuichling, 1889). 특히, 대상지역의 계류에 대한 유출량 자료가 없을 경우에는 유용하게 사용된다. 이에 본 연구에서는 각 유역별 주계류 상단부(case 1)와 현장조사에서 파악된 취약구간 내 소계류 상단부(case 2)를 기준으로 토석류가 시작하는 부분의 유출량을 산정하기 위하여 다음과 같이 적용하였다.

$$Q = 0.2778CLA \quad (1)$$

여기서 Q 는 침투유량(m³/s)이며, I 는 강우강도(mm/hr), A 는 유역면적(km²)이며, C 는 배수유역의 특성에 따라 결정되는 감소계수인 유출계수이다. 유역의 면적 A 는 case별로 각 유역면적을 사용하였고, 유출계수 C 는 산지지형을 고려해 10~30%의 경사에 해당하는 0.6의 값을 적용하였다. 강우강도 I 는 시간대별로의 강우강도를 적용하여 최대강우강도인 68.94 mm를 적용하였다.

토석류는 유사체의 체적 또는 중량 농도의 값에 따라

Table 4. Flow characteristics according to sediment concentration (FLO-2D software, 2009).

| | Sediment Concentration | | Flow Characteristics |
|-------------|------------------------|-----------|---|
| | by volume | by Weight | |
| Landslide | 0.65~0.80 | 0.83~0.91 | Will not flow; failure by block sliding |
| | 0.55~0.65 | 0.76~0.83 | Block sliding failure with internal deformation during the slide; slow creep prior to failure |
| Mudflow | 0.48~0.55 | 0.72~0.76 | Flow evident; slow creep sustained mud flow; plastic deformation under its own weight; cohesive; will not spread on level surface |
| | 0.45~0.48 | 0.69~0.72 | plastic deformation under its own weight; cohesive; will not spread on level surface |
| Mud flood | 0.40~0.45 | 0.65~0.69 | Flow mixes easily; shows fluid properties in deformation; spreads on horizontal surface but maintains an inclined fluid surface; large particle (boulder) setting; waves appear but dissipate rapidly |
| | 0.35~0.40 | 0.59~0.65 | Marked settling of gravels and cobbles; spreading nearly complete on horizontal surface; liquid surface with two fluid phases appears; waves travel on surface |
| | 0.30~0.35 | 0.54~0.59 | Separation of water on surface; waves travel easily; most sand and gravel has settled out and moves as bedload |
| | 0.20~0.30 | 0.41~0.54 | Distinct wave action; fluid surface; all particles resting on bed in quiescent fluid condition |
| water flood | < 0.20 | < 0.41 | Water flood with conventional suspended load and bedload |

Landslide, Mudflow, Mud Flood, WaterFlood와 같이 대표적으로 4단계의 흐름을 나타낸다(Table 4). Landslide 형태는 거의 흐르지 않으며, Mudflow 형태는 Landslide와 마찬가지로 거의 흐르지 않고 크리프 형태로 나타난다. MudFlood 형태는 유사 농도에 따라 다양한 특성을 가지고 있으며, WaterFlood는 토사가 거의 포함되지 않은 형태의 특성을 가지는 것으로 보고되고 있다(FLO-2D software, 2009). 따라서 본 연구에서는 MudFlood의 체적 유사농도가 0.4~0.45 일 때 토석류와 유사한 흐름을 갖기 때문에 0.45의 유사농도를 토석류 분석에 적용하였다.

본 연구에서 사용된 항복응력과 점성 값은 과거에 연구된 토사농도에 따른 점성과 항복응력 값 중 연구지역과 가장 유사한 Aspen Watershed에서 토사 체적농도 값 약 0.45를 이용하여 점성 97.91 poises, 항복응력 259.22 dyne/cm²의 값을 적용하였다. 이를 토대로 3개 유역에 대해 유출량과 시간의 분석조건(case 1과 case 2)을 Table 5에 나타내었다.

A유역의 면적은 270.0 ha로 총 9개소의 계류가 위치해 있으며, 계류 및 사면 조사 결과 불안정한 취약구간은 4개소(RA-1, RA-6, RA-7, RA-8)인 것으로 분석되었다. RA-1 계류에는 사방댐 3개소가 설치되어 있으며, 사방댐의 폭은 15~26 m, 유효고는 1.6~3.5 m의 규모이다. 이들 사방댐의 저수량은 약 60~80%로 시공 이후 해당 유역의 상류부로부터 토석류가 기발생되어 다량의 토사 및 암편이 대수면 주변에 적치되어 있는 상태이다.

B유역은 면적이 126.8 ha 정도로 계류가 총 10개소가 위치해 있다. 현장조사 결과에 따르면 불안정한 취약구간은 총 4개소(RB-1, RB-5, RB-6, RB-7)인 것으로 분석되었다. 토석류를 방호할 수 있는 사방댐이나 계류보전 등의 사방시설은 설치되어 있지 않아 대규모 산지재해 발생시 하부로 토

Table 5. Analysis conditions for basins A, B, and C in FLO-2D simulations.

(Case 1: all mountain streams, Case 2: vulnerable mountain streams).

| Classification | | Outflow (m ³ /s) | Travel time (s) |
|----------------|--------|-----------------------------|-----------------|
| A | Case 1 | 33.534 | 1300 |
| | Case 2 | 11.601 | |
| B | Case 1 | 15.419 | 925 |
| | Case 2 | 3.886 | |
| C | Case 1 | 22.689 | 837 |
| | Case 2 | 3.761 | |

석류에 의한 피해가 발생할 가능성을 내포하고 있다. C유역의 면적은 178.9 ha로 계류가 총 5개소가 위치해 있으며, 불안정한 계류의 취약구간은 3개소(RC-1, RC-2, RC-4)인 것으로 파악되었다.

각 유역별 FLO-2D 분석결과는 토석류 유동심도와 토석류 재해범위로 구분하여 유역 전체의 주계류와 소계류 상단부에서 발생하는 전체 토석류를 분석한 결과가 Case 1에 해당하며, 각 유역별 취약구간에 대한 분석결과는 Case 2에 분석결과를 나타내었다(Fig. 7 and Fig. 8).

A유역에 대한 FLO-2D 분석 결과, Case 1에서의 최종유동심도는 평균 0.30 m로 토사의 유동확산 범위는 일부 저수지 하부까지 확산되는 것으로 나타났다. Case 2에서는 토석류의 유동 범위가 저수지 상부까지 확산되는 것으로 분석되었다. 현재 RA-1 계류에 사방댐이 3개소 설치되어 있고, 토석류의 유동범위가 하부 저수지 및 시설지까지 확산되지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 A유역에 대해서는 추가적인 재해방지시설의 설치보다는 지속적인 산지·계류의 상태 변화를 장기적으로 관찰하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

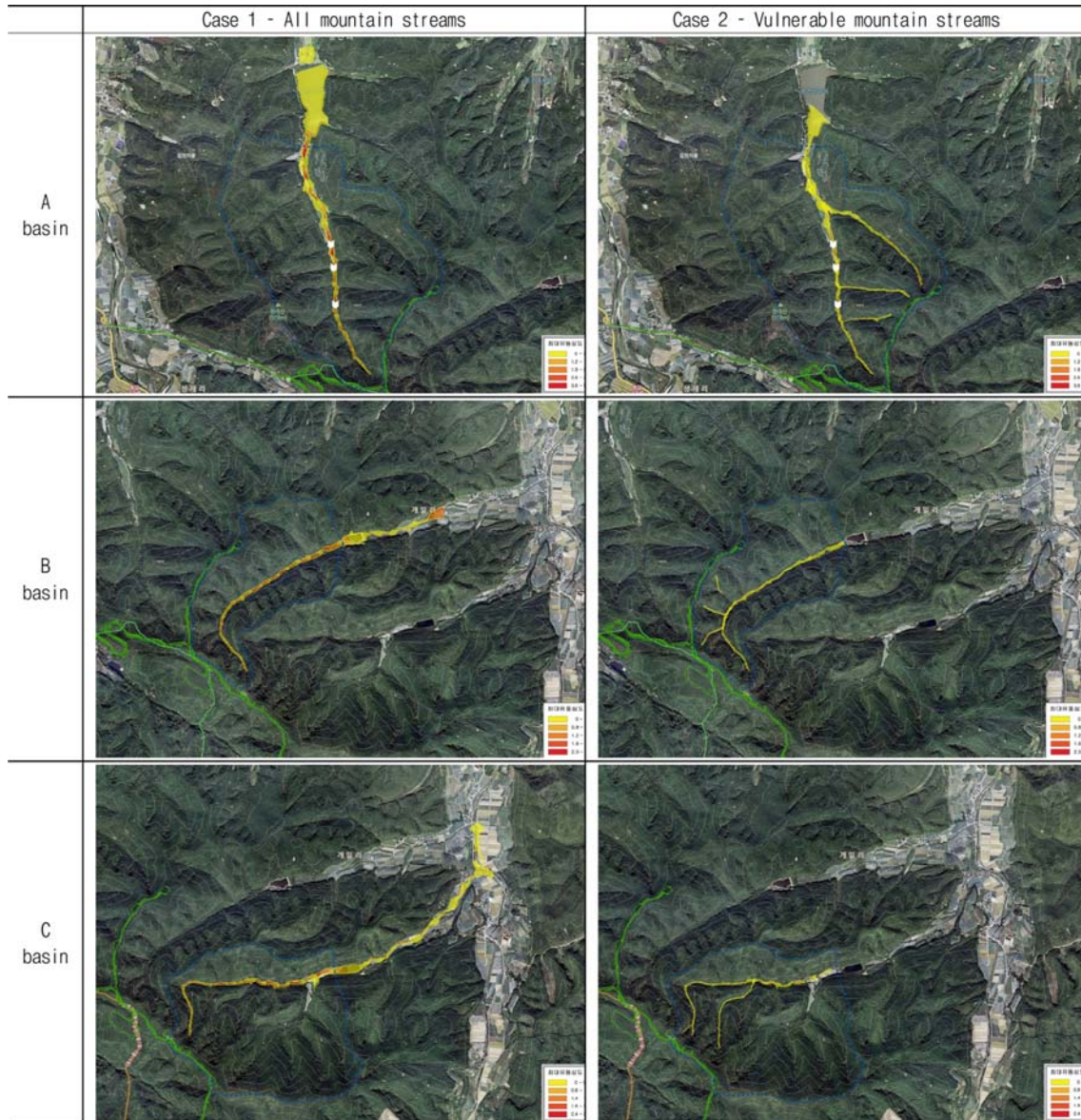


Fig. 7. Analysis of the maximum flow depth of debris flows in each basin.

B유역은 Case 1에서 토석류가 발생시 토석류의 유동확산 범위가 저수지를 넘어 시설지 및 주거지까지 확산되는 것으로 분석되었다. 최종유동심도가 최대 1.18m로 대부분의 토석류 유실물이 하부에 집중되는 형상으로 나타났다. Case 2의 경우는 하부로 갈수록 유동범위가 감소하는 것으로 분석되었지만, 토석류가 저수지를 범람시킬 경우에는 저수지의 붕괴에 따른 추가 피해의 발생 가능성이 있어 대상유역에 적합한 토석류 재해방지시설 계획의 수립이 필요할 것으로 사료된다.

C유역의 경우, Case 1에서의 토석류 유동확산 범위가 저수지 하부 시설지 및 주거지를 통과하여 도로부까지 토석류의 확산이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 Case 2의 분석 결과는 B유역과 유사하게 토석류가 저수지까지 도달할 수

있는 조건을 갖고 있기 때문에 저수지의 파손으로 인한 하부 시설지 및 주거지까지 토석류에 의한 피해 발생 가능성이 존재한다. 현재 계류에 토석류 방호시설이 전무하며, 토석류의 유동확산 범위가 넓어 현지 여건에 부합되는 재해방지시설 대책을 수립하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

토 의

위험등급과 조사등급의 상관관계

산림청에서 제시하고 있는 토석류 발생 우려지역 판정표는 총 4가지 등급으로 이루어져 있다(Korea Forest Service, 2015b). 1등급은 토석류 발생가능성이 대단히 높은 지역(540점 이상), 2등급은 토석류 발생가능성이 높은 지역(360~540

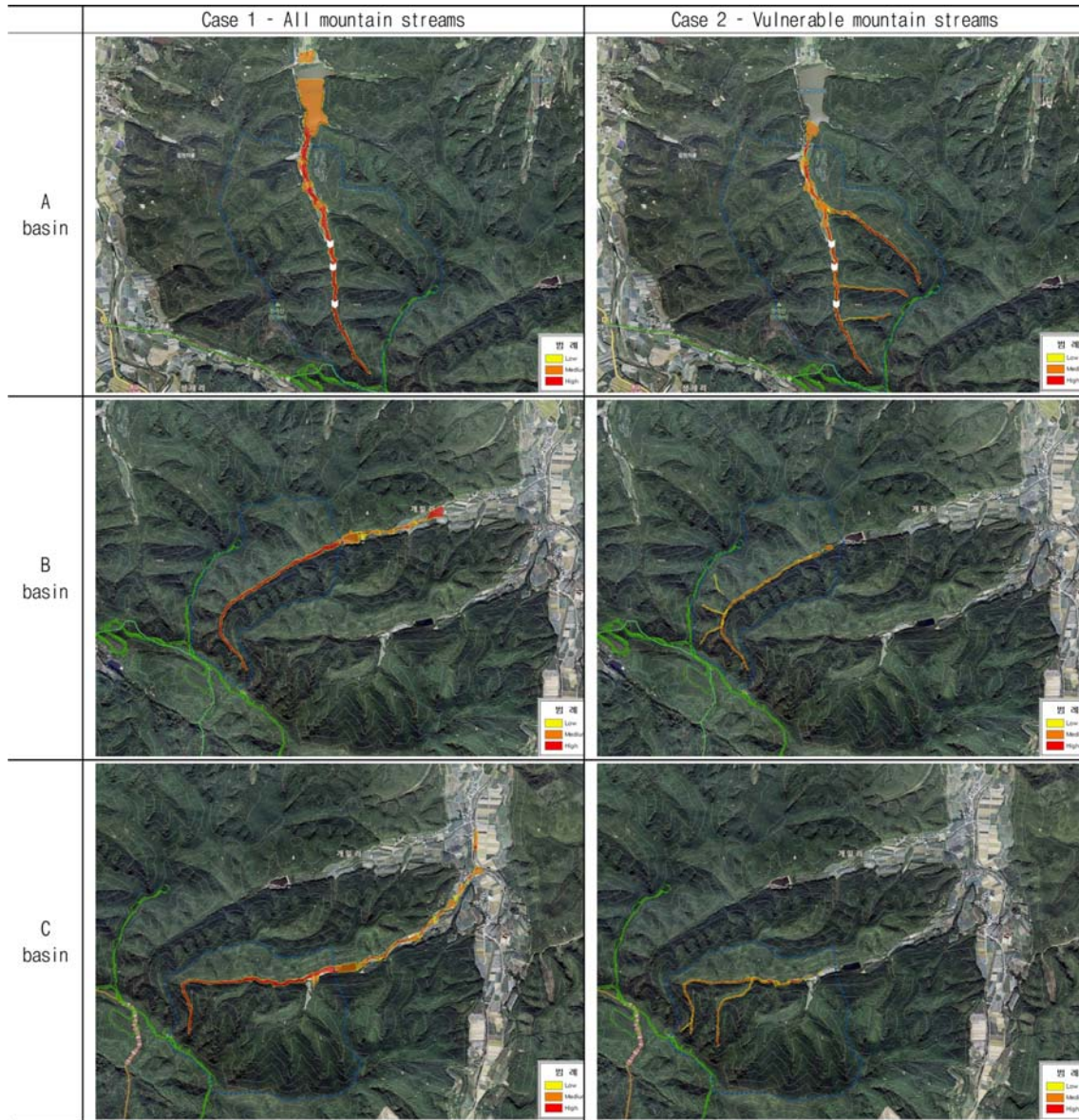


Fig. 8. Analysis of the hazard range of debris flows in each basin.

점 미만), 3등급은 토석류 발생가능성이 낮은 지역(120~360 점 미만), 4등급은 토석류 발생가능성이 없는 지역(120점 이하)로 제시하고 있다(Fig. 9).

이를 고려해 본 연구지역의 토석류 발생 우려지역 판정표에서 산정된 점수와 토석류 등급에 대해 조사등급을 고려해 비교해 보면 2등급 이상으로 토석류의 발생가능성이 높은 지역으로 산정되었다.

토석류 발생 우려지역 판정표에 따른 위험등급은 1등급이 B유역 2개소로 분석되었으며, 나머지 22개소는 2등급으로 산정되었다. 토석류 발생 우려지역 판정표의 평균 점수는 A유역은 504점, B유역은 524점, C유역은 487점으로 평균 2등급에 속하나, 토석류 위험등급은 B유역→A유역→C유역으로 산정할 수 있다. 연구지역의 유역별 현장조사에 따

른 조사등급 중 A등급(위험)은 A유역에서 44%, B유역에서 40%, C유역에서 60%이며, B등급(잠재적 위험)은 A유역에서 33%, B유역에서 30%, C유역에서 20%, C등급(위험도 낮음)은 A유역에서 22%, B유역에서 30%, C유역에서 20%로 분석되었다.

이상과 같이 토석류 발생 우려지역 판정표에 따른 위험등급의 순위와 현장조사에서 파악된 조사등급과의 차이가 발생하는데 이는 각 유역에 존재하는 산지사면 및 계류의 개소수와 조사 면적의 차이에 의한 것으로 판단된다. 하지만 토석류 발생 우려지역 판정표의 경우, 하부 보호대상이 위치할 경우 높은 점수(150점~360점)를 부여하도록 되어 있기 때문에 상대적으로 높은 위험등급으로 산정될 수 있다. 이를 보완하기 위해서는 현장조사에서 파악된 조사등급과의

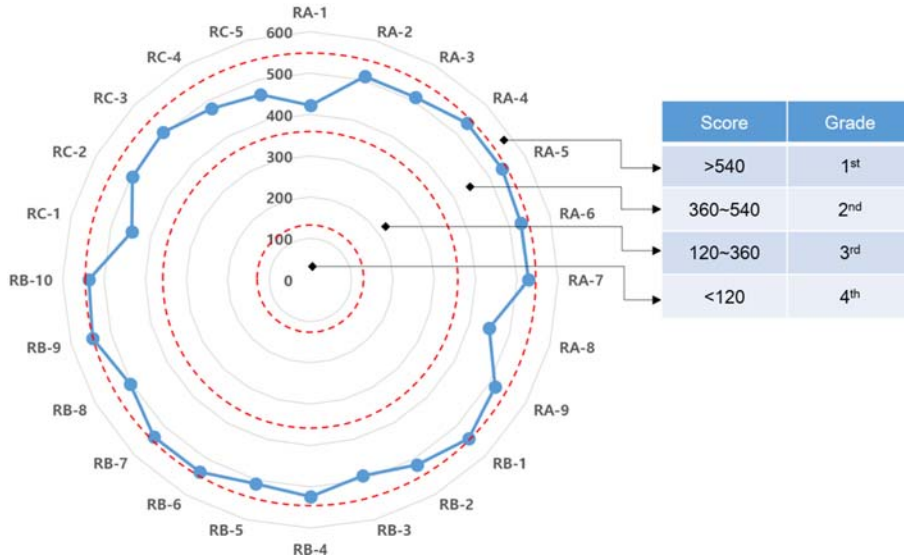


Fig. 9. Correlation between the risk grade of areas vulnerable to debris flows and investigation grade.

상호 비교를 통해 보완이 이루어져야 할 것이다.

산지재해 취약성 평가를 위한 재해방지시설 계획수립의 합리성

산지재해 취약성 평가는 산지 내 시설지 구성에 따른 절토 및 성토사면의 인위적 형성과 더불어 산지구역 내 수계 변화 등으로 인해 하절기 태풍 내지 집중호우 등에 의해 산지재해 발생 가능성이 급격히 증가할 수 있으나, 법제도 상에서는 산지재해에 대한 조사·대응·복구·유지관리 등과 관련해서는 명확히 제시되어진 바가 없는 실정이다. 따라서, 잠재적 산지재해의 취약성을 평가하여 산지환경과 재해대응에 적극적으로 대처할 수 있는 방안의 수립 및 적용이 절실히 필요하다.

본 연구에서는 산지구역 개념의 재해방지시설 계획수립을 위한 항목 및 절차를 Fig. 4에서 제시한 바와 같이 구역별로 산지사면 및 계류에 대한 기초·정밀조사를 수행하여 위험성을 파악한다. 기초조사 결과 상 기봉괴 이력 및 토사유실, 수목 전도 등의 재해가 발생된 구간에 대해서는 정밀조사를 통해 산지재해 원인규명을 수행함으로써 추후 토석류 취약성 평가시 해당 구간에 대해서는 잠재적 위험구간으로 설정하여 토석류 분석을 실시하도록 한다.

이를 통해 해당 산지구역 하부에 토석류로 인해 피해를 받을 수 있는 시설지 및 주거지에 대해서는 토석류 취약성 평가를 통해 토석류 피해범위를 산정한다. 이러한 결과를 토대로 각 산지구역별로 분석된 결과를 토대로 토석류 취약성이 가장 높은 구역에 대해서는 산지재해를 저감하기 위한 재해방지시설 계획의 수립이 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 A, B, C구역에 대한 전반적인 조사, 분석, 평가를 통해 잠재적인 산지재해 취약구역은 B구역으로 분

석되었으며, 토석류 피해범위를 고려하여 계류 상부에 토석류를 방호하기 위한 볼투과형 중력식 콘크리트 사방댐과 압괴 및 유송잡목을 제어하기 위한 투과형 스크린댐의 설치 등의 재해방지시설 계획을 수립하였다.

결론

본 연구에서는 산지를 중심으로 발생하는 산사태와 토석류 등 산지재해에 관한 취약성 평가의 방안 수립과 더불어 재해에 강한 산지관리의 일환으로 재해방지시설 계획수립의 절차를 제시하였다. 현재 “산지관리법”에서는 산지전용 내지 일시사용 인·허가를 위해서는 활용하고자 하는 산지 면적에 대해서만 개략적인 타당성조사가 수행되고 있으나, 산지 하부지역에 대한 산지재해 취약성 평가는 이루어지지 않고 있는 것이 현실이다.

이에 산지구역 단위의 개념을 적용하여 체계적으로 산지재해의 잠재적 위험성을 기초조사를 통해 파악하고, 기발생 붕괴지, 토사유출지, 수목전도 및 지반변형 발생지 등 구역 내 취약구간에 대해서는 정밀조사를 통해 원인규명을 실시한다. 대상 산지구역 직하부에 시설지 및 주거지가 위치해 있을 경우에는 토석류 피해범위 분석을 통해 취약성 평가를 수행하고, 현지 여건에 적합한 재해방지계획을 수립하여야 한다.

3개 구역에 대한 조사, 분석, 평가 결과에서는 B구역이 취약한 것으로 평가되었으며, 계류 하부에는 볼투과형식의 중력식 콘크리트 사방댐과 계류 중단부에 투과형식의 스크린댐 설치가 필요한 것으로 나타났다.

이상과 같이 산지재해에 적극 대처하기 위해서는 잠재적 산지재해의 유형과 예상되는 피해범위를 충분히 평가하여야

한다. 이미 산림청에서는 토석류 발생 우려지역 판정표를 활용하여 위험등급을 제시하고 있으나, 이를 연구지역에 대해 적용해 본 결과 위험등급과 현장조사를 통한 조사등급간의 차이가 발생하는 것으로 분석되었다.

기존의 판정표에서 위험등급 산정 시 주거지가 대상지역 하부에 존재할 경우에는 기본적으로 높은 점수를 부여하기 때문에 산지재해의 위험성이 낮더라도 2등급 이상의 위험등급이 부여될 가능성이 높다. 또한 조사 면적, 산지사면 및 계류의 조사 개소수에 따라 위험등급과 조사등급간의 확연한 차이를 보였다.

이는 향후 산자유역 단위를 중심으로 재해방지시설 계획을 수립하는데 있어 현실적 여건을 충분히 반영하지 못하는 계획을 수립할 수 있는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서 제시하는 산지재해 저감을 목적으로 재해방지시설 계획수립의 방안은 적극 활용하되 판정표에서 제시하는 위험등급간의 차이를 줄이기 위한 연구를 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 행정안전부 재난관리지원기술개발사업의 연구비 지원(2017-MPSS31-001)에 의해 수행되었다.

References

- Choi, D. Y. and Paik, J. C., 2012, Characteristics of runout distance of debris flows in Korea, *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, 32(3B), 193-201.
- FLO-2D Software, INC., 2009, FLO-2D reference manual.
- Hwang, H. G., Lee, S. W., Kim, G. H., Choi, B. K., and Yune, C. Y., 2013, Analysis of slope hazard-triggering rainfall and geological characteristics in 2011 and 2012, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 13(6), 179-189.
- KIGAM, 1976, Explanatory text of the geological map of Gusandong sheet (Scale 1:50,000), 51p.
- Jang, C. B., Choi, Y. N., and Yoo, N. J., 2017, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 18(1), 13-21.
- Kim, M. -I., Lee, M. -S., Chang, B. -S., Bang, D. -S., and Lee, J. -G., 2011, Countermeasure and pending issue of facility standards for dealing with debris flow hazards, *The Korean Society of Engineering Geology conference*, 87-92.
- Kim, M. -I., Lee, S. -W., and Kim, B. -S., 2017, Slope stability assessment induced by variation in mountain topography and rainfall infiltration, *The Journal of Engineering Geology*, 27(2), 125-132.
- Korea Forest Service, 2015a, Comprehensive measures to prevent landslide in 2015.
- Korea Forest Service, 2015b, Investigate landslide areas and Guidance on management of landslide vulnerable areas, 28p.
- Korea Forest Service, 2013, Integrated management plan of landslide occurrence risk area, 119p.
- Korea Forest Service, 2012, Field manual of landslide prevention and countermeasure, 104p.
- Kuichling, E., 1889, The relation between the rainfall and runoff from small urban area, *Transaction of ASCE*, 101, pp.143-183.
- Lee, C. W., Woo, C. S., and Kim, D. Y., 2014, Standard procedures for investigation of potential debris flows torrent and area in Japan, *Journal of the Korean Society of Forest Engineering*, 12(1), 1-25.
- Lee, H. J., Tak, W. J., and Jun, K. W., 2015, Simulation of debris flow using RAMMS model, *Crisis and Emergency Management : Theory and Practice*, 11(2), 177-187.
- Papathoma-Khle, M., 2016, Vulnerability curves vs. vulnerability indicators: application of an indicator-based methodology for debris-flow hazards, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, 1771-1790.
- Takahashi, T., 2014, Debris flow, 2nd edition, - Mechanics, Prediction and Countermeasures, CRC Press, 572p.
- Won, S. Y., Lee, S. W., Paik, J. C., Yune, C.-Y., and Kim, G. H., 2016, Analysis of erosion in debris flow experiment using terrestrial LiDAR, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 34(3), 309-317.

김만일

산림조합중앙회 산림공학연구소
34417 대전광역시 대덕구 동서대로 1800
Tel: 042-341-1026
Fax: 042-637-8046
E-mail: mikim@nfcf.or.kr

이문세

산림조합중앙회 산림공학연구소
34417 대전광역시 대덕구 동서대로 1800
Tel: 042-341-1015
Fax: 042-637-8046
E-mail: landslides@daum.net

홍관표

산림조합중앙회 산림공학연구소
34417 대전광역시 대덕구 동서대로 1800
Tel: 042-341-1020
Fax: 042-637-8046
E-mail: spare444@nate.com