

## 진주시 산지골 유역내 땅밀림지 특성에 관한 연구

박재현<sup>ID\*</sup> · 김선엽 · 이상현 · 강한별

경상국립대학교 산림융복합학과

### Study on the Characteristics of the Slow-moving Landslide (Landcreep) in the Sanji Valley of Jinju

Jae-Hyeon Park<sup>ID\*</sup>, Seon Yeop Kim, Sang Hyeon Lee and Han Byoel Kang

Department of Forestry Convergence, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

**요약:** 본 연구는 진주시 집현면에서 발생한 땅밀림지의 지질, 지형 및 물리적 특성을 분석하여 땅밀림 발생 피해방지를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 실시하였다. 대상지는 1982년에 1차 땅밀림 이후에 2019년 2차 땅밀림이 발생하였는데, 2차 땅밀림 피해면적은 1차보다 약 11.5배로 나타났다. 주 구성암석은 풍화가 비교적 심해 땅밀림이 쉽게 발생하는 퇴적암 지역이었다. 땅밀림으로 붕괴된 지역은 활동면으로 추정되는 면과 슬라이딩 방향으로 층리와 수직으로 발달한 절리의 조합에 의해 암반이 작은 블록으로 나뉘고 이완되면서 활동면을 따라 슬라이딩이 발생하였고, 암반이 분리되면서 분리된 틈으로 지표수 및 토사가 유입하는 것으로 조사되었다. 아울러 세일 내의 사암이 층리와 절리의 조합에 의해 블록으로 나뉘고 후 지하수 등의 풍화작용에 의해 모서리 부분부터 내부로 풍화가 진행되는 양파구조(Onion Structure)를 보여주는 노두가 나타나고, 이런 과정을 거쳐 핵석이 만들어진 것으로 판단된다. 조사대상지는 지하수에 의한 전형적인 땅밀림형 산사태 지역으로 유형은凸상미근형으로 붕괴토 땅밀림형 산사태에 해당하였다. 땅밀림 대상지의 산사태위험등급은 3~5등급에 해당되어 일반적인 산사태와는 차이가 있었다. 지하수는 북동(NE)방향으로 유동하는 것으로 나타났으며, 지형 경사를 따라 유동하며 땅밀림으로 붕괴된 방향과 일치하였다. 땅밀림지로부터 능선부는 땅밀림 영향을 받지 않은 토양으로 땅밀림으로 붕괴된 하단부보다 토양용적밀도는 높았으며, 붕괴로 인해 토양의 와해와 교란으로 인해 토양용적밀도는 급격히 낮아지는 것으로 나타났다.

**Abstract:** This study was conducted to obtain basic data that could help prevent damage caused by slow-moving landslides (land-creep). Specifically, the geological, topographic, and physical characteristics of land-creep were analyzed in Jiphyeon-myeon, Jinju-si. The first and second analyzed land-creeps occurred in 1982 and 2019, respectively. The area damaged in the second land-creep was about 11.5-fold larger than that damaged in the first land-creep. The dominant constituent rock in the land-creep area was sedimentary rock, which seems to be weakly resistant to weathering. The areas that collapsed due to land-creep were related to the presence of separated rocks between the bedding plane in the estimated activity surface over the slope direction and the vertically developed joint surface. Thus, surface water and soil debris were introduced through the gaps of separated rocks. Additionally, the areas collapsed due to the combination of the bedding plane and joint surface shale and sandstone showed an onion structure of weathered outcrop from the edge to inner part caused by weathering from ground water. Consequently, core stones were formed. The study area was a typical area of land-creep in a mountain caused by ground water. Land-creep was classified into convex areas of colluvial land-creep. The landslide-risk rating in the study area was classified into three and five classes. The flow of ground water moved to the northeast and coincided with the direction of the collapse. Soil bulk density in the collapsed area was lower than that in ridge area, which was rarely affected by land-creep. Thus, soil bulk density was affected by the soil disturbance in the collapsed area.

**Key words:** slow-moving landslide (land-creep), the discontinuity slopes, soil bulk density, topography, groundwater flow

\* Corresponding author  
E-mail: sanpjh@gnu.ac.kr

ORCID  
Jae-Hyeon Park <sup>ID</sup> https://orcid.org/0000-0002-1446-7547

## 서론

땅밀림은 주로 토양층 또는 암석층으로 구성된 산비탈이나 비탈면에서 지하수 등으로 말미암아 땅속의 전단 저항이나 점착력이 약한 부분을 따라 토층의 일부가 어느 정도 원형을 유지한 상태로 서서히 낮은 곳을 향해 지속적으로 미끄러져 이동하는 현상이며(Woo, 1992), 폭우로 인한 일반적인 산사태와 구별하기 어려운 경우가 많다. 땅밀림은 특정한 지질 또는 지질구조를 갖는 지대에서 집중적으로 발생하는 경향이 있으며, 혈암, 이암, 응회암 등으로 이루어진 지대에서 미끄럼면에 불투수층이 존재함으로써 지하수에 의해 토층이 활동성 활제로 작용하는 경우에 많이 발생하며, 일본의 경우, 제3기층, 파쇄대, 온천지대 등에서 많이 발생한다(Park, 2018). 해외에서는(Davis, 1899; Takaya, 2017) 이 땅밀림을 활강면(Downhill)에서 낮은 속력으로 내려오는 암석이나 토양을 말하며, 장기적인 압력으로 인한 토양의 변형 등으로 설명하고, 조사자에게 연속적인 현상으로 보일 수 있으나 이는 중력에 의한 미세하고 불연속적인 움직임으로 정의한다.

국내에서 땅밀림은 오래전부터 존재하였으나 대규모 산지 노출이 없었고, 최근 각종 개발행위에 따른 사면 절취 또는 자연적 현상 등으로 인장균열 및 붕괴가 발생해 노출되는 경향을 보이기도 한다(Park, 2018). 우리나라는 1970년대까지 산지황폐화로 인한 토양의 침식과 유실로 얕은 층의 산사태가 많이 발생하였다(Choi, 2018). 현재 국내에서 땅밀림 연구로서 장기간 지반의 이동으로 인한 미세지형의 변형으로 지형도와 항공사진을 분석하여 땅밀림지를 찾아내는 연구(Park et al., 2021)와 땅밀림지의 지질, 지형적 특성(Davis, 1899; Takaya, 2017)과 복구대책에 대한 연구(Korea Forest Service, 2013) 등이 이루어지고 있다. 땅밀림은 토양 내 점토층(Clay stratum)과 강우의 관계에서 발생하기도 하고(Culling, 1963; Jau et al., 2000), 불연속면과 단층파쇄대(Fragmental zone of fault, 斷層破碎帶)의 붕괴로 인해 발생하기도 한다(Tomio et al., 1990; Park et al., 2003; 2005; Kim, 2004). 또한, 동결융해(Auzet and Ambrose, 1996)나 지하수위의 증가(Matsukura et al., 1983; Anderson and Richards, 1987; Montgomery et al., 1998), 임도개설 등 인위적 개발(Park et al., 2003; Korea Forest Service, 2013)로도 발생한다. 따라서 본 연구는 경상남도 진주시 집현면 덕오리 1415번지(산지골 유역내) 일원에서 발생한 땅밀림지의 특성을 분석하여 땅밀림 발생에 따른 피해 방지를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 실시하였다.

## 재료 및 방법

조사대상지는 경상남도 진주시 집현면 덕오리 산 1415번지 일원 개인용 주택겸 절 뒤 죽림의 산자락이 땅밀림으로 붕괴된 지역이다. 이는 1982년 여름철 집중호우 때 산사태 발생 징후가 있다는 주민의 신고로 발견되었다. 이후 2021년 6월 현장 조사 결과, 땅밀림이 발생한 절 뒤편 사면은 작고 큰 단차가 발생되었고, 단차는 길이 7.8~34.9 m, 폭 0.6~4.6 m, 높이 1.2~3.9 m로 산지 중단부와 하단부에 걸쳐 발생하였다. 이 지역에서 가장 가까운 진주시 기상관측소의 자료를 분석한 결과, 땅밀림이 발생한 1982년 7월(250.6 mm), 8월(354.0 mm)이었으며, 2019년과 2020년 재차 땅밀림이 발생할 때 2019년의 강우량은 6월과 7월 각각 243.7 mm, 234.0 mm, 9월과 10월에는 각각 352.2 mm, 177.4 mm로 태풍에 의한 영향을 받았다. 또한, 2020년에는 6월부터 9월까지 각각 234.2 mm, 587.5 mm, 356.7 mm, 200.0 mm로 이 기간 중 총강우량은 1,378.4 mm로 2020년 총강우량 1,812.7 mm의 약 76.0%가 내려 강우량이 이 시기에 집중하여 2차 땅밀림이 발생하는데 영향을 미친 지역이다.

본 대상지에서 땅밀림이 발생하여 붕괴한 지역의 상단부 사면과 중앙부사면 그리고 하단부 사면에서 식생 표준지를 책정하여 교목 및 아교목에 대하여 20 m × 20 m 크기의 방형구를 3반복 식생조사를 시행하였다. 또한, 하층식생은 교목을 조사한 표준지에서 1 m × 1 m 표준지를 구획하여 조사를 시행하였다. 대상지의 지질은 지질도를 이용하여 구분하였으며, 현장조사 시 조사지 규모(땅밀림 지 길이 × 폭 × 붕괴깊이), 인장균열지의 위치 등을 GPS로 파악하고 단차 및 절취경사를 측정하였다. 또한, 지반조사는 3개 지점에 대하여 시추 조사하였다. 땅밀림지의 모암, 방위, 형태, 산지경사 등 입지특성을 조사하여 GIS(Arc map Ver. 10.8)로 분석하였다. 땅밀림으로 인한 사면의 피해상태를 파악하고 절리의 경사, 방향, 간격 등을 조사하였다. 절리의 주향과 경사는 현장에서 경사계(Clinometer)를 이용하여 조사하였다. 주향은 절리면 상에서 존재하는 수평선의 방향, 경사는 절리면의 최대 경사각, 경사 방향은 수평에서 기울어진 절리면 상에 있는 가장 급한 선의 경사와 정북으로부터 시계방향으로 측정된 경사방향으로 조사하였다. 지반침하 및 땅밀림의 지형적 특성 및 발생징후를 파악하기 위하여 지형도(1:25,000, 1:50,000)를 바탕으로 땅밀림이 잘 발생하는 특징 및 미세지형을 분석하였다(Varnes, 1978; Jau et al., 2000). 땅밀림에 영향하는 인자들에 대해서는 Park et al.(2005; 2019), Park(2015), Takaya(2017)에서 나타난 모암, 경사, 주향, 토양형태, 토양물리성, 땅밀림 발생 형태 등 주요 인자를 포함하여 땅밀림지

의 유형을 구분하였고, 땅밀림지의 활락에는 직선형, 원호형, 말발굽형으로 구분하여 조사하였다.

토양물리성은 토양 500 g을 채취하여 한국임업진흥원(Korea Forestry Promotion Institute, KOFPI)에 의뢰, 분석하였다. 지표지질조사를 위하여 전기비저항탐사와 토질, 지질 물성시험과 시추조사를 3개소 실시하였으며 과거 땅밀림 발생 흔적을 파악하기 위해 국토정보플랫폼(<http://map.ngii.go.kr/mn/mainPage.do>)을 이용해 대상지의(축척: 1:5,000) 1993년, 2000년, 2010년, 2019년도 항공사진을 활용하였다. 인장균열이 발생한 상, 하단부의 토양용적밀도의 차이를 파악하기 위해 토양 깊이 90 cm까지 측정이 가능한 관입식 토양경도계(Daiki, DIK-5520)를 이용하여 토양 깊이별 토양경도를 3반복 측정하였다.

1. 조사대상지 식생조사

조사지역은 행정구역상 경상남도 진주시 집현면 덕오리 산182 산지골 우측방면에 위치하며, 진주시의 북동쪽 중앙에 위치하고, 동쪽에서부터 월하리, 신당리, 지내리, 반지리와 인접하고 있다. 조사지역 주변의 산계는 동쪽과 남쪽은 대부분 구릉성 산지를 이루고, 서쪽에는 장대산(204.6 m), 북서쪽에 집현산(578.1 m) 및 그 산자락들이 넓게 자리하고 있다. 조사지역의 수계는 수지상으로 분포하며, 조사지역의 동측의 산계에서 발원한 소지류는 동류하여 조사지역의 서쪽에 위치한 향양천에 합류되어 북서-남동으로 곡류 후 남강으로 유입된다. 조사지역의 동측 산계에서 발원하여 서쪽으로 흐르는 소지류는 냉정천 합류되어 남으로 곡류하여 남강으로 유입된다.

땅밀림지에 분포하는 식생은 사면 상단부에서는 곶솔이 우점하고 있으며, 경급은 20 - 42 cm, 수고는 15 - 30 m, 본수는 25본, 단재적은 3.773 m<sup>3</sup>, 재적은 13.067 m<sup>3</sup>이었고, 굴참나무의 경급은 10 - 12 cm, 수고는 15 - 18 m, 본수는

20본, 단재적은 0.2014 m<sup>3</sup>, 재적은 2.014 m<sup>3</sup>이었고, ha당 임목축적은 377.03 m<sup>3</sup>으로 상층을 이루고 있었다. 중층은 밤나무와 대나무가 자라고 있으며, 관목으로는 참싸리, 산초나무, 붉나무, 청미래덩굴, 머루, 마삭줄 등이 자라고, 하층식생으로는 김의털, 참취, 대사초, 주름조개풀, 단풍마, 고사리 등이 분포하고 있다. 특히 땅밀림으로 붕괴된 산지 사면의 중하단에는 활엽수림이, 하단부에는 죽림이 주를 이루고 있다.

이 지역의 지질은 중생대 백악기 경상계 퇴적층으로 낙동통에 해당하며, 퇴적암지역으로 산지 정상부로부터 7~8부 능선에 변곡부가 나타나며, 산복부 5~6부 능선부 깊이가 2~3 m, 길이 50~60 m의 커다란 인장균열이 나타나고, 산복부에 크고 작은 인장균열과 함몰현상이 나타나고 있다. 산지 하단부에는 1982년에 1차적으로 땅밀림 산사태가 발생하여 주택 1채가 부서져 있고, 그 주변부로 폐가 및 이주한 집터가 있다. 아울러 그 당시 7가구가 이주하였으나 이후 시간이 지나면서 과거의 상황을 잊고 그 지역으로 들어와 집을 짓고 사는 주민들이 나타나고 있다. 아울러 가장 크게 발생한 인장균열은 1982년 당시에는 폭 30~40 cm 정도였으나, 현재에는 그보다 훨씬 크게 벌어지고 있어 지속적으로 땅밀림 산사태가 발생하고 있는 것

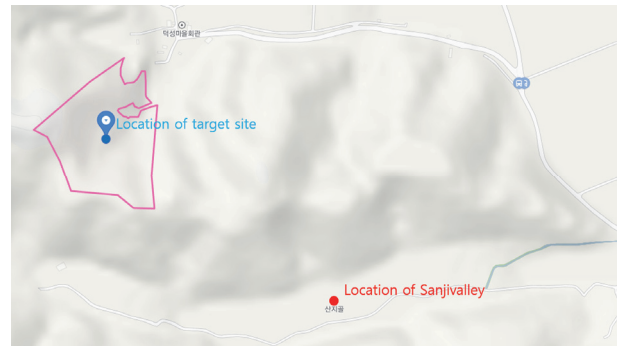


Figure 2. The loaction of Sanjivalley in Deokori Jiphyeon-myeon JinJu-si.

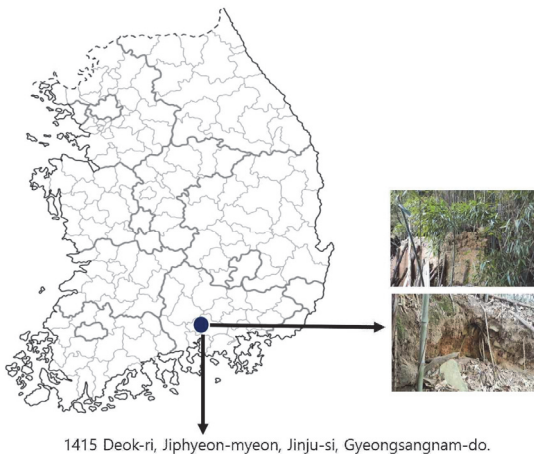


Figure 1. Location map of the study site.

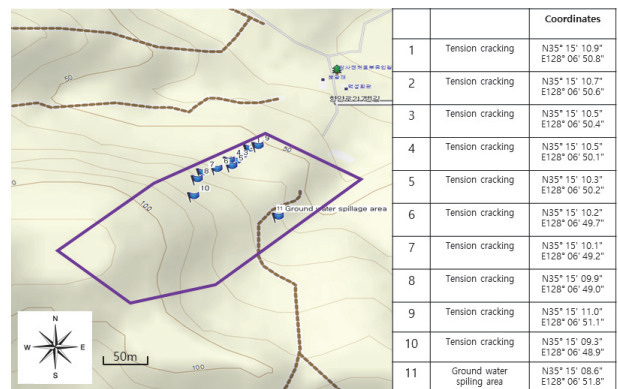


Figure 3. The difference between step in the target site.

**Table 1. The size of step difference in the site.**

(unit; m)

	Temple step	Step difference(No.)								Big difference step
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Linear content	11.6	7.8	25.3	30.9	20.2	34.9	10.5	10.0	26.1	29.7
Width	3.5	0.6	1.5	2.5	1.4	3.6	1.1	1.4	1.7	4.6
Height	3.9	1.8	1.8	2.6	2.1	3.0	1.2	1.8	1.8	5.2

으로 나타났다. 즉, 이 지역의 땅밀림은 토층이 붕적되어 깊게 형성되고 있으며, 토심 깊은 층이 풍화가 심한 붕적 토 땅밀림지역이다. 아울러 2021년 6월 현재 땅밀림 발생지 현장 조사를 시행한 결과, 땅밀림이 발생한 절 뒤편 사면은 작고 큰 단차가 발생되어 있으며, 단차의 길이는 7.8~34.9 m, 폭은 0.6~4.6 m, 높이는 1.2~3.9 m로 산지 중단부와 하단부에 걸쳐 발생하여 있다.

땅밀림이 잘 발생할 수 있는 특성인 너털(Korea Forest Service, 2013; Park, 2016)은 분포하지 않았으며, 땅밀림 발생으로부터 피해지는 산지의 1~4부 능선으로부터 인장균열 및 단차가 발생하였다(Korea Forest Service, 2013). 평균 산지 경사는 21.4°로 우리나라의 평균 산지 경사 25°(Jeong et al., 2002)보다 낮은 지역이었다. 즉, 땅밀림은 환경사지에서 발생한다는 Woo(1995)의 결과와 일치하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 지질 및 지반조사 결과

조사지역의 지층은 풍화토, 풍화암 및 연암층, 경암층으로 구성되며, 실트질 모래, 핵석을 함유하고 있고, 풍화토는 점토질 실트와 암편 및 모래가 혼재한다. 풍화암은 실트질 모래, 암편이 혼재하고, 연암은 사암으로 구성되어 있다. 경암은 사암과 흑색 셰일이 부분적으로 협재한다.

과거 1차 땅밀림이 발생한 1982년 이후 땅밀림 진행방향의 사면 하단부 및 과거 땅밀림 당시 발생한 인장균열

지역의 노두를 대상으로 수행하였다.

지표지질조사 결과, site 1에서 J1은 주향/경사(360°법, 6°보정)는 346/08, J2는 072/83, J3는 026/37이었으며, 불연속면 종류는 J1은 층리, J2와 J3는 절리였다. J1은 1.0 mm내외 틈새를 보였고, J2와 J3는 각각 3.0 mm내외, 50.0 mm내외의 틈새를 보였다. site 2에서 J1은 128/08, J2와 J3는 각각 133/66, 026/83이었으며, 불연속면 종류는 J1은 층리, J2와 J3는 절리였다. J1 틈새는 1.0 mm내외, J2와 J3는 각각 3.0 mm내외, 30.0 mm내외로 J3가 가장 넓었다. site 3에서 J1은 024/82, J2와 J3는 각각 070/87, 324/89였으며, 불연속면 종류는 J1은 층리, J2와 J3는 절리였다. J1은 3.0 mm내외, J2와 J3는 각각 5.0 mm내외, 3.0 mm내외로 절리 틈새가 크다는 것은 땅밀림으로 인한 붕괴가 빠르게 진행하고 있는 등 외적요인(Korea Forest Service, 2013; Park, 2018)에 민감한 것으로 분석되었다. 즉, 이 지역의 인장균열은 1982년 1차 땅밀림이 발생한 후 미세한 변화가 있을 것으로 사료되나, 당시에는 조사한 기록이 없어 2019년과 2020년 2차 땅밀림이 발생한 이후 조사하였는데, 이를 통해 추후 땅밀림이 발생하는 지역에서는 땅밀림 발생 즉시 인장균열의 벌어지는 틈새를 신속계나 변위측정기를 활용하여 측정하게 되면 땅밀림의 지속적인 진행 상황을 파악할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 주민의 제보나 피해 등으로 발생지를 명확히 확인하는 경우 이외에 산지에서 발생하는 땅밀림 발생지역을 땅밀림 발생 즉시 발견하는 것은 대단히 어려운 일이므로 그 변화의 특성

**Table 2. Geological map of the survey target site.**

Era		Stratum division		Mark	Geological properties	
Cenozoic	Quaternary	alluvium		Qa	soil, sand, gravel	
		~~~~ unconformity ~~~~				
Mesozoic era	Cretaceous	Gyeongsanggye	Nakdongtong	Chilgok Layer	Knc	purple sandy shale, shale, Green gray sandy shale, conglomerate
				jinju Layer	Knj	Light gray to grayish green alkosite, sandy shale, black shale
		Madong Layer	Wonji Layer	Madong Layer	Knm	Light gray alkous sandstone, green gray to gray sandy shale, purple sandy shale, shale
				Wonji Layer	Knw	Limestone Tool Shale, Alcosite Sandstone

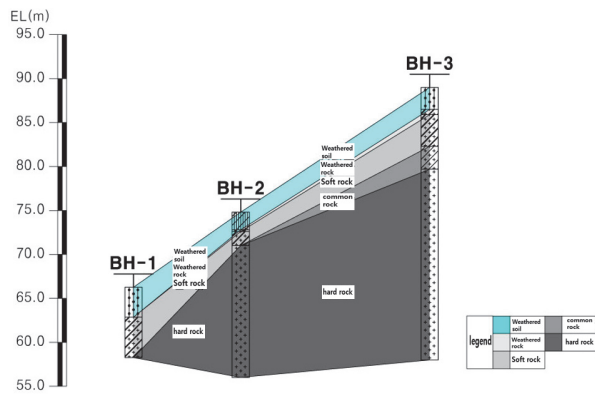


Figure 4. Result of the ground investigation of the site to be investigated.

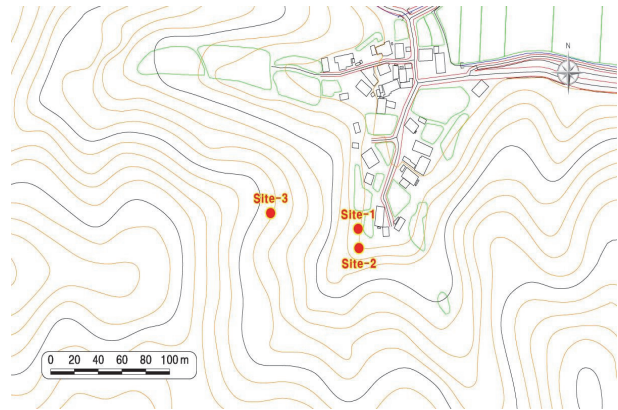


Figure 5. The location of the geological survey on the surface.

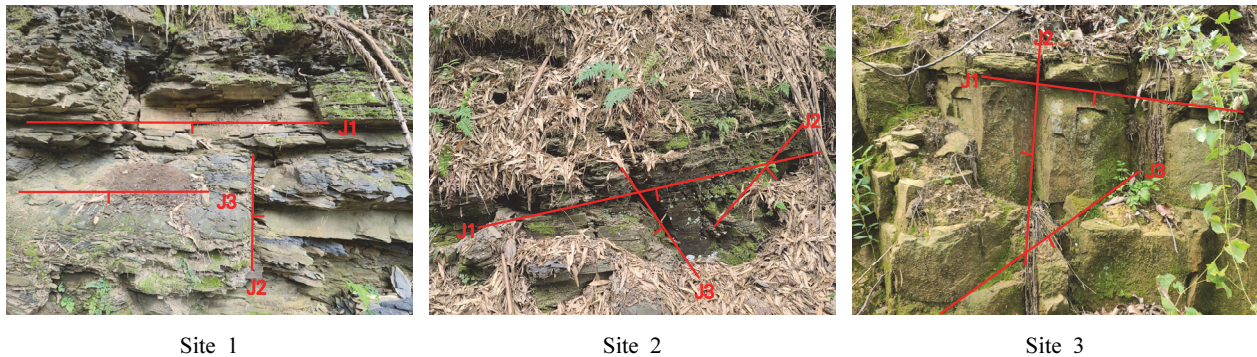


Figure 6. The main direction and inclination of the outcrop in the irradiated area.

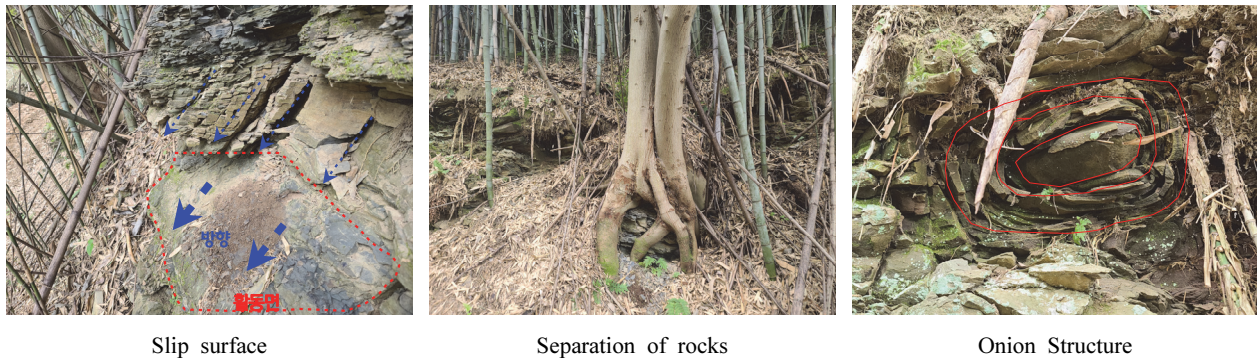


Figure 7. Result of the geological survey.

을 파악하는 방법을 강구하는 것은 앞으로의 연구과제라 사료된다.

지질도(1 : 50,000)와 대상지의 지층 및 주 구성암석을 분석한 결과, 고결도와 풍화성이 낮은(Takaya, 2017) 신생대 제4기로 나타났고, 지층은 땅밀림에 취약한 붕적층 지대로 경상계 진주층 등이었다. 주 구성암석은 풍화가 비교적 심해 땅밀림이 쉽게 발생하는 퇴적암 지역이었다(Park, 2018). 대상지의 활락애가 명확하고, 타 지층 및 관입암은 없으며, 암석은 풍화가 상당히 진행된 상태(Tomio et al.,

1990; Kim et al., 2015; Choi, 2018)로 조사되었다.

단층과 습곡은 나타나지 않았고, 불연속면은 사면경사와 동일한 방향으로 땅밀림 발생에 유리한 조건(Park et al., 2019; Lee et al., 2019)이었다. 이같이 절리의 방향과 간격으로 판단할 때, 절리의 방향 수가 많을수록 땅밀림이 쉽게 발생하는 것으로 나타났으며, 불연속면이 조밀하고 방향이 많을수록 땅밀림에 취약한 요소로 작용하여 땅밀림 재해가 쉽게 발생한다는 선행 연구결과(Kim et al., 2015; Takaya, 2017; Park et al., 2019)와 유사하였다. 한편,



Figure 8. Groundwater flow direction through sulfur analysis according to ground investigation.

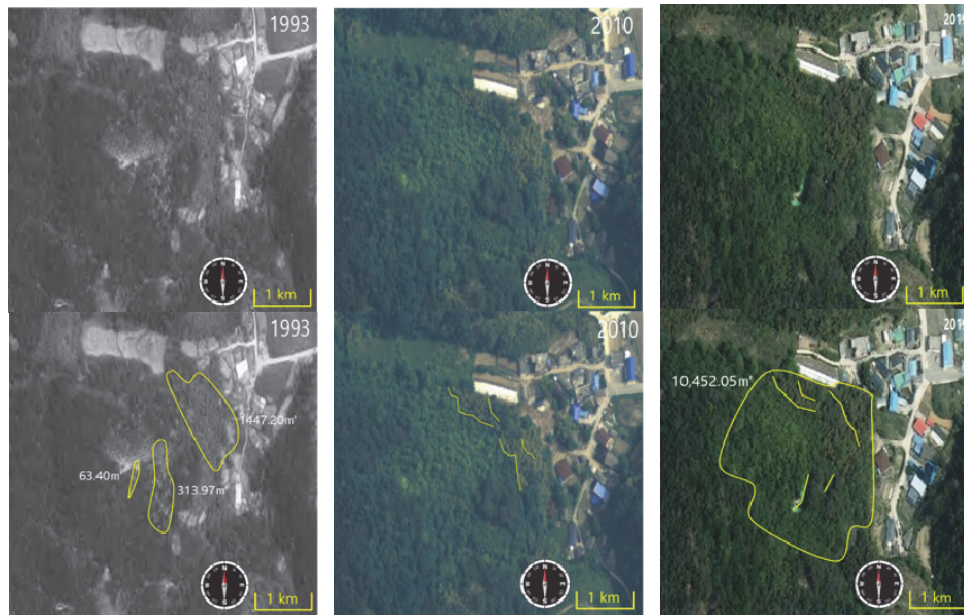


Figure 9. The aerial photograph of the site (1 : 5,000).

땅밀림으로 붕괴된 지역은 활동면으로 추정되는 면과 슬라이딩 방향으로 층리와 수직으로 발달한 절리의 조합에 의해 암반이 작은 블록으로 나뉘고 이완되면서 활동면을 따라 슬라이딩이 발생하였고, 암반이 분리되면서 분리된 틈으로 지표수 및 토사의 유입이 발생하는 것으로 나타났다. 아울러 세일 내의 사암이 층리와 절리의 조합에 의해 블록으로 나뉨 후 지하수 등의 풍화작용에 의해 모서리 부분부터 내부로 풍화가 진행되는 양파구조(Onion structure)인 노두가 나타나고, 이런 과정을 거쳐 핵석이 만들어진

것으로 판단된다(Figure 6).

지하수 흐름은 30~120°범위의 흐름이 우세한 것으로 조사되었으며, 평균 흐름방향은 80.1°로 산출되었다. 즉, 지하수 유동은 북동(NE)방향으로 유동하는 것으로 나타났으며, 지형 경사를 따라 유동하는 것으로 판단된다.

2. 항공사진 분석 결과

조사지역은 1982년 1차 땅밀림이 발생하여 인장균열(폭 30~40 cm)이 발생하였으며, 복구하지 않은 채 시간이 경

과하여 현재 폭 2.3 m, 깊이 1.2 m 이상 확대되었다. 이를 조사대상지에 대하여 자연성 변화지역에서 고해상 위성 영상으로 육안 판독해 산사태 발생지역(Debris flow)과 토사유출지역(Soil runoff)을 구분할 수 있다는 Lee and Kim (2011)에 따라 1987년도 51 m급(포털지도 서비스 사이트; Daum)과 국토정보플랫폼 고해상 항공사진을 분석한 결과 (Figure 8), 1993년 이전의 항공사진은 제공하지 않아, 1982년에 발생된 1차 땅밀림의 피해면적은 1993년 항공사진을 기준으로 1,824.6 m<sup>2</sup>이었다. 이 지역은 복구하지 않았으며, 이로 인해 지속적으로 땅밀림이 진행되어 2019년에 땅밀림으로 인한 단차가 확대되어, 땅밀림피해면적은 20,911.7 m<sup>2</sup>이었으며, 땅밀림으로 발생한 체적은 52,279.4 m<sup>3</sup>로 추정되었다. 즉, 2차 땅밀림 피해면적은 1차 땅밀림 피해면적보다 11.5배 넓었다.

### 3. GIS를 이용한 대상지의 지형분석

조사대상지는 지하수에 의한 전형적인 땅밀림형 산사태 지역으로 유형은凸상미근형지형으로 붕적토땅밀림형 산사태에 해당하고, 땅밀림은 凹부의 하단부인凸부에서 발생되었다. 즉, 산지 미세지형의 평면형은凸형이었고, 좌측 계곡부에 못 미쳐 산지 능선부에 변곡점이 나타나며, 이 지역은 약간 평탄한 지역으로 강우 시 빗물이 집수되는 미세지형을 나타내고 있다. 즉, Takaya(2017)와 Park(2019)이 보고한, 땅밀림은 오랜 세월에 걸쳐 지형이 변화되는 과정에서 발생하는 미세지형의 영향이 크다는 결과와 일치하였다. 즉, Park(2019)은 우리나라에서 발생한 땅밀림지 57개소에 대한 미세지형을 분석한 결과,凸상미근형지형은 등고선이 능선부가 밀리는 것처럼 좁게 형성되는 지역으로 양쪽에 계곡부가 형성되어 있는 지역에서 발생하는 미세지형으로 전체 57개소의 땅밀림지 중 10개소(약 17.0%)가 나타났다고 하였는데, 이 지역과 같은 지형이었다.

조사대상지는 땅밀림지의 폭(W)과 길이(L)의 비 L/W가 1.5이하 0.8정도로 발생 당초의 두부(頭部)에서 말발굽 모양의 중심선을 따라 땅밀림 토괴의 두께가 양측면에 비해 두꺼운 경우에 발생하는(Park et al., 2018) 말발굽형에 해당한다(Korea Forest Service, 2013). 또한, 조사대상지는凸상미근형지형에서 땅밀림이 발생한 지역으로 상단부에 凹부로부터 강우에 의한 지하수 유입 등에 의한 땅밀림 영향요인(Park et al., 2019)에 따른 결과로 판단된다.

조사대상지지역에서 붕괴가 발생한 지역(안쪽 경계선)과 추후 집중호우 시 추가적인 땅밀림이 발생할 위험지역(바깥쪽 경계선)을 현장에서 GPS로 조사한 결과, 바깥 경계의 면적은 약 2.2 ha로 분석되었으며, 이 지역의 수치지형도를 활용해 GIS(Arc map Ver. 10.8)로 산사태위험등급, 향, 경사, 표고, 지질에 대하여 분석(Figure 9)하였다.

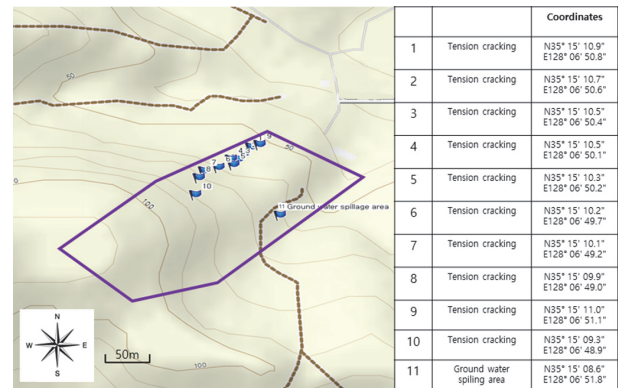


Figure 10. Collapsed and dangerous areas using digital topographic maps of the survey site.

산림청은 지형인자(사면경사, 방위, 길이, 곡률, 지형습윤지수), 임상, 경급, 토심, 모암 등에 가중치를 부여하여 산사태 위험등급 1~5등급으로 나누고 있다. 산림청이 정하는 7개의 판정 기준을 토대로 해당지역의 산사태위험등급을 분석한 결과, 1등급지는 나타나지 않았으며, 2등급지는 약 5.0%, 3등급지는 약 64.0%, 4등급지는 약 31.1%, 5등급지는 0%를 나타내었다. 즉, Korea Forest Service (2013)는, 땅밀림지는 산사태위험등급의 3~5등급과 등급 외 지역이 대다수 포함되어 일반적인 산사태와는 차이가 있음이 나타났다.

대상지의 사면향 분포를 분석한 결과, 북방향은 약 3.9%, 북동 방향은 약 16.2%, 동쪽방향은 약 70.0%, 남동 방향은 약 6.6%, 남쪽방향은 1.7%, 남서방향은 0.4%, 서쪽 방향은 0.4%, 북서방향은 약 0.9%로 나타났다. 즉, 과거로부터 땅밀림으로 수목이 휘어 자라는 방향을 분석한 결과와 비교할 때 땅밀림 방향은 동쪽과 남동쪽으로 자라고 있고, 땅밀림에 가장 큰 영향을 미치는 지하수의 유출 방향과도 대부분 일치하는 결과를 나타내었다(Figure 10). 이러한 결과, 땅밀림은 오랜 세월에 걸쳐 지형이 변화되는 과정에서 발생하는 미세지형의 영향이 크다는 결과와 일치하였다. 또한, 경사분포를 분석한 결과, 10° 미만이 약 3.9%, 10°~15°가 약 3.5%, 15°~20°는 약 30.6%, 20°~25°는 약 40.6%, 25°~30°는 약 17.0%로 가장 많았으며, 30°~35°는 약 3.1%를 나타내, 다락밭 경사를 한 지역은 완경사를 이루고 있고, 땅밀림 붕괴지는 이보다 경사가 급한 지역을 이루고 있는 것으로 분석되었다. 즉, 산지에 내리는 강우가 완만한 경사를 가진 곳에 내려 집수되면서 급경사지를 이루는 산지 하단부에 영향을 미쳐 토압과 수압을 합쳐 땅밀림을 가중시키는 것으로 분석되었다(Takaya, 2017, Park et al., 2019). 대상지 내 인장균열 및 단차가 발생한 지역에서 등고선 방향으로 수목이 휘어져 자라는 현상(Park et al., 2021)이 나타났으며, 표고분포를

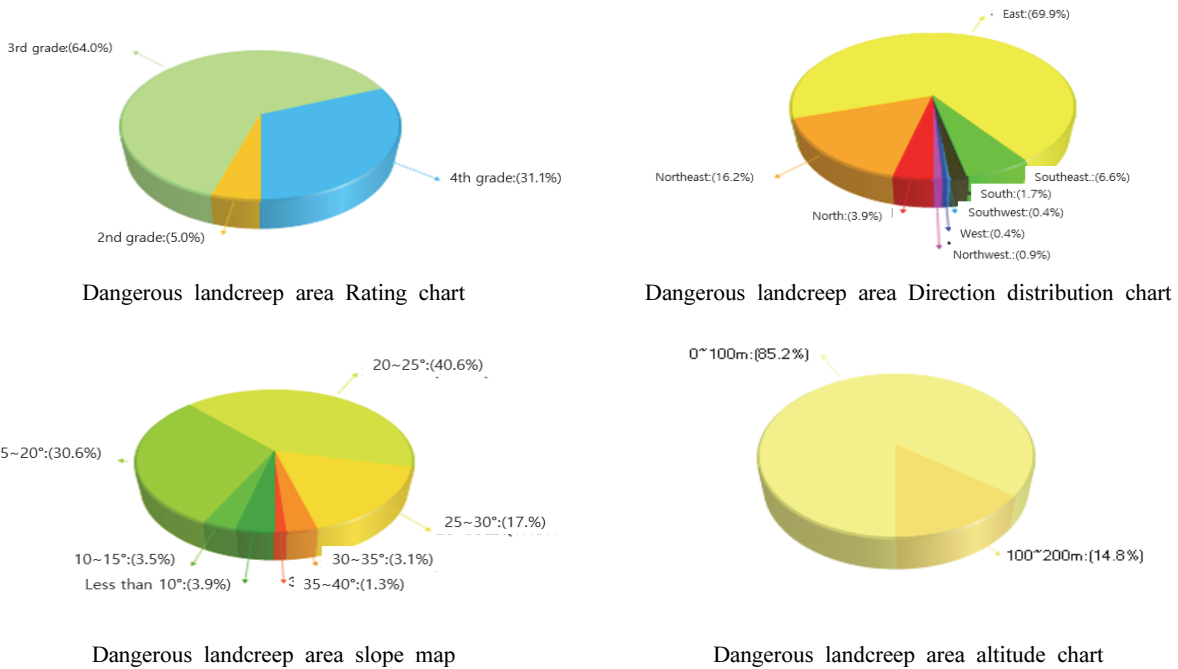


Figure 11. Analysis GIS of dangerous landcreep area (Arc map Ver. 10.8).

분석한 결과, 0~100 m는 약 85.1%로 가장 많았으며, 100~200 m는 약 14.8%를 나타내었고, 최대 표고는 113.3 m, 평균 표고는 73.8 m, 최소 표고는 36.3 m로 구릉지의 형태를 나타내 땅밀림이 가장 잘 발생하는 표고분포를 나타내었다. 즉, 땅밀림지는 산지의 5부 이하 능선부에서 가장 많이 발생한다는 연구 결과(Korea Forest Service, 2013)와 일치하였다.

4. 토양환경 인자 분석

땅밀림지의 토양형은 갈색약건산림토양(B2)이며, 토심(cm)은 30~60 cm 이하로 국내 평균 토심(50~60 cm, Jeong et al., 2002)과 유사하였다. 토양의 평균 pH는 5.15(4.90~5.40)로 우리나라 산림토양의 평균 pH(Jeong et al., 2002)보다 낮은 pH이었다. 즉, 땅밀림지 토양의 pH는 4.90~5.40으로 약산성에서 강산성을 나타내었으나, 대조구 토양의 pH는 6.7로 중성에 가까운 pH를 나타내 땅밀림지의 토양 pH가 대조구와 pH가 다른 것으로 나타났다.

땅밀림지가 발생한 인장균열지 표토는 모래 : 미사 : 점토의 함량(%)은 26.6 : 49.5 : 24.4로 양토(Loam)이었으며, 하단부 죽림 밑 지하수유출지의 모래 : 미사 : 점토의 함량(%)은 29.7 : 45.9 : 24.4로 양토이었다. 또한, 땅밀림지와 반대 사면인 대조구의 모래 : 미사 : 점토의 함량(%)은 40.9 : 44.0 : 15.1로 양토로 나타나, 땅밀림지와 대조구의 위치에 따라 토양에 사질과 점토함량이 다른 것으로 나타나 이질적인 토양으로 조성된 지역으로 땅밀림에 취약한

토양특성을 나타내었다(Tomio et al., 1990; Kim et al., 2015). 즉, Park(2015, 2019)은, 땅밀림지는 이질적 토질 및 세일의 관입(Park and Park, 2019)에 의해 발생하는 경우가 많으므로 이러한 이질적인 지질에 대한 영향을 연구하는 것이 필요하다고 하였고, 또한, 경상북도 울진군 매화면 매화리 645 땅밀림지와 경상남도 하동군 악양면 평사리 산80-1 땅밀림지의 경우에는 암석이 매우 많거나 암석과 점토가 혼재하여 땅밀림 가능성이 높은 것으로 분석되었다고 하였다. 아울러 울진광업소에서 발생한 땅밀림은 광산개발로 인한 함몰형 땅밀림으로 암석과 점토의 혼재가 땅밀림 가능성을 높이는 기능을 한다는 연구결과와 비교할 수 있다(Park, 2019).

토양관입시험기(DIK-3300)를 활용하여 토양 90 cm 깊이까지의 토양용적밀도에 대하여 땅밀림지로부터 상부인장균열지상부, 상부인장균열지하부, 죽림인장균열지상부, 죽림인장균열지하부, 지하수유출지, 대조구 토양의 용적밀도를 3반복 측정된 결과 평균값을 구하였다. 평균토심은 땅밀림지로부터 상부인장균열이 발생한 상부가 9.0 cm, 땅밀림 발생 산지의 인장균열지 하부가 55 cm, 땅밀림 붕괴지의 하단부인 죽림의 인장균열지 상부가 14 cm, 하부가 10 cm로 나타났다. 땅밀림지로부터 능선부는 땅밀림으로 붕괴되거나 영향을 받지 않은 토양으로 토양 깊이 10 cm까지 토양용적밀도는 최대 10.6 kgf/cm<sup>2</sup>를 나타내었으며, 땅밀림 발생 산지 중복부의 인장균열지 하부는 최대 3.2 kgf/cm<sup>2</sup>로 이보다 낮았는데, 이는 땅밀림으로 인한 견



**Table 3. The volume density of the tensile crack part in the landslide area.**

Soil depth(cm) / Soil hardness (kgf/cm <sup>3</sup> )	Normal site (control site)	Tensile crack on the top		Tensile crack in the bamboo field		Groundwater spill point
		1	2	1	2	
0	0.5	0.5	0.2	0.3	0.2	0.3
5	9.0	4.5	0.2	0.3	0.2	0.3
10	9.0	10.6 (9.0 cm)		5.2	2.0	13.0 (8 cm)
15	12.5 (12 cm)		0.2	9.6 (14 cm)		
20			0.2			
25			0.2			
30			0.2			
40			3.0			
50			2.5			
60			3.2 (55 cm)			
Soil depth (cm)	12	9.0	55	14	10	8

밀도의 파괴로 인한 토양용적밀도의 저감에 따른 결과(Krag et al., 1986)로 사료된다. 땅밀림 붕괴지 하단부의 죽림지 상부와 하부는 각각 최대 토양용적밀도는 9.6 kgf/cm<sup>2</sup>, 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났는데, 붕괴로 인해 토양의 와해와 교란으로 인해 토양용적밀도는 급격히 낮아지는 것으로 나타났다.

## 결론

본 연구는 진주시 집현면에서 발생한 땅밀림지의 지질, 지형, 물리적 특성 등의 특성을 분석하여 땅밀림 발생 피해방지를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 실시하였다. 조사지역은 1982년 1차 땅밀림이 발생하여 인장균열(폭 30~40 cm)이 발생하였으며, 복구하지 않은 채 시간이 경과하여 현재 폭 2.3 m, 깊이 1.2 m 이상 확대되었으며, 이로 인해 추후 집중호우 등으로 인한 땅밀림 진행 시 인근지역의 거주민과 가옥에 피해를 발생시킬 우려가 커 복구대책을 수립할 필요가 있다. 또한, 땅밀림지와 대조구의 위치에 따라 토양에 사질과 점토함량이 다른 것으로 나타나 이질적인 토양으로 조성된 지역으로 땅밀림에 취약한 토양특성을 나타내었다. 아울러 조사대상지는 지하수에 의한 전형적인 땅밀림형 산사태 지역으로 유형은凸상미근형형으로 붕적토땅밀림형 산사태에 해당하고, 땅밀림은凸부에서 발생되었다. 이 지역의 땅밀림지는 산사태위험등급의 3~5등급과 등급의 지역이 대다수 포함되어 일반적인 산사태와는 차이가 있는 것으로 나타나 타 지역의 땅밀림지의 분석시 산사태위험등급의 분석을 통한 산사태위험등급이 낮은 지역에 대한 땅밀림의 특징 및 위험성을 고려한, 땅밀림 위험지도에 대한 검토가 필요할 것으로

사료된다. 땅밀림은 지하수 유동방향과 동일한 방향으로 진행되어 땅밀림의 진행 방향을 고려하여 경계 피난 등 산림재해로 인한 피해를 예방할 수 있도록 복구방법을 강구할 필요가 있다. 아울러 이 연구를 통해 1차 땅밀림 발생 후 완전하게 복구하지 않은 상태에서는 땅밀림이 재발생한다는 사실에 주지해, 땅밀림 발생지는 그 발생원인에 대한 지반조사를 실시한 후 복구하여야 하며, 땅밀림지와 연결한 지역에 거주민이 있는 경우에는 즉각적인 시추조사 및 안정성 검토를 통해 복구하여야 한다. 특히 예산부족 등 이유로 미복구시 땅밀림으로 발생한 인장균열의 지속적인 모니터링을 통해 주민의 경계피난 대책을 강구하는 연구가 필요하다고 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는‘경상남도 진주시’ 및 ‘한국임업진흥원(과제번호: 2021347B10-2123-CD01)’의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

## References

- Anderson, M.G. and Richards, K.S. 1987. Slope stability. Wildly and Sons. pp. 210.
- Auzet, A.V. and Ambroise, B. 1996. Soil creep dynamics soil moisture and temperature conditions on a forested slope in the granitic Vosges Mountains. *Earth Surface Processes and Landforms* 21(6): 531-542.
- Choi, K. 2018. Geological characteristics of land creep in Korea. *Korean Society of Forest Environment Research* 21: 108-117.

- Jau, J.G., Park, S.J., Son, D.S. and Joo, S.H. 2000. The effects of geological and topographical features on landslide and land-creep. *Journal of Korean Forest Society* 89(3): 323-334.
- Jeong, J.H., Koo, K.S., Lee, C.H. and Kim, C.S. 2002. Physico-chemical properties of Korean forest soils by regions. *Journal of Korean Forest Society* 91(6): 694-700.
- Kim, C.S., Park, J.H., Cho, H.S., Ma, H.S. and Lee, G.S. 2015. Physiochemical properties of organic and soil horizon in restoration area following forest landslide by creeping soils. *Journal of Agriculture & Life Science* 49(6): 27-35.
- Kim, H.G. 2004. Slope stability and characteristics of shallow landslide occurred in granite hillslopes. Seoul. KyungHee University.
- Korea Forest Service. 2013. A precedent investigation of the foreign and in the country status of landslide by land creeping, rehabilitation and management. Korea Forest Service Report. pp. 189
- Krag, P., Higginbotham, K. and Rothwell, R. 1986. Logging and soil disturbance in southeast British Columbia. *Canadian Journal of Forestry Research* 16(4): 1345-1354.
- Lee, M.K. and Kim, G.W. 2011. A comparison of landslide features using aerial photos. KSEG Conference April 7-9. 2011, Jeju. 227-228.
- Lee, M.S., Park, J.H. and Park, Y.S. 2019. Analysis of characteristics using geotechnical investigation on the slow-moving landslides in the Pohang-si area. *Journal of Korean Forest Society* 108(2): 233-240.
- Matsukura, Y. and Tanaka, Y. 1983. Stability analysis for soil slips of two grass slope in southern Abukuma mountains. *Japanese Geomorphological Union* 4: 229-239.
- Montgomery, D.R., Sullivan, K. and Greenberg, H.M. 1998. Regional test of a model for shallow landslide. *Hydrological Processes* 12: 943-955.
- Park, J.H. 2015. Analysis on the characteristics of the landslide - with a special reference on geo-topographical characteristics. *Journal of Korean Forest Society* 104(4): 588-597.
- Park, J.H. and Park, S.G. 2019. The geology and variations of soil properties on the slow—moving landslide in Yangbuk-myun Gyungju-si Gyeongsangbuk-do. *Journal of Korean Forest Society* 108(2): 216-223.
- Park, J.H., Choi, K., Lee, S.G., Ma, H.S., Lee, J.H. and Woo, B.M. 2003. Analysis on the characteristics of the landslide in Nasamri(I) - with a special reference on geo-topographical characteristics. *Journal of Korean Forest Society* 92(3): 246-253.
- Park, J.H., Choi, K., Bae, J.S., Ma, H.S. and Lee, J.H. 2005. Analysis on the characteristics of the landslide in Maeri (I) - with a special reference on geo-topographical characteristics. *Journal of Korean Forest Society* 94(3): 129-134.
- Park, J.H. 2018. What's land creep. *Journal of Korean Society of Forest Environment Research* 21: 96-107.
- Park, J.H. 2019. Analysis of various kinds characteristics on slow-moving landslide in Pohang-si area. *Journal of Agriculture & Life Sciences*. 53(4): 1-11.
- Park, J.H., Seo, J.I. and Lee, C.W. 2019. The topography characteristics on the land creep in Korea. *Journal of Korean Forest Society* 108(1): 50-58.
- Park, J.H., Ma, H.S. and Park, S.G. 2021. Actual conditions on the land creep areas by the analysis of satellite imagery. *Journal of Agriculture and Life Science* 55(1): 57-64.
- Takaya S. 2017. Facts of landcreep. Nokdo Publication. pp. 255.
- Tomio, H.Z., Sohei, A., Takeshi, N. and Tosihiko, S.T. 1990. Landslide disaster in temanggung indonesia. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering* 42(6): 57-59.
- Varnes, D.J. 1978. Slope movement types and processes. *Transportation Research Board Special Report*. pp. 11-33.
- Woo, B.M. 1992. Erosion control and conservation. Hayng-munsa. pp. 310.

---

Manuscript Received : October 5, 2021

First Revision : October 25, 2021

Second Revision : December 23, 2021

Third Revision : January 8, 2022

Accepted : January 10, 2022