

물리탐사를 활용한 땅밀림 원인분석의 사례적 연구

박재현^{1*} · 탁경미¹ · 임국목²

¹경상국립대학교 환경산림과학부, ²(주)한세지반엔지니어링

A Case Study on the Cause Analysis of Land creep Using Geophysical Exploration

Jae Hyeon Park^{1*}, Gyeong Mi Tak¹ and Kook Mook Leem²

¹Division of Environmental and Forest Science, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

²Hanse GeoEngineering Co., Ltd., Nonsan 32911, Korea

요약: 최근 기후변화와 지질환경변화로 인해 산지토사재해의 발생 빈도가 급증하는 경향이 보고되고 있다. 최근 국내에서 땅밀림이 빈번하게 발생하고 있는 만큼, 땅밀림지의 체계적이고 효율적인 복구 및 관리가 필요하다. 본 연구는 경기도 양평군 개군면 자연리 산 4-1에 발생한 땅밀림에 대하여 물리탐사기법을 통해 재해취약성을 파악하고, 파괴 지반의 전반적 지질구조를 규명하여 안정성을 검토하는 것이 목적이다. 또한, 시추조사도 함께 실시하여 측정된 데이터의 신뢰성을 검증하였다. 연구 결과, 토사층과 풍화대의 상부에 저비저항 이상대가 분포하며, 이 구간은 탐사측선 50-120 m 구간으로 땅밀림현상의 주요 지시자인 인장균열이 관찰되는 연경도가 낮은 땅밀림구역으로 확인되며, 토사층 내에 불연속면 잔존 가능성을 추정 후, 활동연약대를 안정시키는 복구방법을 강구하였다. 따라서 국내 현실에서 땅밀림 위험지를 파악하여 땅밀림 발생 징후에 대한 지속적인 모니터링을 통해 경제적, 사회적 피해를 줄일 수 있는 대책마련을 위한 연구가 필요하다고 사료된다.

Abstract: Recent reports have indicated a rapid increase in the frequency of sediment disasters due to climate change and other changes in the geological environment. Given this alarming situation and the recent increase in the frequency of land creep in Korea, systematic and efficient recovery and management of land creep areas is essential. The purpose of this study is to identify disaster vulnerability by conducting a physical exploration of land creep in San 4-1, Jayeon-ri, Gaegun-myeon, Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do, and examine stability by identifying the overall geological structure of the affected ground. In addition, drilling surveys are conducted to verify the reliability of the measured data. The results of the study reveal that low specific resistance abnormalities are distributed in the upper part of the soil layer and weathering zone and that this section is a 50-120 m exploration line. It is also confirmed to be a low-hardness ground area where tensile cracks are observed. Therefore, there is a need for research focused on developing measures to reduce economic and social damage within the domestic context by continuously monitoring indicators of land creep and identifying land creep risks.

Key words: land creep, geophysical exploration, tension crack, electrical resistivity method, seismic survey

서론


일반적으로 산지토사재해는 지질 환경과 기후 조건에 따라 다양한 원인으로 발생한다. 산지토사재해는 산악지대에서 흔히 발생하는 재해로, 산사태, 산사태와 관련된

토사유출, 땅밀림, 암반붕괴 등이 포함된다. 최근 몇 년 동안 기후변화와 지질환경변화로 인해 산지토사재해의 발생 빈도가 급증하는 경향이 보고되고 있다.

세계기상기구(WMO)는 강력한 폭염과 파괴적인 홍수 등 극단적인 기상 조건이 이제 ‘뉴노멀(new normal·새로운 표준)’이라고 경고하며, 전 세계 생태계와 지역사회가 황폐해지고 있다고 하였다(Matt, 2021). 이러한 극단적인 기상변이 재해 발생을 촉진할 수 있다. 특히 산지사면의 압력 변화, 비, 눈사태, 지진, 지하수 변동 등 복합적인 원인에

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

ORCID

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

의해 발생하는 산지토사재해는 산림의 파괴뿐만 아니라 그 피해가 광범위하여 인명, 재산 및 시설피해 등 연속적인 피해를 일으킬 수 있다(Stanley et al., 2017; Habumugisha et al., 2022). 또한, 토사재해 발생 빈도가 매년 증가하고 있으며, 도심지에서의 토사재해 발생은 많은 재산·인명피해를 초래한다(MOLIT, 2017). 토사재해는 산지비탈면에서 주로 발생하는 산사태, 토석류, 암설류, 붕락, 땅밀림 현상 그리고 더 나아가 광역 단위의 침식 및 세굴 등과 같은 현상을 통틀어 가리킨다(Kim, 2001).

국내외의 자연사면에서 발생하는 땅밀림은 활동면 위의 토괴가 일체로 활동면을 경계로 하부로 미끄러지는 형태로 이동 토괴의 두께는 10~20 m, 폭은 두께의 5~10배, 길이는 폭의 1.2~1.5배로 규모가 크고, 이동속도는 0.01 mm/day로 매우 느린 특징을 가지고 있다(Varnes, 1984; Jeon, 2011). 땅밀림 발생의 대표적인 원인으로는 지질 및 지형 특성을 들 수 있으며, 기반암의 고유 특성, 불연속면 및 단층 파쇄대의 발달(Tomio et al., 1990; Park et al., 2003; Park et al., 2005; Kim, 2004), 점토 입자의 변형 특성(Culling, 1963; Jau et al., 2000), 주변 산지 수계 발달 그리고 동결 융해 침식이나 응설, 토양온도의 영향 등이 있다(Shunhi, 1978; Auzet et al., 1996).

Park et al.(2022)은 집중호우로 인해 땅밀림이 발생한 지역에 대하여 재발생된 땅밀림의 특성을 분석하였으며, Kim et al.(2021)은 2014년 충남 태안에서 발생한 땅밀림을 대상으로 전기비저항 자료를 이용하여 점토광물의 함유량을 추정하는 연구를 수행하였다. 그리고 Ham et al.(2003)은 전기비저항 탐사와 시추결과를 이용하여 각 데이터의 연관성 및 물리탐사기법의 신뢰성을 도출하였고, Oh and Sun(2004)는 표준관입시험의 N치와 전기비저항분포의 비교를 통해 대개 전기비저항이 낮은 경우에 N치도 낮은 범위를 보이는 것을 확인하여 필댐의 안정성을 평가하였다. 이와 같이 선행연구를 종합하면 물리탐사기법은 대체적으로 단일 기법으로 획득한 데이터와 시추결과를 비교하고 있으며, 여러기법의 장단점을 보완하여 시행하는 복합적인 물리탐사를 적용한 연구가 필요한 실정이다.

땅밀림발생을 조기에 발견하는 것은 극히 어려운 일이므로 그 변화의 특성을 파악하는 방법을 강구하는 것은 땅밀림연구의 주요 관건이다(Park et al., 2022). 산지토사재해공사와 관련하여 지반 특성 파악을 위해 주로 수행되는 시추 조사는 명확하고 확실한 지반정보를 제공한다는 장점이 있지만, 좌표상 지점(point)마다 수행되기 때문에 현장 전체의 지반특성 파악이 어렵다. 반면, 중력파, 탄성파 등을 이용하는 물리탐사(Geophysical Exploration)는 조사대상지를 교란하지 않고 비교적 저렴한 비용으로 넓은 면적에 대

해 연속적인 정보를 취득할 수 있는 간접적인 조사방법으로 시추공이나 노두조사 등 직접적 방법의 한계인 연속적 정보 획득이 불가능한 점을 해결할 수 있다(Park et al., 2013). 일반적으로 전기비저항탐사는 터널, 댐, 교량, 산지토사재해 우려지역 등 지질이상대, 단층대 및 파쇄대 파악 그리고 대수층(지하수)조사 중심이고 탄성파 탐사는 지질구조상대 파악 및 토사층, 풍화암, 기반암 등의 이상대 파악에 중점을 둔다. 즉, 낮은 비저항과 탄성파 속도를 갖는 영역일 경우에 산지토사재해에 취약할 가능성이 높기 때문에 두 종류의 물리탐사를 함께 시행하였을 경우에 상호 보완적 정보 제공이 가능하다.

본 연구는 과거 작업로 개설 및 상부 산지의 인위적 개발로 인해 땅밀림이 발생한 곳으로 작업로 부근인 배수로 하단부로 지하수가 유출되면서 광범위하게 땅밀림이 일어난 지역에 대한 취약성을 파악하고, 붕괴원인 규명에 있어서 파괴 지반의 전반적 지질구조를 규명하여 안정성 해석을 바탕으로 지반변화 활동연약대를 분석하여 향후 땅밀림 발생 징후 지역에 대하여 산지환경을 고려한 복구 관리방안을 제안하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구 대상지

본 연구는 경기도 양평군 개군면 자연리 산 4-1 일원의 자연사면으로 비탈어깨돌림배수로로 활용되는 작업로 부근 배수로 하단부로 지하수가 유출되면서 횡방향으로 인장균열 및 단차가 생기며 땅밀림이 발생한 현장으로 면적은 1.76 ha이다(Figure 1). 또한, NGII에서 제공하는 고해상 항공사진(1:5000)과 땅밀림 현장답사시 촬영한 드론영상을 활용하여 분석한 결과 산림훼손이 명확히 나타나고 있음을 확인하였다(Figure 2). 연구 대상지는 2010년 작업로 설치 등 개발로 인해 산림훼손이 발생한 이후, 지속적으로 땅밀림이 발생되고 있다. 산각부 경각지 방향으로 산지부 작업로 개설 및 송전탑 등 산지개발에 의해 발생한 땅밀림 재해로 산지 산각부가 N10°-15°E 방향으로 인장균열 및 단차가 깊게 관찰되었으며, 이러한 단차는 산지 산각부 즉, 2~10부 능선에서 8개 이상이 다발적으로 발생하여 하단부로 붕괴토가 무너진 상태이다. 특히 인장균열은 부채꼴모양인 활꼴로 붕괴되었으며, 산각부에서 작업로 방향으로 확대될 가능성이 있으며, 이러한 사면 형태는 2차 땅밀림의 잠재적 발생 가능성을 배제할 수 없다(Figure 3).

지질은 So et al.(1989)에 의해 발간된 1:50,000 「이포」 도폭을 근거로 파악하였다. 그 결과 선캠브리아기의 호상흑운모편마암이 분포하고, 시대미상의 반상섬장암이 일부 관입

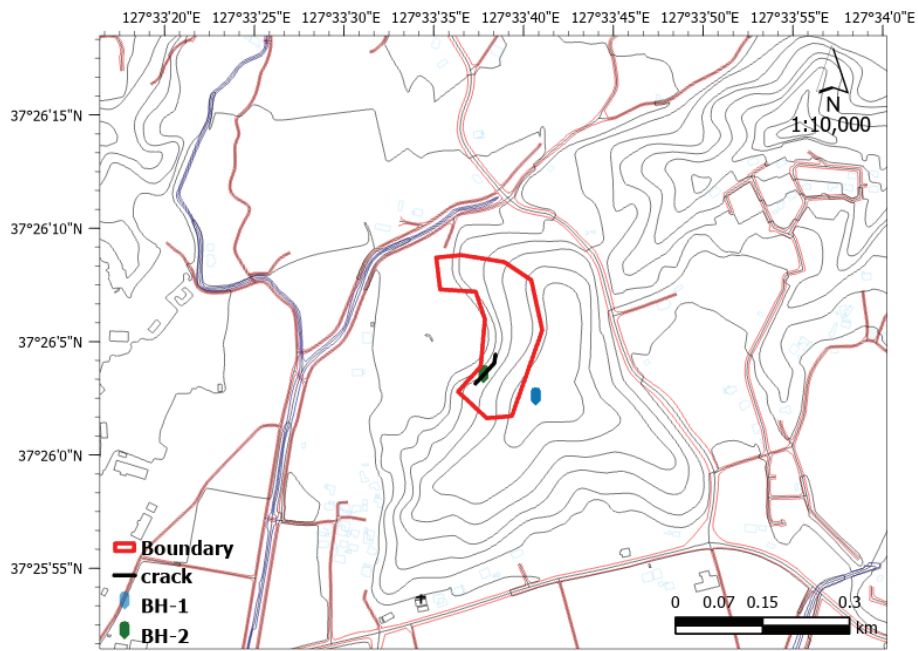


Figure 1. Topographic map showing the location of land creep boundary, crack and bore hole in the study area.

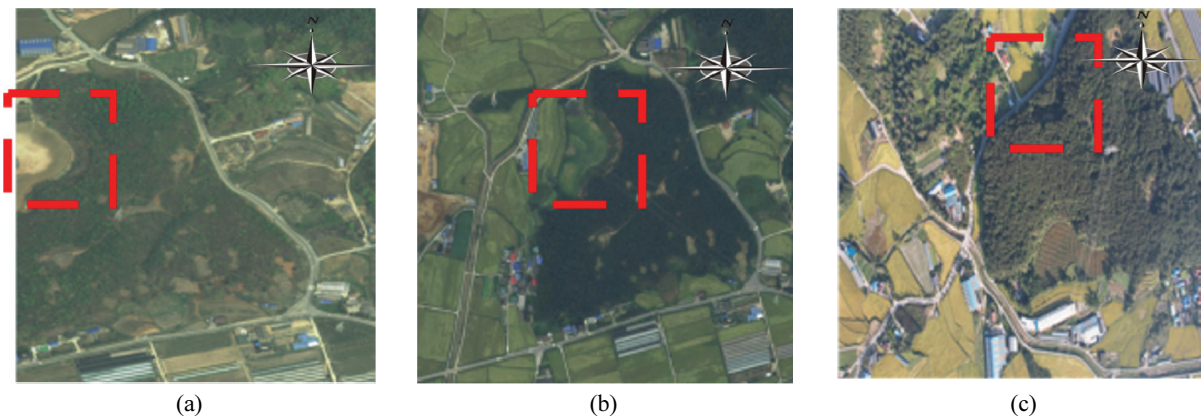


Figure 2. Aerial photographs (a=2010, b=2012) and drone photograph(c=2022) of the research site(1:5000).



Figure 3. The actual condition of slopes of hillsides that have collapsed due to land creep.

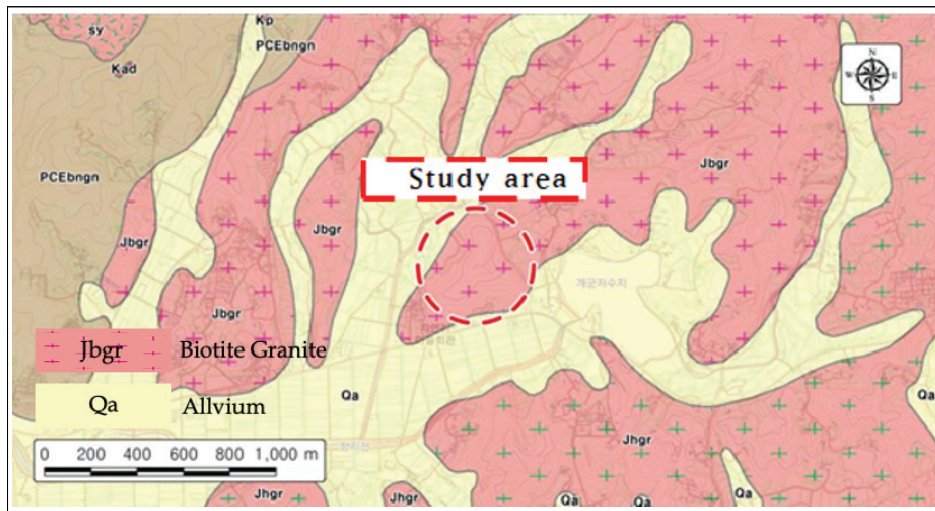


Figure 4. Geological map around the study area(from So et al., 1989).

하며, 중생대 쥐라기의 각섬석흑운모화강암과 흑운모화강암으로 구성된다. 백악기의 암맥류와 페그마타이트가 관입하고, 최상부는 신생대 제4기의 충적층으로 조사지역 인근에 위치한 하천을 따라 분포한다. 충적층은 점토, 모래, 자갈로 구성되며, 상기의 모든 지층을 부정합으로 피복하고 있다(Figure 4).

2. 연구 방법

연구 대상지 파괴사면에서 인장균열과 단차가 발견되어 깎기 비탈면의 토공 작업에 영향을 주는 특정 활동연약대를 따라 사면 하부 방향으로 땅밀림이 진행되는 것을 파악할 수 있다. 땅밀림이 발생하는 메커니즘(mechanism)은 연약부가 파괴됨에 따라 토층내 및 산지구조가 파괴되며 토층 내의 균열과 공극이 발생하면서 원래의 구조 교란 및 토층이 이동하여 미세지형이 형성된다. 국내의 연구에 따르면 지형도를 통해서도 땅밀림지 지형을 예측하는 데에 활용할 수 있다(Takaya, 2017; Park, 2018). 이처럼 상부사면에 비해 하부사면구간이 등고선이상현상으로 압축되는 것을 고려할 때, 지반의 토사층이 붕괴되는 조건을 가지고 있으므로 해당 사면에 대한 현장조사 및 분석이 필요하다.

본 연구는 현장조사와 실내조사를 실시하고 물리탐사(전기비저항탐사, 탄성과 탐사)를 수행하였다. 첫 번째로 현장조사에서는 조사부지 2개소에 시추조사를 실시하여 토질 성분, 암반의 역학적 특성 등을 파악하여 지층을 구분하였다. 또한, 시추조사와 병행하여 표준관입시험(SPT; standard penetration test)을 수행하였으며, 땅밀림의 지시자인 인장균열의 토양특성을 파악하기 위해 상단부 및 하단부와 대조구 토양 500 g을 채취하여 한국임업진흥원에 토양분석을 의뢰하여 분석하였다. 두 번째로 전기비저항 탐사와 굴

절법탄성과 탐사를 수행하였다. 물리탐사 위치는 현장조사를 수행한 시추공과 시추공 사이를 지나갈 수 있도록 배열하였다. 균열과 단차가 있는 구간의 직교한 방향으로 전기비저항 탐사를 실시하고, 측선방향으로 굴절법 탄성과 탐사를 통해 인장균열의 흔적에서 이어지는 활동연약대를 파악하여 분석하였다. Figure 5는 사면상부에서 하부까지 인장균열 및 단차가 관찰된 구간에 지층지질조사를 수행하기 위해 작성된 시추조사 위치를 표시하였고, Figure 5은 표준관입시험의 주상도이다.

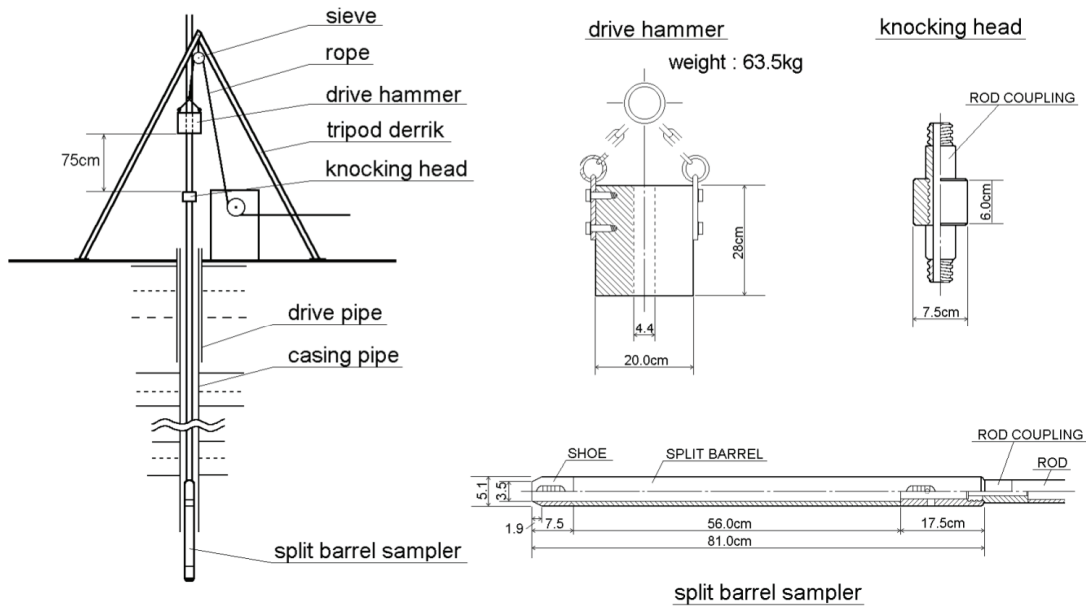
정밀한 시추조사를 위해 사용된 장비로는 고성능 유압수세식(POWER-4000S)을 사용하고 시추구경은 NX규격으로 시행하였다. 공벽붕괴 방지를 위해 풍화암까지 Casing을 삽입하였다. 표준관입시험을 통한 토양시료채취는 Spilt Spoon Sampler를 사용하였다. 채취된 시료를 면밀히 파악하여 토질조사와 물리탐사를 비교 분석하여 본 연구의 땅밀림 현황을 파악하도록 하였다. 또한, 지하수 유향유속시험을 통하여 땅밀림이 발생한 사면의 지반의 특성을 파악하였다.

일반적으로 토사 및 풍화암 비탈면의 안정성 해석시 사용되는 해석방법들은 한계평형이론을 적용하고 있으며, 본 연구의 비탈면 안정해석에서는 물리적 성질에 따라 표토, 풍화토, 풍화암, 연암으로 구분하여 해석하였다. 안정해석프로그램은 Talren 97을 사용하고, 해석방법은 Bishop 간편법을 활용하였다.

결과 및 고찰

1. N치를 활용한 지층의 경계 구분 및 특성

지층의 구성상태와 연암(기반암)의 암질 상태, 지하수



N value = blows/30cm, 50blows/cm

Figure 5. Standard Penetration Test Equipment(Yoon et al., 2010)

분포 상태 등을 파악하기 위하여 땅밀림이 발생한 인장 균열지 2개소에 시추조사를 실시하였다. 시추결과 BH-1 번 공의 지층의 구성은 다음과 같다. 표토층(실트질점토) 이 지표(0.0 m)로부터 1.0 m, 붕적층(점토질모래)이 1.0~ 6.0 m, 풍화토(실트질모래)는 6.0~24.0 m, 풍화암(암편쇄인 실트질모래)은 24.0~36.0 m로 약 12.0 m 두께로 분포하며, 아래는 흑운모화강암으로 이루어진 기반암이 36.0~37.0 m 로 분포하고 있다. BH-2번 공의 지층은 전 시추공에서 표 토층이 지표 아래로 1.0 m, 풍화토가 심도 1.0~24.5 m, 풍 화암이 24.5~38.1 m, 하부에는 흑운모화강암으로 이루어 진 기반암이 층후 1.9 m로 분포한다.

표준관입시험에 의해 얻어진 N치는 두 지역의 시추공 모두 풍화토층에서 각각 9/30~50/11(TCR/RQD), 7/30~50/12 (TCR/RQD)의 범위로 느슨-매우 조밀한 상대밀도를 보 였다. 아울러 지하수위는 BH-1에서 27.0 m, BH-2에서 20.4 m에서 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 지하수 유량 유속실험 결과 BH-1에서는 주 흐름방향이 180.2°, BH-2 에서는 314.1°로 땅밀림의 붕괴방향과 그 주변 경사가

낮은 우측사면으로 흐르는 것으로 나타나는 것으로 보 아 지하수 흐름방향에 따라 땅밀림이 발생하는 것으로 판단된다.

또한, 땅밀림지 인장균열의 토양특성을 파악하기 위 해 실시한 입도분석 결과는 Table 1과 같다. 표토층에 존재하는 인장균열 상단부의 경우, 토양성분 속 미사와 점토질의 함량이 높기 때문에 강우 시 침투가 어려워 지표수 유출로 빠르게 이동하는 반면에 하단부의 경우 에는 모래의 비율이 상당히 높은 것은 토심 속 공극이 크기 때문에 구조적인 강도가 낮으며, 강우 시 빠른 침 투와 유출속도가 낮은 입도구조이다. 이는 상단부와 하 단부에 존재하는 토양구조가 이질적인 것을 의미한다. 특히, 수문학적인 관점에서 땅밀림 유발요건인 비탈면 의 안정에 영향을 끼치는 지하수는 강우, 토양수분, 유출 등 수문 순환을 구성하는 여러 인자 중 하나로, 공극수 압의 변화에 직접적인 영향을 주는 것으로 알려져 있다 (Oh et al., 2022). 따라서 이러한 이질적인 토양구조로 조 성된 지역은 지하수 집수현상이 어렵기 때문에 토양하중

Table 1. Soil analysis results of the Study area.

Location	Grain size analysis(%)			Soil texture	pH
	Sand	Silt	Clay		
Crack Topsoil	17.6	46.7	35.7	Slity Clay	4.95
Soil below crack	66.2	27.4	6.4	Sandy Loam	5.37
Normal site	29.2	59.9	10.9	Slity Loam	4.15

Table 2. Results of Boring Investigation Data.

No.	Stratum division	Depth (GL.-m)	Thickness (m)	Geological composition	N value (TCR/RQD)
BH-1	Topsoil layer	0.0-1.0	1.0	Silty clay	-
	Colluvium	1.0-6.0	5.0	Silty sand	10/30-21/30
	Sedentary deposit	6.0-24.0	18.0	Silty sand	9/30-50/11
	Weathered rock	24.0-36.0	12.0	gravel and Cobble stone mixed complex	50/10-50/3
	bed rock	36.0-37.0	1.0	Biotite granite	(95/45)
BH-2	Topsoil layer	0.0-1.0	1.0	Silty clay	-
	Colluvium	1.0-24.5	23.5	Silty sand	7/30-50/12
	Weathered rock	24.5-38.1	13.6	gravel and cobble stone mixed complex	50/10-50/5
	bed rock	38.1-40.0	1.9	Biotite granite	71/52

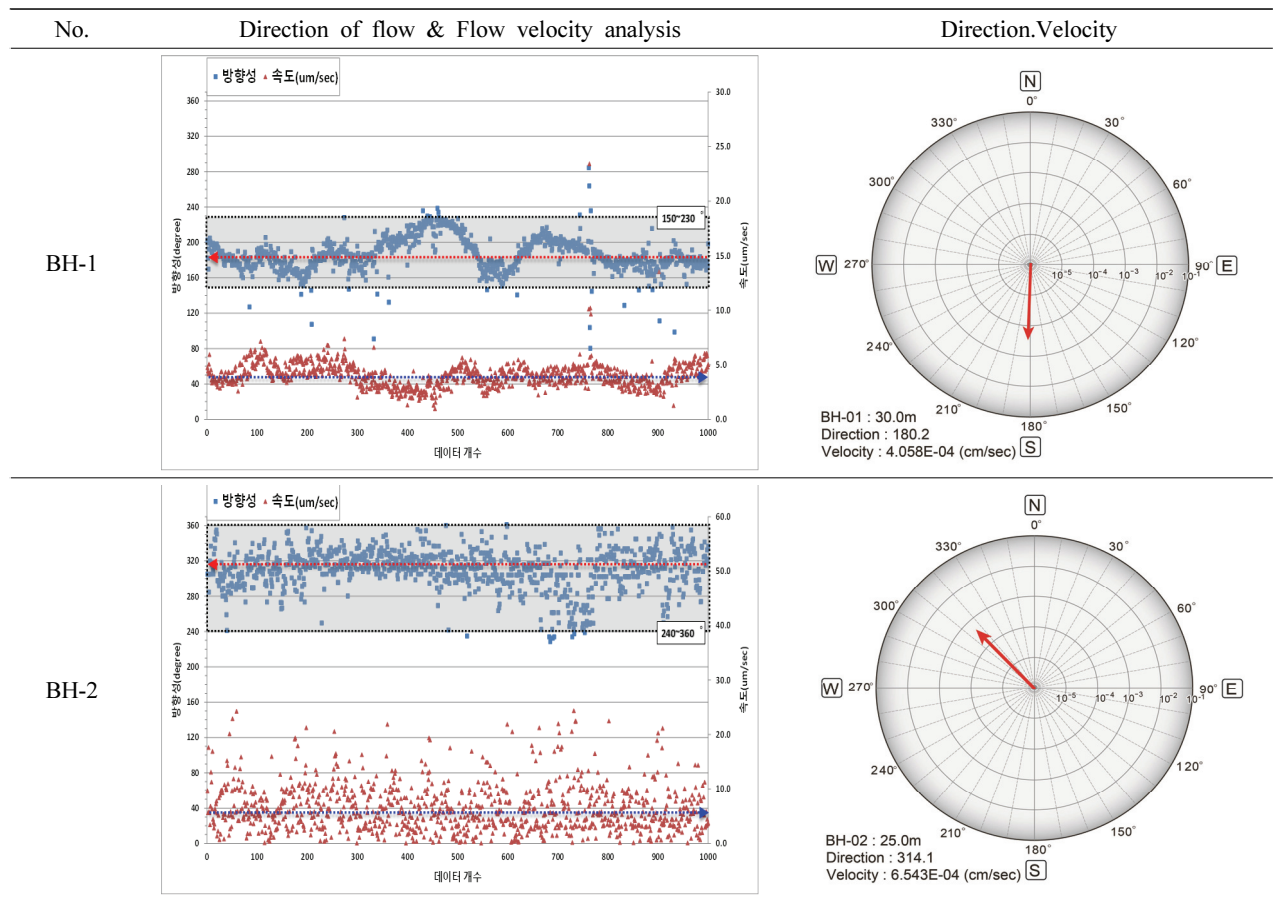


Figure 6. Results of groundwater flow-direction analysis

이 증가하여 땅밀림이 가속화되어 지반이 무너진다 (Park et al., 2018). 지층의 점착력(Cohesion) 및 내부마찰각(Friction Angle)을 산정하기 위하여 시추 조사와 병행하여 총 2회의 현장 시추 공내전단시험을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다(Table 1). Figure 7은 시추조사 결

과이며, Figure 8은 땅밀림 유발인자 중 관계가 깊은 지하수 유속과 주 흐름방향을 실험한 결과이다.

시추조사, 표준관입시험, 현장투수시험 등을 종합한 결과로 연구지역은 암석의 풍화정도가 많이 진행되어 땅밀림에 취약한 지질을 나타낸다(Tomio et al., 1990; Kim et

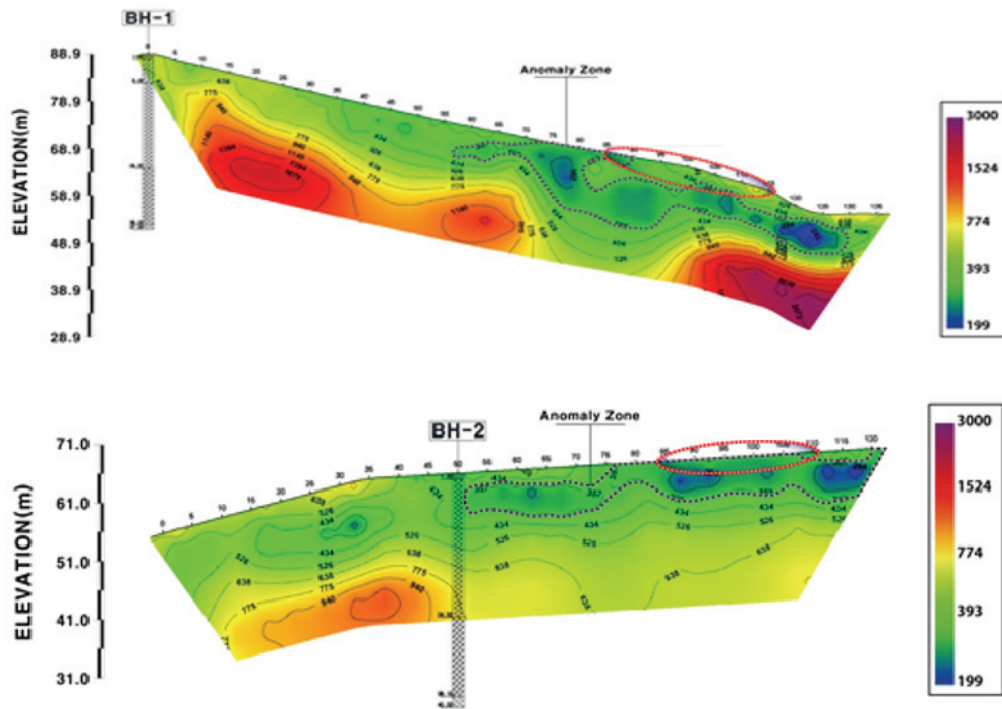


Figure 7. A graph illustrating the comparison and analysis of the results from drilling investigation and electrical resistivity survey to depict the zone of weak activity in the land creep area.

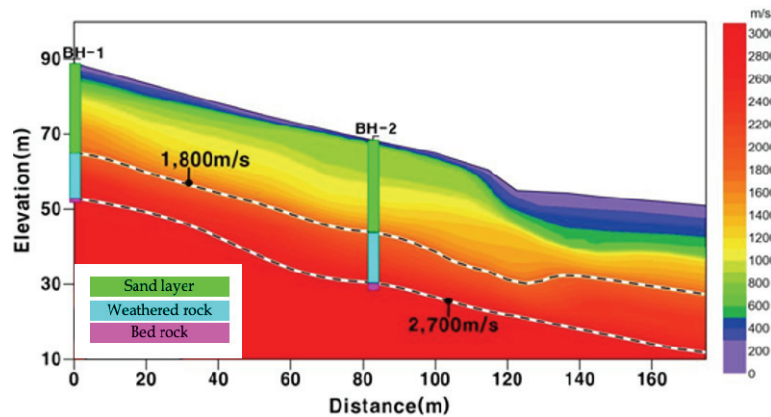


Figure 8. Results of refraction seismic survey.

al., 2015; Takaya, 2017; Choi, 2018). 본 연구 대상지는 토사 층이 18.0~23.5 m로 매우 두껍게 분포하고 있으며, 실트질 성분을 함유하고 있다. 또한, 기반암 출현 심도가 36.0~38.1 m로 그 상부 붕적토가 현저히 깊은 것으로 판단할 때, 땅밀림에 취약할 것으로 사료된다.

2. 시추조사결과를 반영하여 지반의 특성 및 변동성 파악 (고-저비저항이상대 분석)

인장균열지점에 설치한 시추조사 2개소(BH-1, BH-2) 각각 수직하게 측선(R-1, R-2)을 설정하여 토공 작업에 영향

을 주는 이상지질구조대, 연약대 등을 파악하기 용이하게 하였고, 탐사결과 해상도를 높이기 위해 전극 간격 5 m, 탐사연장은 각각 1번 135 m, 2번 120 m로 측정하였으며, 해석심도 25 m에 이르는 측선을 설정하여 수행하였다.

전기비저항탐사 결과는 다음과 같다. 측선 R-1의 전체적인 비저항의 분포는 173-2,765 Ω-m, 측선 R-2의 전체적인 비저항의 분포는 178-1,247 Ω-m로 다양하게 분포되어 있으며, 토사 및 풍화대로 인해 상부심도에서는 저비저항대가 우세하게 분포하며 하부심도로 갈수록 기반암에 의해 고비저항대가 나타나고 있다. Figure 7에서 현장조사에서

관찰된 인장균열의 위치를 땅밀림 발생구역을 도시하였다.

시추결과, 상부 토사층의 심도는 약 20.8(18.0-23.5) m 이고, 이 구간의 측선거리는 약 53-125 m 구간에 전기비저항치는 357 Ω-m이하의 저비저항이상대(Anomaly Zone)가 나타나는 것으로 판단된다. 한편, 저비저항이상대는 땅밀림 발생구간을 중심으로 분포한다. 특히, 표준관입시험 결과에서 지표 하부 18.0-24.0 m에서 상·하부보다 상대적으로 낮은 N치를 보였다. 본 연구 지역의 저비저항이상대구간은 상부에서 나타나며, 땅밀림 발생으로 인해 지반침하가 심화되고 깊은 토사층의 습윤하고 느슨한 지반상태의 영향으로 연약대가 분포하는 것으로 판단된다.

굴절법탄성파탐사는 수신기 간격 5 m, 측선거리 175 m로 총연장 175 m로 설정하여 수행하였다. 각 지층의 탄성과 속도값은 시추조사 자료를 고려하여 토사층은 1,800 m/sec 이하, 풍화암층은 1,800-2,700 m/sec, 기반암이 2,700 m/sec 이상값을 적용하였다. Figure 8에서 나타낸 바와 같이 조사 지역의 탄성과 속도는 하부로 갈수록 점이적인 속도 증가를 보였으며, 탄성과 속도 2,700 m/s이상의 기반암의 출현 심도는 GL- 33.86-39.52 m으로 두꺼워지고 있는 결과와 부합한다. 땅밀림의 영향으로 사면 상부에서는 인장균열 및 지반침하가 발생하고 하부 구간은 압축현상에 의해 지반변형이 발생하여 토사층이 두꺼워지고 있는 것으로 사료된다.

이와 같이 연구대상지의 땅밀림 현상의 주요 지시자인 인장균열은 조사 구간의 상부사면 내에 집중되어 있었으며, 저비저항이상대를 형성하고 있는 토사사면에 잔존해

있는 불연속면과 매질의 특성이 또다른 땅밀림을 유발할 가능성이 있다.

3. 비탈면 안정해석단면 선정

비탈면 안정성 검토를 위한 해석단면은 시추조사와 굴절법탄성과 탐사에서 구분한 지하경계면, 그리고 전기비저항 탐사에서 파악한 지질연약대 및 땅밀림 현상의 주요 지시자인 인장균열이 발생한 지점 등 땅밀림 발생현황을 고려하여 대표단면을 선정하였다(Figure 9). 이 단면을 기반으로 연약지반의 안정화 대책을 검토하여 안전율을 결정하였다.

일반적으로 토사 및 풍화암 비탈면의 안정성 해석시 사용되는 해석방법들은 한계평형이론을 적용하고 있다. 땅밀림지의 지층은 지반조사와 실내시험 결과를 분석하여 붕적층, 풍화토, 풍화암, 기반암으로 구분하고, 우기시 안정해석은 강우 및 토질 특성을 고려한 침투해석을 실시하여 간극수압을 안정해석에 반영하였다(Figure 10). 그 결과, 우기시 기준안전율을 만족시키지 못해 불안정한 것으로 나타났다. 이는 산각부 콘크리트배수로를 따라 강우 시 빗물의 유입과 흐름이 나타나며, 땅밀림으로 인한 인장균열 및 단차가 발생지 하부 댐지부로 지하수가 모이면서 하단부가 붕괴할 수 있는 것으로 이는 산각부에 붕괴가 발생하는 현상과 일치한다.

비탈면 안정을 위한 보강공법은 활동가능성이 있는 비탈면이나 이미 활동이 진행된 비탈면의 재활동을 방지하

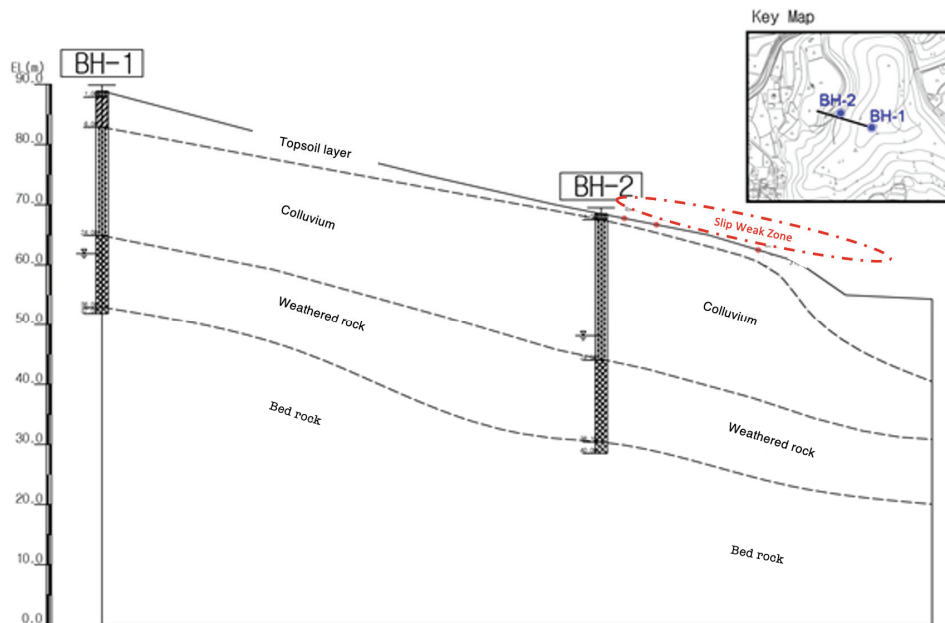


Figure 9. Reconstruction of slope stability assessment cross-section based on ground investigation results.

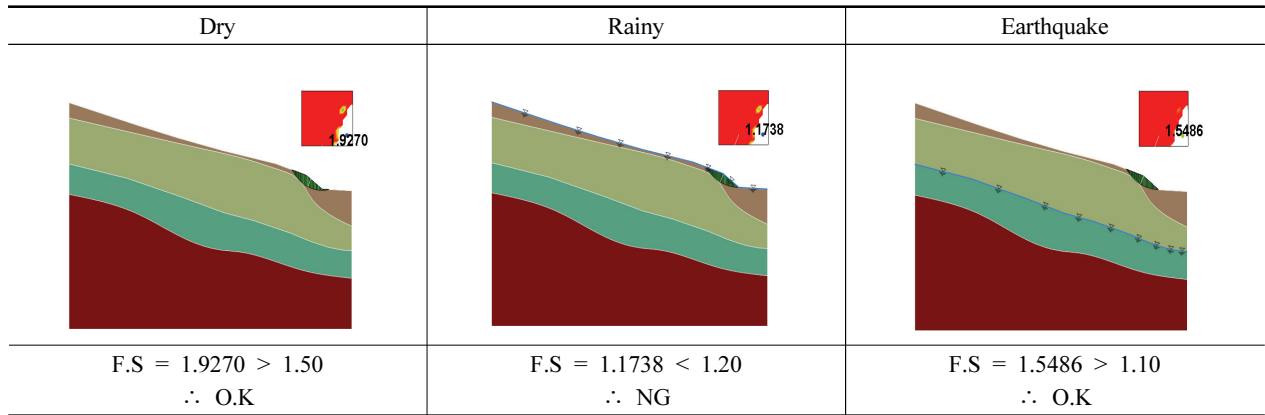


Figure 10. Slope stability review results.

기 위하여 취할 수 있는 인위적이고 기술적인 대응 방안을 모색하는 것으로서, 크게 안전을 증가법과 안전을 유지법으로 분류된다. 비탈면 보호공법 중 하나인 안전을 증가법의 여러 방법 중에서 활동이 예상되는 취약부를 완전히 제거하는 것은 토공량 증가, 산림환경훼손 등의 이유로 적용이 어려운 공법은 배제하고 땅밀림의 활동력 감소와 활동 저항력 증가법에 대하여 적용성 검토를 수행하였다. 두 번째로, 안전을 유지법 중에서는 지하수 용출을 고려하여 배수공을 적용하는 것으로 계획하고 추가로 표층안정을 위한 보호공법에 대한 검토를 수행하였다.

본 연구의 땅밀림 대상지인 경기도 양평군 개군면 자연리 산 일원의 땅밀림지에서 붕괴된 붕괴토는 땅밀림이 발생한 산각부에 붕괴된 상태로 남아있으므로 건기 시, 우기 시 비탈면 안정을 위한 검토구간은 국지성 집중호우에 의해 표면부 토층활동이 지속적으로 발생될 것으로 예상되고 토층의 심도가 깊으므로 비탈면 대책공법이 필요하다고 판단된다. 특히, 본 연구 대상지의 땅밀림은 하단부로 확장되면서 작업로 및 배수로의 붕괴로 인해 횡배수공을 통한 지

하수 배제가 필요한 상황에서, 집수정 설치의 지하수 배제 및 관리에 중요한 역할을 할 수 있다. 현장 현황을 바탕으로 비탈면의 안정성을 고려하여 기울기완화공법과 쏘일네일링공법을 평가한 결과, 쏘일네일링공법이 더 적합하다는 것으로 나타났다. 기울기완화공법은 기존 비탈면의 기울기를 완화시키는 방법으로, 안정성을 향상시키는 데 도움을 줄 수 있으나 비탈면이 연약한 지반에 위치하면 재차 파괴가 발생할 가능성이 높아질 수 있다. 이러한 상황에서 결국 추가적인 안정성 확보를 위해 역지공법이나 앵커공법과 같은 보강 방법을 병행해야 하는 사례가 많다. 반면에 쏘일네일링 공법은 비탈면의 안정성을 향상시키는데 유용한 방법 중 하나로, 특히 비탈면이 연약한 경우 내적 취약점을 보강하는데에 효과적이다. 또한, 사토량이 막대하고 경제성, 환경성 침해를 고려하였을 때 비탈면 보강 작업은 자원과 비용을 많이 소비할 수 있다. 안정성을 고려한 비탈면 보강 작업에서 경제적이고 환경에 미치는 영향이 적은 방법을 적용하는 것은 중요한 고려사항이므로 쏘일네일링공법이 적합한 것으로 사료된다(Figure 11, Figure 12).

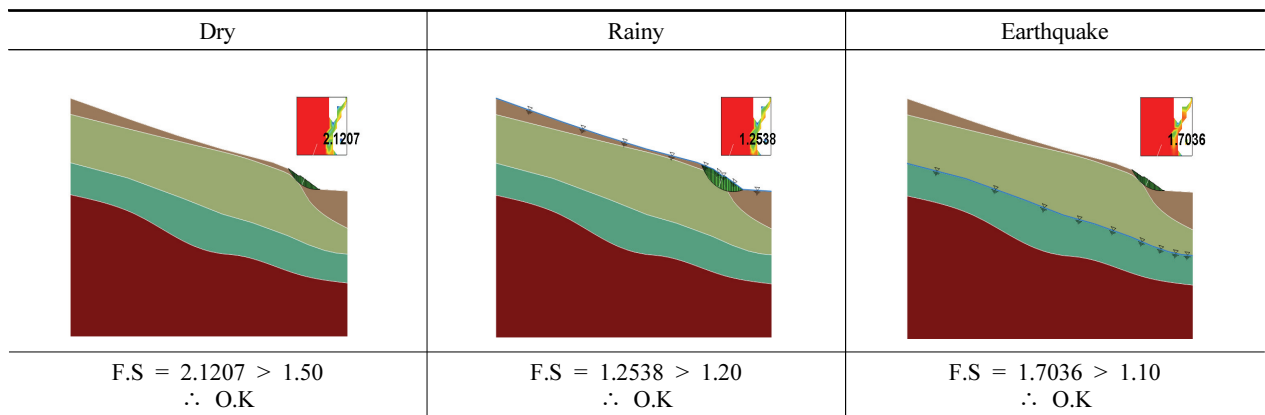


Figure 11. Slope stability according to the application of Slope Mitigation Method.

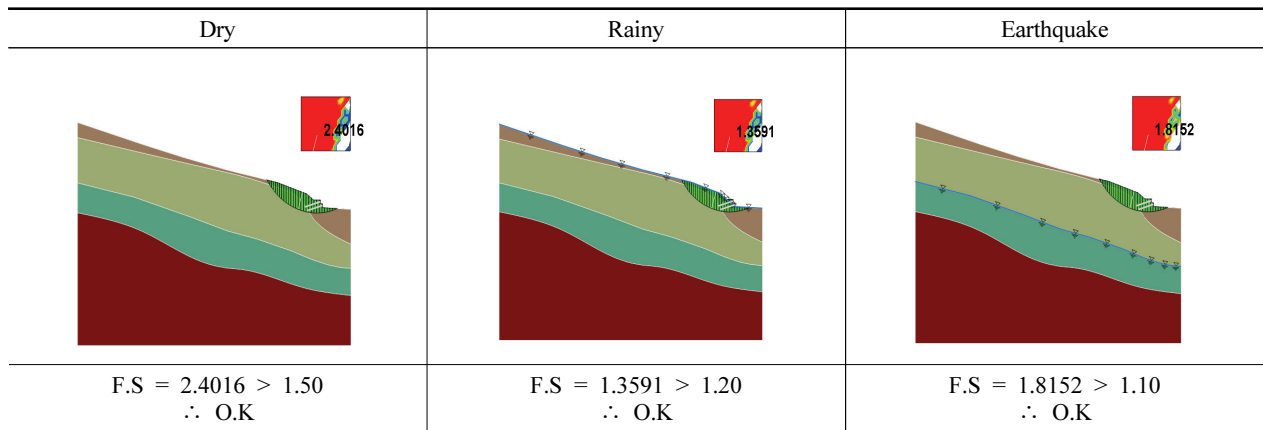


Figure 12. Slope stability according to the application of the soil nailing method.

결론

본 연구의 대상지는 행정구역상 경기도 양평군 개군면 자연리 산 4-1 일대에 위치하며, 조사지역은 200 m 내외의 구릉성 산지들이 불규칙하게 분포하여 대체로 완만한 지형을 보이는 사면으로 면적은 1.76 ha이다. 이 지역은 과거 작업로 개설 및 상부 산지의 인위적 산지개발로 인해 산각이 불안정하여 변곡점 구간은 강우로 뒹굴 형태로 변모하였다. 따라서 이 지역에 지표수가 지중침투하여 땅밀림 발생 및 진행속도가 증가할 것으로 우려된 지역이었다. 이와 같이 지질학적 취약요소를 내재하고 있는 산지는 강우와 같은 외부요인에 의해 사면파괴가 작용된다.

비탈면의 취약성 파악을 위해 전기비저항탐사를 실시한 결과, 토사층과 풍화대의 상부에 저비저항 이상대가 분포하는 것으로 확인되었다. 또한, 탐사축선 50~120 m 구간에 땅밀림현상의 주요 지시자인 인장균열이 관찰되는 땅밀림분포를 보였으며, 저비저항이상대와 일치한 것을 확인하였다. 시추조사와 굴절법탄성과 탐사, 표준관입시험, 토양입도분석, 현장투수시험 결과 상부 토사층의 평균 토심은 약 GL.-20 m 정도로 깊게 형성되어 있었으며, 연경도가 낮은 구간이 확인되었고, 이 구간의 전기비저항 값도 357 Ω·m 이하 값으로 토사층 내에 불연속면이 잔존해 있을 것으로 추정된다.

본 조사대상지는 산각부 콘크리트배수로를 따라 강우시 빗물의 유입과 흐름이 나타나며, 땅밀림으로 인한 인장균열 및 단차 발생지 하방으로 뒹굴부로 지하수가 모이면서 하단부에 산각부로 지하수 유출 및 습한 형태를 나타내고 있다. 이 지역은 국지성 집중호우에 의해 표면부 토층 활동을 배제할 수 없으므로 쓰일네일링공법을 적용하여 안정성을 확보할 필요성이 있다.

땅밀림의 경우 산지의 잦은 개발로 인해 발생추이가 증가하고 있다. 하지만 지반 상태나 매질의 특성을 파악하는데 효과적인 시추조사는 산림훼손, 비용, 공간의 제약 등의 문제가 있다. 따라서 추후 지형 및 지질 특성상 시추가 불가능한 지역일 경우 전기비저항 탐사와 굴절법 탄성과 탐사로도 충분히 땅밀림 규모 및 활동연약대를 추정할 수 있을 것으로 고려된다. 또한, 국내 현실에서 땅밀림 위험지를 파악하는 등 땅밀림위험등급지도를 제작하여 땅밀림 발생 징후에 대한 지속적인 모니터링을 통해 경제적, 사회적 피해를 줄일 수 있는 대책마련을 위한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 ‘한국임업진흥원(과제번호: 2021347B10-212 3-CD01)’과 양평군의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

Auzet, A.V. and Ambroise, B. 1996. Soil creep dynamics, soil moisture and temperature conditions on a forested slope in the granitic Vosges Mountains. France. Earth Surface Processes and Land forms 21(6): 531-542.

Choi, K. 2018. Geological characteristics of land creep in Korea. Korean Society of Forest Environment Research 21: 108-117.

Culling, W.E.H. 1963. Soil creep and the development of hillside slopes. The Journal of Geology 71(2): 127-161.

Habumugisha, J.M., Chen, N., Rahman, M., Islam, M.M., Ahmad, H., Elbeltagi, A., Sharma, G., Liza, S.N. and Dewan, A. 2022. Landslide susceptibility mapping with deep learning algorithms. Sustainability, 14(3): 1734.

- Ham, S. Y., Kim, H.S., Cheong, J.Y., Jang, S., Cha Y.H. and Ryu, S.H. 2003. Hydrogeological characteristics of Iryong area in Haman-Gun for developing bank-filtrated water. *Proceedings of KSEG Conference* pp.159-163.
- Iwata, S. 1978. Soil Creep Measurements in Khumbu. *Journal of the Japanese Society of Soil and Water* 40: 60-63.
- Jang, H.D. and Yang, H.S. 2010. An analysis of stability on rock slope by changing water level, Tunnel and Underground Space 20(1): 7-14.
- 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.
- Jeon, G.W. 2011. Erosion control engineering. Hyang-Moon Corp. Seoul. pp. 426.
- 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, G. N. 2001. Study on the method of the sediment disaster risk assessment of mountainous watershed using GIS. (Dissertation). Kangwon. Kangwon National University
- Kim, J.I., Kim, J.S., Lee, S.J., Cho, K.S. and Kim, J.W. 2021. Interpretation of electrical resistivity tomogram with contents of clay minerals for the land creeping area. *The Journal of Engineering Geology* 31(2): 187-197.
- Matt, M.G. 2021. Climate change: World meteorological organization sets 'New Norm' for extreme weather events. <https://www.bbc.com/korean/news-59115486>. (2021. 11. 01)
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT). 2017. Final Report on the Countermeasures and Defense Technology of Earth and Sand Disaster Customized to Urban Structure. pp. 538.
- Oh, S.H. and Sun, C.G. 2004. Analysis of Geophysical and Geotechnical SPT data for the Safety Evaluation of Fill Dam. *Journal of Geophysics and Physics Exploration* 7(3): 171-183.
- Park, C.H., Won, K.S., Byun, J.H., Min, D.H. and Yoon, H.K. 2013. The Investigation of Alluvium by Using Electrical Resistivity, Seismic Survey and GPR. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 29(9): 17-29.
- Park, J.H. and Lee, S.H. 2022. Analysis of Topography and Ground Characteristics of Landcreep Reoccurrence in the Yangpyeong area. *Journal of Korean Society of Forest Science* 111(2): 263-275.
- Park, J.H., Choi, K., Bae, J.S., Ma, H.S., 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., 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., Kim, S.Y., Lee, S.H. and Kang, H.B. 2022. Study on the characteristics of the slow-moving landslide(land creep) in the SanjiValley of Jinju. *Journal of Korean Society of Forest Science* 111(1): 115-124
- Stanley, T. and Kirschbaum, D.B. 2017. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Nature Hazards*, 87: 145-164.
- Stead, D. and Wolter, A. 2015. A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology. *Journal of Structural Geology* 74: 1-23.
- Takaya, S. 2017. Facts of land creep. Nokdo Publication. pp. 255.
- Tanaka, Y. and Kim, H.G. 2004. Slope stability and characteristics of shallow landslide occurred in granite hillslopes. *Journal of the Geological Society of Korea* pp. 43-43.
- 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
- 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. 1984. Landslide Hazard Zonation : A review of principle and practice. United Nations Educational. Scientific and Cultural Organization. pp. 9-59.
- Yoom, W.S., Park, M.G., Han, J.W., Shin, S.G. and Chae, Y.S. 2010. A study on the N values characteristics of automatic recording system of SPT. *Journal of KGS fall national conference*. Gyeonggi.