

양평지역 땅밀림 재발생지의 지형 및 지반 특성 분석

박재현^{ID*} · 이상현

경상국립대학교 환경산림과학부

Analysis of Topography and Ground Characteristics of Landcreek Reoccurrence in the Yangpyeong Area

Jae Hyeon Park^{ID*} and Sang Hyeon Lee

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

요약: 본 연구는 경기도 양평군에서 발생한 땅밀림 재발생지의 지질, 지형, 토양의 물리적 특성을 분석하여 땅밀림 복구대책 수립을 위한 기초자료를 제공하기 위하여 실시하였다. 조사대상지역은 표토층, 풍화토, 풍화암 및 연암층으로, 기반암으로 셰일이 분포하고, 사암이 협재하는凸상 대지상지형으로 봉적토땅밀림지역이었다. 조사대상지역에서 신축계 및 변위측정기는 땅밀림이 재발생한 시기인 2020년 7월 1일부터 8월 27일까지 1.1~6.5 mm 변화하여 땅밀림의 영향이 나타났다. 땅밀림은 S65° W, E45° S, E70° S 두 방향으로 진행되었으며, 지하수의 유향분석 결과인 주 흐름방향 E82.5° S, S16.8° W와 유사하여 지하수의 유출방향으로 땅밀림이 발생하는 것으로 분석되었다. 땅밀림지의 평균산지경사는 19.3°로 우리나라의 평균산지경사(25°)보다 낮은 환경사지에서 발생하였으며, 지하수가 유출되는 지역에서는 토양의 용적밀도가 낮게 나타났다.

Abstract: We conducted this study to provide essential data for implementing restoration measures on the physical properties of the geology, topography, and soil of the landcreek areas in Yangpyeong-gun, Gyeonggi-do. The strata of the survey area comprised topsoil, weathered soil, weathered rock, and soft rock layers. The landcreek area, caused by colluvial debris, was located in a convex topography shape distributed as bedrock with shales and incorporated with sandstone. According to the measurement of the displacement meter, the surveyed area has crept from 1.1 mm to 6.5 mm during the recurrent landcreek between 1 July and 27 August, 2020. The landcreek had progressed over two directions (S65° W, E45° S, and E70° S) which were similar to the groundwater flow direction (E82.5° S and S16.8° W). The average slope of the landcreek area occurred on a gentle slope (19.3°), lower than the average slope of the mountain area (25°) in Korea. The bulk density in the groundwater areas was lower than that in other surveyed areas.

Key words: landcreek, colluvial soil, ground water movement, restoration measures, soil bulk density, lower than the average slope of mountain

서론

경기도 양평군 양평읍 백안리 12-1 일원 골프연습장 상단부 산지 비탈면은 2020년 땅밀림이 재발생하였다. 이 지역은 2011년 집중호우로 인해 1차 땅밀림이 발생한 이후 도로 및 골프장 경계부에 콘크리트옹벽을 설치하는 등 복구를 실시하였다. 그러나 1차 땅밀림 피해 시 시추 등 지반조사를 통해 안정성 검토를 실시하지 않고, 복구를 실

시하는 등 2차 땅밀림의 원인을 제공하였다. 이같이 땅밀림은 발생 후 완벽한 복구가 이루어지지 않은 경우에는 재발생하는 특성이 있는데(Woo, 1992), 지질적으로는 셰일, 이암, 혈암, 응회암 등 주로 퇴적암 지역 또는 땅밀림 발생지에서 재차 발생하는 것으로 나타났다(Park et al., 2021).

퇴적암 지역은 태풍이나 집중호우로 점토화되며, 점토의 물 머금음 현상으로 하중이 평소보다 크게 늘어나 중력방향인 비탈면 하단부로 밀려 인장균열과 단차가 형성된다(Park, 2018). Park et al.(2021)은 항공사진을 통해 땅밀림 재발생지 6개소(경상북도 포항시 북구 용흥동 2개소, 경상남도 진주시 집현면 덕오리, 경상남도 하동군 옥중면

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

ORCID

Jae Hyeon Park ^{ID} https://orcid.org/0000-0002-1446-7547

청룡리, 경상남도 김해시 주촌면 내삼리, 전라남도 순천시 서면 판교리)의 땅밀림지를 대상으로 땅밀림 발생 시기와 피해 면적을 추정하였다. 이들 재발생된 땅밀림지는 풍화암 지대였으며, 불연속면은 사면 경사와 동일한 방향이었고, 2차 땅밀림에 의한 피해 면적은 1차 땅밀림 피해 면적보다 평균 22.1(1.8~45.5) 배 넓은 것으로 나타났다. 또한, 고해상 항공사진을 활용하여 1차 땅밀림을 파악하면 이후 발생할 수 있는 땅밀림으로 인한 재해를 사전에 파악하여 복구대책을 수립할 수 있다고 하였다.

이렇게 땅밀림이 재발생되는 지역은 오랜 기간에 걸쳐 토괴가 밀린데 따른 지형의 변화로 인한 미지형이 생기면서 토질이 약화되거나(Kim et al., 2015; Takaya, 2017), 각종 개발사업으로 인해 과거 발생된 땅밀림지의 토괴가 불안정하게 됨으로써 재발생될 수 있거나(National Institute of Forest Science, 2017; Park, 2018), 복구대책을 완벽히 수집하지 않고 복구함으로써 재발생한다(Park et al., 2003). 즉, 땅밀림은 산사태와 성격이 다르며, 땅밀림은 재발성을 나타내고 있어 1차 땅밀림과 2, 3차 땅밀림으로 구분하게 되는데, 땅밀림지 규모는 산사태보다 크기 때문에 항공사진을 분석하여 땅밀림지를 찾아내는 연구(Park et al., 2021)도 있다.

이와 같은 연구를 기반으로 이 연구는 경기도 양평지역의 동일한 지역에서 땅밀림이 재발생한 지역의 지질, 지형, 토양특성 등을 분석하여, 땅밀림 재해를 예방하기 위한 복구 대책 수립을 위한 기초자료를 제공하기 위해 실시하였다.

재료 및 방법

1. 기초자료 조사

조사대상 지역은 경기도 양평읍 백안리 12-1 일원 골프 연습장 상단부 산지 비탈면이 2020년 땅밀림이 재발생하였다. 이 지역은 2011년 집중호우로 인한 땅밀림으로 하단부 골프장 및 도로에 피해가 발생한 이후 조사 하였으며,

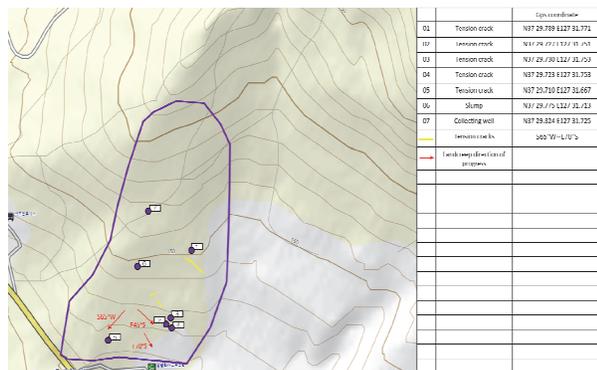


Figure 1. The current state of landcreep area.

2차 피해로 2013년 콘크리트 작업로 균열 및 배수로 들뜸 및 산지 산복부에 인장균열이 발생하였다. 이후 땅밀림이 재발생하여, 2020년 8월에 작업로 인장균열 및 들뜸, 단차 발생, 산지 상단부 인장균열 및 산지 산복부 지하수 유출, 다발유공관 막힘 등 땅밀림이 발생하였다(Figure 1).

땅밀림이 재발생한 조사 지역의 산지는 완구릉지이며, 특별한 수계는 형성되어 있지 않은 지역이다. 산지 정상부 하단 7부 능선으로부터 너덜이 분포하고 있다. 요지(凹地)에 위치한 변곡점에서 강우 시 빗물이 흘러 비강우 시에는 물이 흐르지 않으나 집중호우 또는 태풍에 의한 호우 시에는 강수가 집중되는 지역이다.

산지 하단부에는 국도가 있고, 전형적인 산지 정상부로부터 5~6부 능선에 변곡점이 형성되는 지형을 이루고 있다.

1) 땅밀림지의 식생

땅밀림이 재발생하여 붕괴한 지역의 상단부 사면과 중앙부 사면 그리고 하단부 사면에서 표준지를 선정하여 교목 및 아교목에 대하여 가로 × 세로(20 m × 20 m) 크기의 방형구를 설치한 후 2반복 식생 조사를 시행하였다. 또한, 하층식생은 교목을 조사한 표준지에서 1 m × 1 m 표준지를 구획하여 조사하였다.

2) 땅밀림지의 지형·지질분석

땅밀림지의 지형분석을 위해 국토지리정보원에서 발간한 지형도(1/25,000)를 사용하였다.

Park(2018)에 의하면 미세지형은 땅밀림지에서 중요한 역할을 하며, 땅밀림은 오랜 시간 동안 지반이 천천히 밀려 내려오면서 지형이 변화하고, 미세지형이 변화되어 등고선 이상현상 및 등고선 벌어짐 현상이 지형도에 나타난다고 하였다. 이러한 연구를 참고하여 지형도(1/25,000)와 현장조사를 통해 미세지형 철상미근형(凸狀尾根形) 지형, 요상대지상(凹狀臺地狀) 지형, 철상대지상(凸狀臺地狀) 지형, 凹상완사면(凹狀緩斜面) 지형(Takaya, 2017)으로 구분하였다. 대상지의 지질도(1:1,000,000)를 참고하여 대상지의 암종을 분류하고 땅밀림의 종류를 구분하였다.

3) 항공사진을 활용한 땅밀림지의 피해 규모 및 시기 추정

국토정보플랫폼을 이용하여 경기도 양평군 땅밀림 재발생지 일원(축적 1:5000)에 대해 항공사진을 추출하였다. 이때 땅밀림이 발생하거나 산사태 및 산지 훼손이 발생했을 때 항공사진에서는 훼손된 부분으로 나타나기 때문에 Lee and Kim(2011)의 산사태지에서 항공사진을 참고하여 재해로 인한 산지 훼손을 확인하였다. 2010, 2011, 2013, 2020년도의 항공사진을 활용하여, 과거 땅밀림 발생 시기를 파악하고, 훼손지 면적을 비교, 분석하였다.

4) GIS를 이용한 땅밀림지 지형분석

현장에서 GPS (Garmin 64s)를 이용하여 측량한 결과를 GIS 소프트웨어(Arc map v.10.8)와 연동하여 땅밀림지 경계부 안쪽지역 및 경계부를 포함한 땅밀림 위험지역에 대하여 산사태 위험등급, 경사향, 지형 경사, 표고를 분석하였다. 산림청에서 제공하는 산사태위험등급도를 FGIS를 활용하여 분석하였다. Park et al.(2019)은 산사태위험등급지와 땅밀림지는 일치하지 않은 결과치를 가지며, 이로 인해 땅밀림 재해를 예방하기 위해서는 땅밀림 위험지를 결정하기 위한 연구가 필요하다고 하였다. 또한, National Institute of Forest Science(2017)는 땅밀림지는 산사태 위험등급의 3~5등급과 등급외 대다수 지역이 포함되어 일반적인 산사태와는 차이가 있음을 밝혔다.

경사 방향은 땅밀림의 진행 방향과 땅밀림에 큰 영향을 주는 지하수의 유동 방향을 알 수 있는 지표가 되며, 경사 분포 값은 땅밀림이 발생한 경계에 대해 경사 분포 분석을 실시하는데, 산사태는 경사도 20°이상의 급경사지에서 발생하지만, 땅밀림은 5~20°인 완경사면에서 주로 발생하는 특성을 보인다(Woo, 1992).

2. 현장조사

1) 땅밀림지의 경계부 파악 및 복구 공법 조사

GPS를 활용하여 인장균열 및 단차의 위치를 기준으로 땅밀림지의 경계부를 선정하여 지형도(Mapsource Garmin Ver 6.16.3)에 경계부 트랙, 사면의 인장균열 및 단차 위치를 입력하였다. 아울러 현장 전체를 대상으로 1차 땅밀림 후 시공한 복구 공법을 조사하였다.

2) 토양분석

토양 내부의 물의 통과 용이성을 파악하기 위해 투수계수를 분석하였다. 토양채토기와 토양캔을 이용하여 대상지의 토양 100 g을 채취하였다. 토양 샘플은 인장균열로 인해 붕괴된 지역과 대조구(미발생 사면)를 대상으로 채취하였으며, 각 토양 샘플 조사지(Figure 2)마다 ① (인장균열 상부, 인장균열 하부), ② (인장균열 상부, 상부로부터 30 cm), ③ (인장균열 상부, 상부로부터 30 cm), ④ (인장균열 상부, 상부로부터 30 cm, 지하수)를 조사하여 측정하였다.

이를 대상으로 투수속도측정기(Daiki, Dik-4000)를 활용, 3반복 측정하여 결괏값을 산출하였다.

또한, 땅밀림으로 붕괴된 지역의 토양시료 500 g을 채취하여 한국임업진흥원(Korea Forestry Promotion Institute)에 의뢰하여 토성과 pH를 분석하였다. 토성은 땅밀림으로 붕괴된 지역의 상단부, 하단부 지역의 토양에 대해 비중계법에 따라 분석하였다.

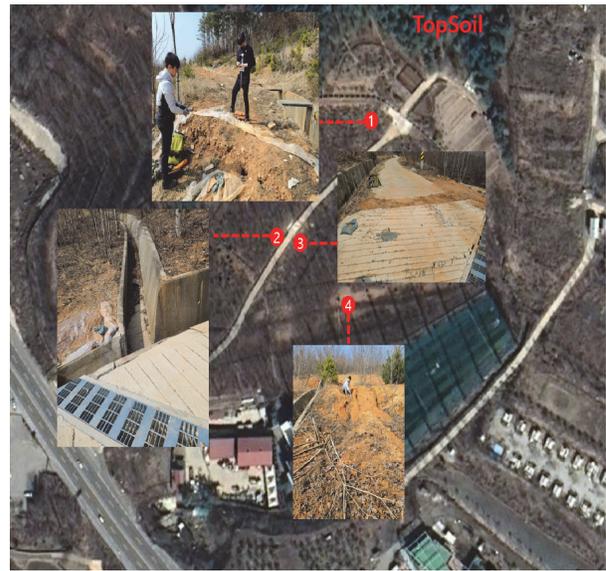


Figure 2. Soil sampling area.

3) 토양용적밀도 측정

토양관입시험기(DIK-3300)를 활용하여 토양 100 cm 깊이까지의 토양용적밀도(kg/cm²)에 대하여 인장균열지 (Figure 3; 상부 인장균열지 상부, 상부 인장균열지 하부, 도로 중간부 인장균열지 상부, 도로 중간부 인장균열지 하부, 비탈면 하부 인장균열지, 비탈면 하부 인장균열지 하수유출지) 토양의 용적밀도를 대상으로 토양의 용적밀도를 3반복 측정하여 평균값을 구하였다.

4) 지반조사

땅밀림지의 지형 및 지질 특성을 고려하여 Figure 4와 같이 조사 위치 3곳을 선정하여 유압 수세식(POWER-4000S)으로 시추조사를 실시하였다. 시추조사는 토양 내부의 지층 분포상태를 파악하며, 연약층 유무, 투수층의 유무, 공내지하수위측정 및 현장 투수시험을 실시하여 지반에 대한 상황을 파악하였다.

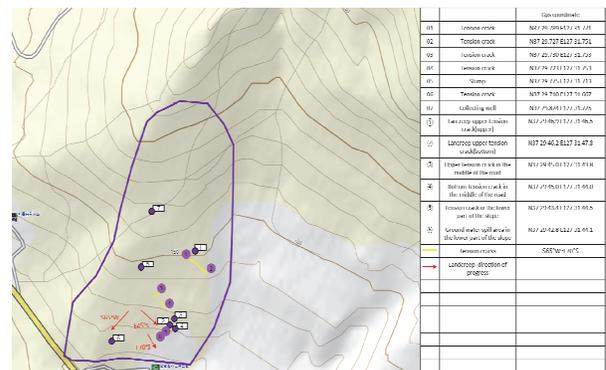


Figure 3. Sampling location for soil bulk density analysis.

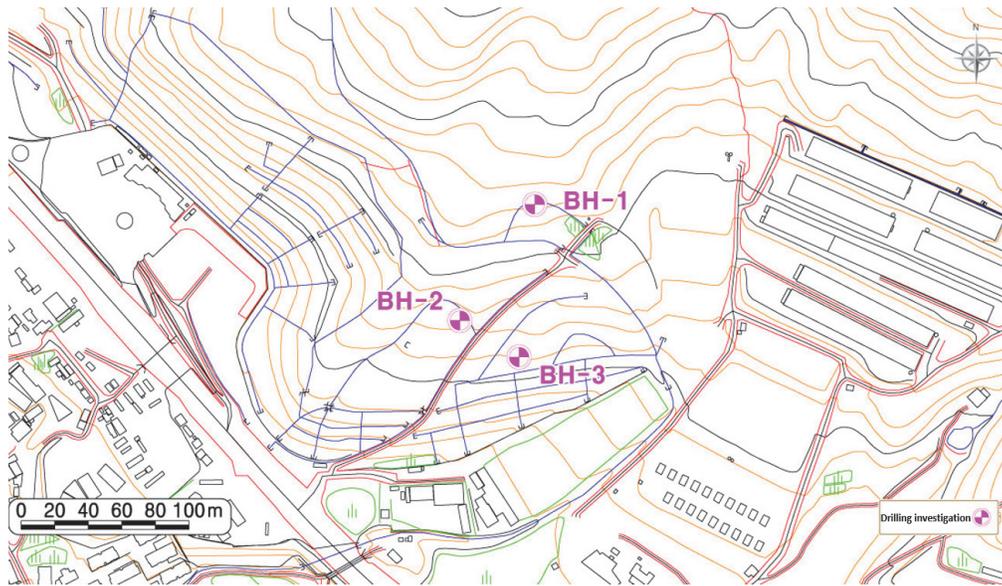


Figure 4. Drilling location.

결과 및 고찰

1. 땅밀림지의 식생환경

땅밀림지의 사면 상단부에는 소나무와 리기다소나무가 우점하고, 소나무는 경급 6~12 cm, 수고 18~23 m, 본수 27본, 단재적 0.4095 m³, 재적 11.0565 m³이었다. 리기다소나무는 경급 6~8 cm, 수고 17.0~20.0 m, 본수 4본, 단재적 0.1529 m³, 재적 0.6116 m³이었다. 또한, 느티나무는 경급 6 cm, 수고 20.0 m, 본수 2본, 단재적 0.0394 m³, 재적 0.0788 m³이었다. ha당 평균입목축적은 293.7 m³으로 상층을 이루고 있었다.

중단부 1차 땅밀림 후 복구지에 조립한 지역은 툼립나무의 경급이 6~10 cm, 수고 8 m, 본수 15본, 단재적 0.0681 m³, 재적 1.0215 m³이었고, 아까시나무는 경급 6 cm, 수고 5.0 m, 본수 1본, 단재적 0.0079 m³, 재적 0.0079 m³이었다. 이 지역의 ha당 평균 입목축적은 25.7 m³으로 상층을 이루고 있었다.

중층은 조립한 툼립나무와 매실나무가 자라고 있고, 상단부에서 떨어진 소나무 종자가 발아하여 자라는 상태이며, 하층식생으로는 쑥, 억새, 냉이 등이 자라고 있고, 산지 사면 상단부에 분포하는 소나무와 리기다소나무 하방에는 과거 2011년과 2013년 땅밀림 발생으로 복구 녹화를 실시한 지역으로 툼립나무, 아까시나무, 매실나무 등이 분포하고 있으며, 하층식생으로는 김의털, 억새, 냉이 등의 초본류가 분포하고 있다. 이같이 땅밀림이 발생한 지역은 리기다소나무, 아까시나무 등이 다수 성장하는 곳으로 과거 사방사업을 실시했다는 증거(Woo, 1992)로 판단되며, 특히 사방사업지는 토양침식으로 인한 황폐화가 진행된

후 녹화되어 낙엽 낙지 등이 쌓이면서 그 안의 토양이 심한 풍화를 겪은 상태로 땅밀림에 취약한 토양구조를 가지는(Choi, 2018) 지역으로 사료된다.

특히 이 지역에는 산림청 국립산림과학원에서 설치한 Y신축계(변위측정을 수행)를 2020년에 설치하였는데, 2020년 7월 1일부터 8월 27일까지 Y신축계(1번, TW-1)에서는 8.6 mm가 3.4 mm로(변이 차 5.2 mm), Y신축계(2번, TW-2)에서는 -6.5 mm에서 -7.6 mm(변이 차 1.1 mm)로 변화되었고, Y신축계(3번, TW-3)에서는 1.6 mm에서 8.1 mm(변이 차 6.5 mm)로 변화하여 땅밀림의 영향이 나타난 것으로 분석되었으며, 이 시기에 땅밀림이 재발생되었다(Figure 5).

일본에서는 땅밀림의 변화에 따라 지표 변위가 10 mm 정도의 변위 발생 시에는 주민대피 및 땅밀림 위험이 발생한 것(Takaya, 2017)으로 연구되었다. 그러나 이 지역은 일본에서 연구된 변위보다는 비교적 좁게 나타났지만, 우리나라에서는 현재까지 산사태 위험에 따른 경계 피난에 준해 주민대피 등을 시행하고 있는 실태로 땅밀림위험지도 및 땅밀림 위험에 따른 경계 피난 등의 기준을 마련할 필요가 있을 것으로 사료된다.

2. 땅밀림지의 지형·지질

땅밀림이 발생한 지역은 산지 5~6부 능선에 미세한 계곡이 형성되어 있으며, 강우 시 빗물은 국도 쪽으로 유출되는 특성을 나타내고, 지표수로 흐르지 않고 침투하여 지하수로 유출되는 특성을 나타내었다. 산지 상단부로부터 산지 5~6부 능선에 걸쳐 있는 너털에서는 강우 시 지하로 침투되는 우수의 침투수가 지하수로 흐르게 되며 땅밀림



Figure 5. Location of extensometer system installation.

의 원인이 되는데, 이 지역에서는 미세한 계곡이 형성되어 있으나 계류로 보기 어렵고 집중호우 시 우수가 유출되는 지역이다. 또한, 집수가 이루어지는 요지(凹地)의 형태로 우수는 국도와 골프연습장으로 이어지는 두 갈래 지하수 유출 방향이 형성되는凸상 대지상 지형이다.

조사대상 지역은 우리나라 지질도(1:1,000,000)를 분석한 결과, 경기도 양평군 백안리 산 12-1번지 일원의 암상은 중생대 백악기 시대이며, 경상도 신라층군 주산암산암 지층의 용두리 편마암 복합체, 호상 흑운모 편마암, 양평 화성암 복합체, 반상 섬장암으로 섬장암과 섬록암의 중간으로 땅밀림에 매우 취약한 지질 특성을 지니고 있으며 (Figure 6), 점질토 과다로 호우 시 빗물을 머금고 있어 토압과 수압의 가중으로 인한 땅밀림 재해 발생 가능성 높은 지역으로 땅밀림에 취약한 토질 특성을 지닌다(Park et al., 2018).

땅밀림이 발생한 산지 산복부 사면은 과거로부터 훼손 및 침식이 발생함으로써 산지 능선부의 너덜 하부 변곡점 부위에서 강우 시 빗물의 침투가 많아졌고, 묘지 등의 조성으로 인한 강우 침투 기회를 확산시켜 지하수의 집적이 많아지게 한 원인이 있다. 이로 인해 산지 산복부의 일부 지역이 지속적으로 붕괴되었다.

대상지의 상단부는 평평한 지형으로 강우 시 빗물의 집수가 용이한凹형 지형을 이루고 있고, 이는 강우에 의한 빗물이 산지 집수가 용이한凹형 상단부에서 침수되어 하단부로 침투되면서 빗물을 빠르게 배출하지 못하여 하중을 버티지 못하고 무너지는 현상을 보이며, 유출된 지하수는 하단부의 골프연습장 방향으로 향하고 있다. 이 지역의 땅밀림은 붕괴토땅밀림으로 땅밀림이 발생한 산지 산복부 사면은 과거로부터 훼손 및 침식이 발생함으로써, 산지

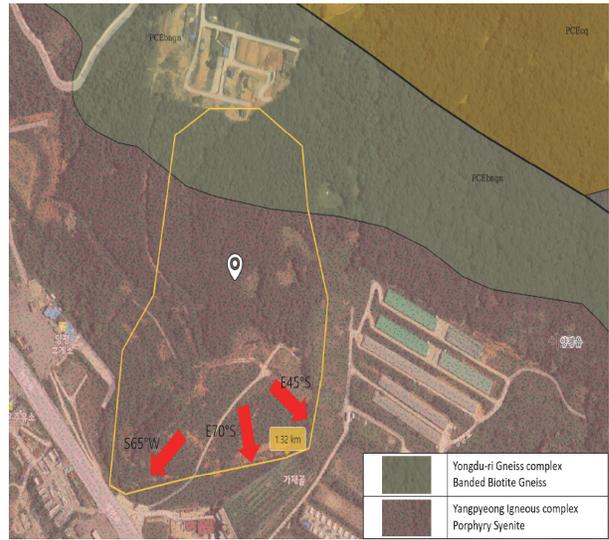


Figure 6. Geology of landcreep area.

능선부의 변곡점 부위에 강우 시 빗물의 침투가 많아졌고, 작업로 설치로 인한 강우 침투 기회를 확산시켜 지하수의 집적이 많아지게 한 원인으로 땅밀림이 발생되었다.

이 지역은 지층의 풍화가 매우 발달하였고, 붕괴된 지역의 풍화층이 점토화되어 땅밀림에 취약한 상태이다. 또한, 상단부 산지의 너덜 하부 밍지 하단부로는 산복부가凸형으로 국도와 골프연습장으로 향하는 지역이며, 땅밀림의 원인으로 작용하는 지하수 유출지가 붕락지 하단부에서 나타났다.

땅밀림지의 지층과 주 구성 암석을 분석한 결과, 고결도와 풍화성도 낮은(Takaya, 2017) 지역으로 조사 지역은 활락애가 명확하지 않고, 타 지층 및 관입암은 없는 것으로 나타났다. 암석의 풍화 정도는 풍화가 상당히 진행된 상태 (Tomio et al., 1990; Kim et al., 2015; Choi, 2018)에서 땅밀림이 발생하였다.

단층과 습곡은 나타나지 않았고, 불연속면은 사면 경사와 동일한 방향으로 땅밀림 발생에 유리한 조건(Park et al., 2019a)이었다. 절리 수는 3개 이상으로 나타났으며, 절리 간격은 조밀(6~20 mm)하게 나타나 외적 요인 (National Institute of Forest Science, 2017; Park, 2018)에 민감한 것으로 분석되었는데, 특히 이 지역은 땅밀림에 취약한 김해시 주촌면 내삼농공단지(Park et al., 2003)의 지역과 유사한 지질을 나타내었다. 콘크리트 도로와 골프연습장 사이의 산지 비탈면에는 지하수가 유출되어 비탈면의 붕괴가 발생된 지역이 나타나는데, 붕락지는 2개소로 콘크리트 중배수로의 경계부에서도 침식이 발생되었다.

붕락지는 방향이 E85°S로 좌측 붕락지는 폭 142 cm, 깊이 98 cm, 길이 727 cm로 나타났으며 왼쪽 국도 방향으로 붕락되고 있었으며, 우측 붕락지는 폭 148 cm, 깊이 120

cm, 길이 760 cm로 나타났으며 우측 하단부 골프연습장 방향으로 붕락되고 있었다(인장균열지 4; N 37 29.723 E 127 31.753). 이 지역의 붕락은 콘크리트 도로의 인장균열과 연관되어 있으며, 지하수위는 21.1~34.3 m로 지하수의 유향 분석 결과, 주 흐름 방향은 심도 37.0 m에서는 방위각으로 172.5°(E82.5°S), 심도 45.0 m에서는 방위각 196.8°(S16.8°W)의 방향과 유사한 것으로 나타나 지하수의 유출 방향으로 땅밀림이 발생하는 것으로 분석되었다(Woo, 1992; Park et al., 2018).

따라서 추후 땅밀림이 재발한다면 SW ~ ES 방향으로 땅밀림이 진행할 것으로 판단되며, 이를 통해 재발생 땅밀림지 하단부의 피해를 예방하기 위한 대책을 강구하는 것도 조사된 방향의 범위를 중심으로 시행하는 것이 필요하다.

3. 항공사진을 활용한 대상지 분석

상기 지역의 땅밀림 붕괴지에 대한 고해상도 항공사진을 분석하기 위해 국토지리원에서 제공하는 국토정보 플랫폼을 Lee and Kim(2011)의 토사 유출 지역(Soil runoff)과 산사태 발생지역(Debris flow)을 구분할 수 있다는 자료에 따라 과거와 현재의 항공사진 자료(1:5,000)를 분석하였다(Figure 7). 땅밀림이 발생하기 전인 2010년에는 국도 상단부 비탈면이 훼손된 흔적이 나타나고 있는데, 이때 이미 땅밀림이 진행되어 S50°W 방향으로 붕락 토사가 밀려 내려온 것으로 나타났다. 이 면적을 분석한 결과 11,165.1 m²이었다. 태풍 등 집중호우로 인해 땅밀림이 가속화한 2011년 7월부터의 항공사진을 분석한 결과, 땅밀림으로 인해 S50°W 방향과 E45°S 방향으로 피해가 발생하였으며, 훼손면적은 71,090 m²로 나타났다.

2013년 7월과 8월 태풍과 집중호우로 인해 땅밀림지 피해 면적은 확대되었다. 피해 면적은 78,818.3 m²로 나타났는데, 이는 복구공사로 인해 훼손면적이 증가한 것에 기

인한 결과라 사료된다. 2020년 재발생한 땅밀림으로 인해 피해면적은 1,112.5 m²로 2011년과 2013년에 비해 현저히 작았다. 이는 하단부 국도 및 골프연습장 등의 경계부에 콘크리트 옹벽 및 등고선 방향으로 콘크리트 배수로 및 다발유공관, 원형 돌망태 등 다양한 공법을 시공한 데 따른 땅밀림 억제 효과라고 할 수 있다. 또한, 최근 2020년도(Figure 8) 드론을 활용하여 촬영한 대상지의 항공사진에서는 황토색으로 보이는 곳이 땅밀림에 의해 붕괴지 형성되며 재차 땅밀림이 발생하고 있는 상황이므로 이 지역에 대해서는 종배수로, 집수정 설치 등 다양한 보완 공법의 적용이 필요할 것으로 사료된다.

2011년과 2013년 땅밀림 발생으로 인한 피해를 복구하기 위해 좌측 국도변으로는 콘크리트옹벽(노출 높이 2.77 m, 두께 0.3 m), 골프연습장 상부 콘크리트옹벽(노출 높이 2.25 m, 두께 0.3 m)를 시공한 후 이들 콘크리트 옹벽에 대한 피해는 발생하지 않은 것으로 나타나 향후 땅밀림 억제를 위해 피해지 경계구역 안쪽에 대한 보강대책을 수립하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

4. GIS를 활용한 대상지 지형분석

수치지형도를 활용한 GIS 산사태위험등급을 분석한 결과, 1등급은 나타나지 않았으며, 2등급은 약 13.6%, 3등급은 약 53.0%, 4등급은 약 29.4%, 5등급은 약 4.0%로 나타났다(Figure 9). 이같이 조사대상지는 산사태위험등급이 1, 2등급지는 약 13.6%, 3등급 이하 지역이 약 86.4%로 1, 2등급지보다 약 6.4배 많아 산사태위험등급의 하위 등급에 대한 땅밀림 위험에 대해 면밀히 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다(Park, 2018).

수치지형도를 활용한 GIS 경사를 분석한 결과, 조사 대상지의 경사는 10°미만이 약 4.7%, 10°~ 15°는 약 56.4%, 15°~ 20°는 약 33.0%, 20°~ 25°는 약 5.9%로 10°~ 15°



Figure 7. Analysis of landcreep area using aerial photography.



Figure 8. Landcreep area analysis results using drone image. Note: The ocher color inside the red line is where the collapsed area was formed by landcreep.

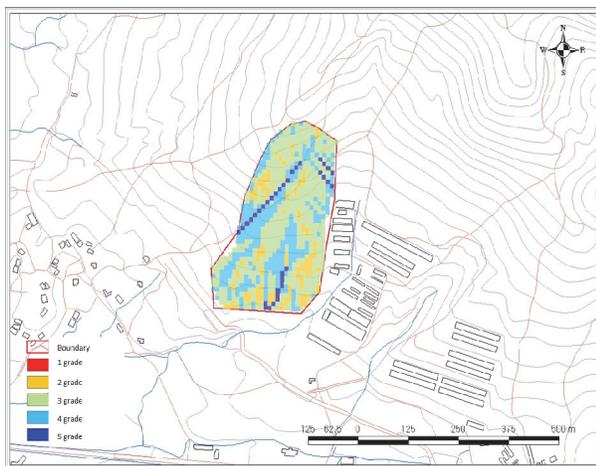


Figure 9. Overlay analysis with landslide hazard map.

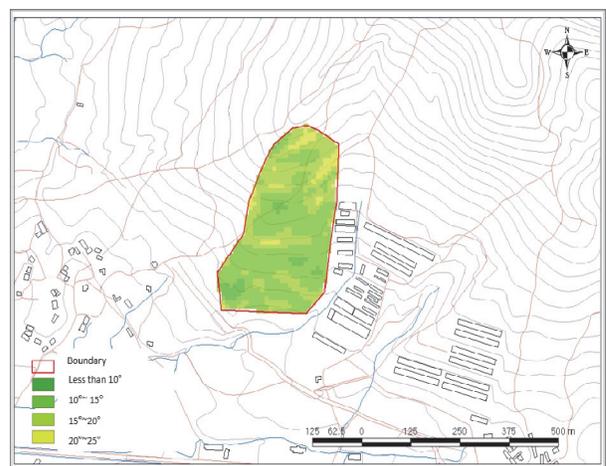


Figure 10. Slope distribution map.

가 가장 높은 비율을 나타내었다(Figure 10). 이같이 땅밀림은 경사가 완만한 지역에서 발생하는 것을 나타내는 결과와 같은 결과이었다.

즉, 평균 산지 경사는 19.3°로 우리나라의 평균 산지 경사 25°(Jeong et al., 2002)보다 낮은 지역이었다. Woo(1992)가

보고한, 땅밀림의 발생은 급경사에서 발생하는 것이 아닌 특정한 지질과 지형적 구조를 형성하고 있는 5°~20°인 완경사면에서 발생하는 결과와 동일하게 나타났다.

조사대상지의 방향은 남동방향이 약 18%, 남쪽방향이 약 69.1%, 서쪽방향이 약 0.8%, 남서쪽방향이 약 11.6%로

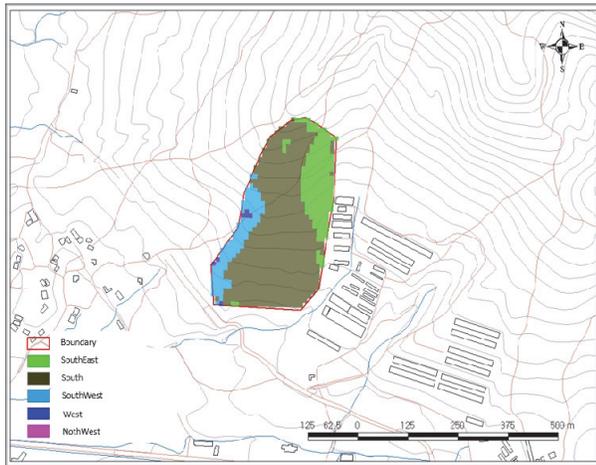


Figure 11. Direction distribution map.

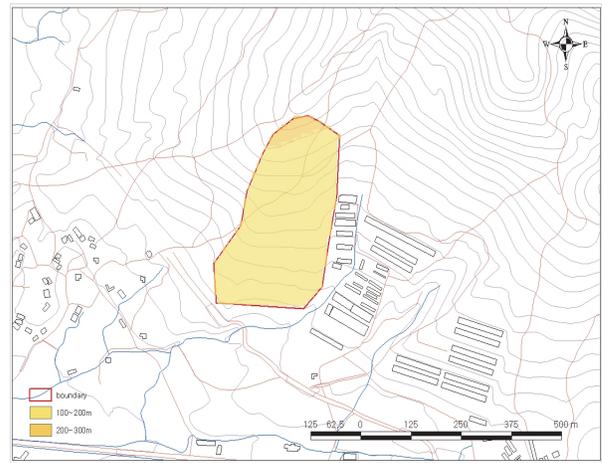


Figure 12. Elevation distribution map.

나타났는데(Figure 11), 항공사진과 지하수의 흐름방향을 분석한 땅밀림지 진행방향과 동일한 결과값을 나타내고 있다.

최대 표고는 216.2 m, 평균 표고는 152.2 m, 최소 표고는 105.9 m를 나타내었으며(Figure 12), 100~200 m는 약 94.7%로 가장 많았으며, 200~300 m는 약 5.3%를 나타내어 조사 대상지는 구릉지 또는 완경사지에 속하는 지역으로 땅밀림에 취약(Park, 2018)한 지역으로 땅밀림지는 산지의 5부 이하 능선부에서 가장 많이 발생한다는 연구 결과(National Institute of Forest Science, 2017)와 일치하는 결과이었다.

5. 토양분석결과

땅밀림지의 토양형은 갈색 약건 산림토양(B2)이었다. 토심(cm)은 표토와 풍화토로 이루어져 있다. 토양은 봉적층으로 깊게 분포하고 있고, 표토는 점토가 다량 섞인 실트질 점토로 나타나, 강우 시 빗물을 머금은 특성을 나타내었다. 산지 상단부는 봉적층으로 이루어져 있고, 산지 정상부에서 능선으로 이어지는 변곡점 부분의 산복부 아래에서 땅밀림이 재발생하였다. 그러나 이 지역은 토심이 비교적 깊은 지역으로 풍화가 심한 상태로 지층은 잡석과 세일이 혼재해 있는 상태로 강우시 풍화가 심한 암석 사이로 세일이 미끄러지면서 땅밀림이 재발생한 것이다.

붕괴된 지역의 좌, 우측 부분은 토심이 비교적 깊은 상

태로 이동대(잔적층, 깊이, cm, A+B+C층)는 100 ~ 200 cm에 해당하였다. 토양의 평균 pH는 5.0으로 우리나라 산림토양의 평균 pH(Jeong et al., 2002) 보다 낮은 상태이었다. 땅밀림지 표토의 모래 : 미사 : 점토의 함량(%)은 27.1 : 52.2 : 20.7로 미사질 양토이었고, 땅밀림지에서 붕괴된 지역에서 지하수가 유출되는 지점의 모래 : 미사 : 점토의 함량(%)은 55.6 : 30.8 : 13.7로 사질양토이었다(Table 1). 즉, 땅밀림지와 대조구의 위치에 따라 토양에 사질과 점토 함량 그리고 토성이 다른 것으로 나타나 이질적인 토양으로 조성된 지역으로 땅밀림에 취약한 토양특성을 나타내었다.

땅밀림으로 붕괴된 지역의 투수계수를 분석하였다. 토양의 투수계수는 땅밀림지역의 표토에서 0.05189 cm/sec로 가장 높았다. 다음으로는 땅밀림으로 인장균열이 발생되어 붕괴된 하부 토양에서 0.03459 cm/sec를 나타내었고, 땅밀림으로 인한 침식 지역은 0.01730~0.00012 cm/sec의 범위로 나타났다(Table 2).

이와 같은 결과는 강우시 투수계수가 높은 토양을 따라 빠르게 침투된 물이 점토층으로 침투되지 못하여 그 경계면에서 하방으로 유출되면서 땅밀림면이 형성되어 땅밀림이 나타나는 것으로 추정된다. 지하수가 유출된 지점의 투수계수는 0.00144 cm/sec로 낮았는데, 이는 점질토 토양 부근에서 지하수의 유출이 더더지는 것으로 나타났다.

Table 1. Results of soil characteristics in landcreep area.

Location	Grain size analysis (%)			Soil texture	Soil pH
	Sand	Slit	Clay		
Landcreep area Topsoil	27.1	52.2	20.7	Silty Loam	5.0
Landcreep area ground water outflow	55.6	30.8	13.7	Sandy Loam	5.4

Table 2. Analysis result of soil permeability coefficient of landcreep area.

Name of the sample	Water content(%)		Coefficient of permeability (cm/sec)
	Gravitational water content (pF0~1.8)	Soil porosity (pF0~2.7)	
Normal soil	19	24.07	0.00051
Topsoil	26.54	31.64	0.05189
Tension crack no.1 Upper	23.82	27.65	0.00472
Tension crack no.1 Bottom	30.11	34.11	0.03459
Tension crack no.2 road upper topsoil	23.29	27.61	0.00335
Tension crack no.2 road 30cm from the top	27.35	31.61	0.01297
Tension crack no.3 road Upper	28.7	32.8	0.00519
Tension crack no.3 road 30cm from the top	28.89	32.43	0.00472
Tension crack no.4 Upper	27.15	29.46	0.01730
Tension crack no.4 Groundwater	29.26	41.25	0.00144
Tension crack no.4 30cm from the top	13.57	29.66	0.00012

6. 토양용적밀도 결과

평균 토심은 대조구가 13 cm, 상부 인장균열지 상부가 15 cm, 상부 인장균열지 하부가 85 cm, 도로 중간부 인장균열지 상부가 42 cm, 도로 중간부 인장균열지 하부가 12 cm, 비탈면 하부 인장균열지가 74 cm, 비탈면 하부 인장균열지하수 유출지가 79 cm이었다(Table 3). 토양용적밀도는 대조구가 2.3 kg/cm²를 나타내었으나, 도로 중간부 인장균열 지상부, 도로 중간부 인장균열 지하부, 비탈면

하부 인장균열지 모두 대조구보다 높은 결괏값을 나타내었다. 아울러 인장균열이 발생한 상부보다 하부가 토양의 용적밀도가 낮게 나타났는데, 이는 땅밀림으로 인한 토양의 와해가 발생한 결과로 판단된다. 지하수가 유출되는 지역에서는 토양의 용적밀도가 낮게 나타났는데, 이는 지하수 유출로 인한 주변 토양의 와해 및 분열, 침식 등으로 인해 토양의 용적밀도가 낮게 나타났기 때문이다.

땅밀림지 토양은 붕괴토로 비교적 토양용적밀도가 낮은

Table 3. Result of soil bulk density using soil penetrometer.

Soil depth (cm)	Soil hardness (kgf/cm ²)						
	Normal slope	Landcreep upper soil(upper) ①	Landcreep upper soil(Bottom) ②	Upeer tension crack in the middle of the road ③	Bottom tension crack in the middle of the road ④	Tension crack in the lower part of the slope ⑤	Ground water spill area in the lower part of the slope ⑥
0	2.3	6.0	4.0	4.2	4.0	2.0	2.0
5	2.3	6.0	4.0	4.2	4.0	2.0	2.0
10	2.3	6.0	4.0	4.2	4.0	2.0	2.0
15	2.3 (13cm)	6.0 (15cm)	4.0	4.2	4.0 (12cm)	2.0	2.0
20			4.0	4.2		2.0	2.0
25			4.0	4.2		2.0	2.0
30			4.0	4.2		2.0	2.0
40			4.0	4.2		2.2	2.0
50			4.0	4.2 (42cm)		2.4	2.0
60			4.0			2.5	2.5
70			4.0			2.7	2.5
80			4.0			2.7 (74cm)	2.7 (79cm)
90			4.0 (85cm)				

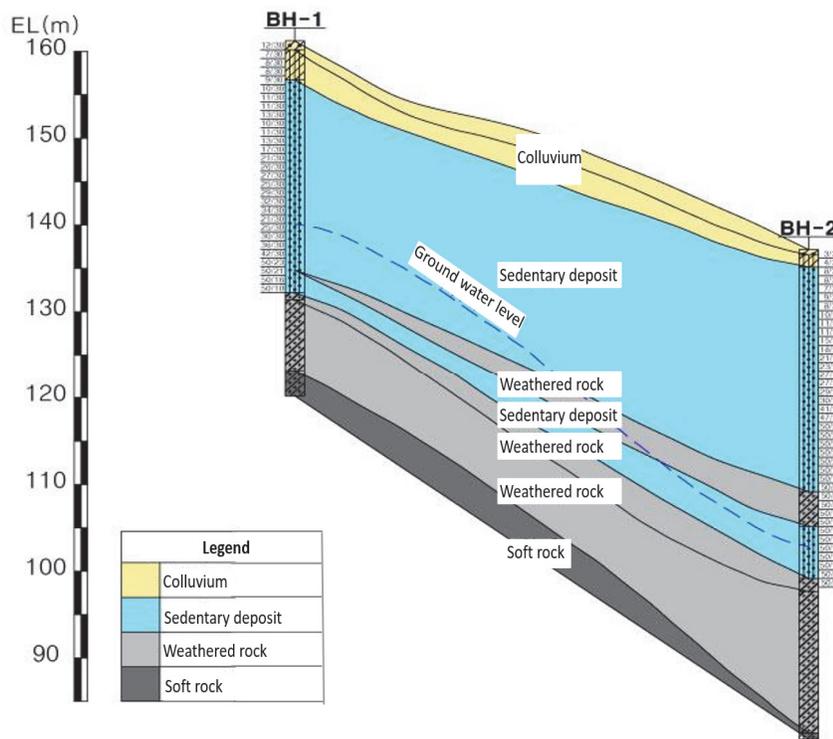


Figure 13. Cross section of the geological layer.

Table 4. Result of drilling investigation.

Number	Stratum division	Depth (GL.-m)	Thickness (m)	Geological composition	N value (TCR/RQD)
BH-1	Colluvium	0.0~1.5	1.5	Argillaceous gravel, Sand, mixed complex	-
	Colluvium	1.5~4.5	3.0	Slity clay, sand and gravel mixed complex	7/30~12/30
	Sedentary deposit	4.5~29.0	24.5	Sandy slit, Silty sand, Fine textured soils	9/30~50/16
	Weathered rock	29.0~29.8	0.8	Silty sand, Fine textured soils	50/10
	Weathered rock	29.8~38.0	8.2	Syenite, Complete~High weathering state	20~94/0
	Soft rock	38.0~41.0	3.0	Syenite, Normal weathering state	100/49
BH-2	Colluvium	0.0~0.6	0.6	Argillaceous gravel, Sand mixed complex	-
	Colluvium	0.6~2.0	1.4	Slity clay, gravel and Cobble stone mixed complex	3/30
	sedentary deposit	2.0~28.0	26.0	Slity clay, Slity sand, Fine textured soils	4/30~50/11
	weathered rock	28.0~32.0	4.0	Silty sand, Fine textured soils	50/10~50/8
	sedentary deposit	32.0~38.0	6.0	Silty sand, Fine textured soils	50/19~50/13
	weathered rock	38.0~39.5	1.5	Silty sand, Granule~Medium texture	50/9~50/7
	weathered rock	39.5~55.8	16.3	Syenite Complete~High weathering state	12~96/0
	Soft rock	55.8~56.5	0.7	Syenite, Little weathering state	100~33
BH-3	Colluvium	0.0~1.4	1.4	Argillaceous gravel, Sand mixed complex	3/30
	Colluvium	1.4~7.5	6.1	Slity clay, gravel and Cobble stone mixed complex	6/30~11/30
	sedentary deposit	7.5~33.0	25.5	Sandy slit, Slity sand, Fine textured soils	16/30~50/17
	weathered rock	33.0~36.5	3.5	Slity sand, Granule~Medium texture	50/10~50/6
	Soft rock	36.5~39.0	2.5	Syenite, Normal~little weathering state	84/22

상태이었으며, 붕적토로 답압이나 딱딱한 토양이 아닌 것으로 나타났다. 인장균열 및 단차가 발생한 지역은 상단부보다 중북부 단차 지역의 토양용적밀도가 약간 낮게 나타났다. 이는 상단부로부터 토양의 붕괴로 인한 토양의 와해와 교란으로 인해 토양용적밀도는 급격히 낮아지는 것으로 나타났다.

7. 시추조사 결과

조사 대상지 3개소의 시추조사를 실시한 결과, BH-1은 표고 161.208 m, 굴진심도는 41.0 m이었으며, BH-2는 표고 137.166 m, 굴진심도는 56.5 m이었다. BH-3은 표고 131.412 m, 굴진심도는 39.0 m이었다.

조사 지역의 지층은 표토층, 풍화토, 풍화암 및 연암층으로 구성되며, 기반암으로 세일이 분포하고, 사암이 협재 하는 것으로 나타났다(Figure 13). 지하수위는 21.1~34.3 m로 그 위치의 지층은 사면 상단부부터 시추 위치 BH-1, 2, 3의 사면 아래로 내려갈수록 나타나는 지층은 풍화토 - 풍화암의 형태에 해당하며, 이 지하수의 이동에 의한 풍화토와 풍화암의 분리로 인한 땅밀림이 발생한 것으로 판단된다.

붕적층(사질토)은 지표로부터 0.6~1.4 m의 두께로 분포하고, 습윤한 함수 상태로, 색조는 적갈색을 띠며, 표준관입시험에 의한 N 값은 3회/30 cm로 매우 느슨한 상대밀도를 나타내었다. 붕적층은 자갈 섞인 실트질점토로 지표 아래 0.6~1.4 m 하부에서 1.4~6.1 m의 층후로 습윤한 함수 상태, 색조는 적갈색을 띠며, 표준관입시험에 의한 N 값은 3회/30 cm~12회/30 cm(평균 8회/30 cm)의 범위로 연약~견고한 연경도를 나타내었다.

풍화토는 전 시추공에서 지표 아래 2.0~7.5 m 하부에서

24.5~26.0 m의 층후로 암편과 점토질 모래가 분포하였다. 주 구성 성분은, 상부는 모래질 실트, 실트질 점토가 우세하고, 하부는 실트질의 세립 모래이며, 하부로 갈수록 중립질의 모래 비율이 다소 증가하고, 부분적으로 차별 풍화에 의해 연합과 경암이 교호하여 땅밀림에 취약한 특성(Takaya, 2017)을 나타내었다.

풍화암은 암편과 점토질 모래로 구성되어 있어 전 시추공에서 지표 아래 28.0~33.0 m 하부에서 3.5~17.8 m의 층후로 연암은 전 시추공에서 지표 아래 36.5~55.8 m 하부에서 분포하였으며, 섭장암으로 보통 풍화~약간 풍화 상태를 나타내 땅밀림은 연암 상단부까지 영향하는 것으로 분석되었다(Table 4).

현장 조건(조사 및 시험 결과)를 충분히 반영하여 비탈면의 현재 상태에 대한 안정성을 파악하고, 보강이 필요한 구간에 대해 보강대책을 수립하기 위하여 적용지반정수, 비탈면 적용 기준 안전율을 설정(Table 5, Table 6)하였다.

건기 시, 우기 시 비탈면 안정을 위한 검토 구간은 비탈면 하부 절취로 인한 응력 해방에 의해 토층 활동이 발생되었고, 국지성 집중호우에 의해 토층부 활동 파괴가 예상되므로 비탈면 안정성 확보를 위한 대책 공법 선정이 필요하다고 판단된다. 또한, 대책 공법 선정 시 지하수 및 지표수가 비탈면 안정성에 미치는 영향이 클 것으로 예상되므로 보호 공법 중 배수시설에 대한 검토가 필요하다. 비탈면 지표 지질조사 수행시 현장 현황을 반영하여 보강 구간 및 대책 공법 선정을 통한 비탈면 안정성 검토 수행이 필요할 것으로 판단되어 보강 공법인 쏘일네일링을 실시한 결과(Table 7), 건기 시 및 우기 시 모두 안정한 것으로 나타났다. 즉, 골프연습장과 경계지역에 기 설치한 콘크리

Table 5. Application conditions for each stratum.

Division	Unit weight (kN/m ³)	Adhesion (kPa)	Internal friction angle (o)	Notes
Colluvium	19.0	5.0	27.2	Application of indoor test results
Sedentary deposit	20.0	6.2	27.6	Application of indoor test results
Weathered rock	21.0	30.0	33.0	Application of Reference Result

Table 6. Reference factor of safety for application on slopes.

Interpretation condition	Minimum safety rate	Groundwater conditions
Dry	Fs > 1.5	Interpretation of no underground water level
Rainy	Fs > 1.2	Natural ground saturation
Earthquake	Fs > 1.1	Level of ground survey measurement

Table 7. Specific information on soil nailing method.

Division	Installation interval	Installation length	Installation steps	Notes
Soil nailing	1.5m × 1.5m	20.0 m	8 steps	D29, SD400

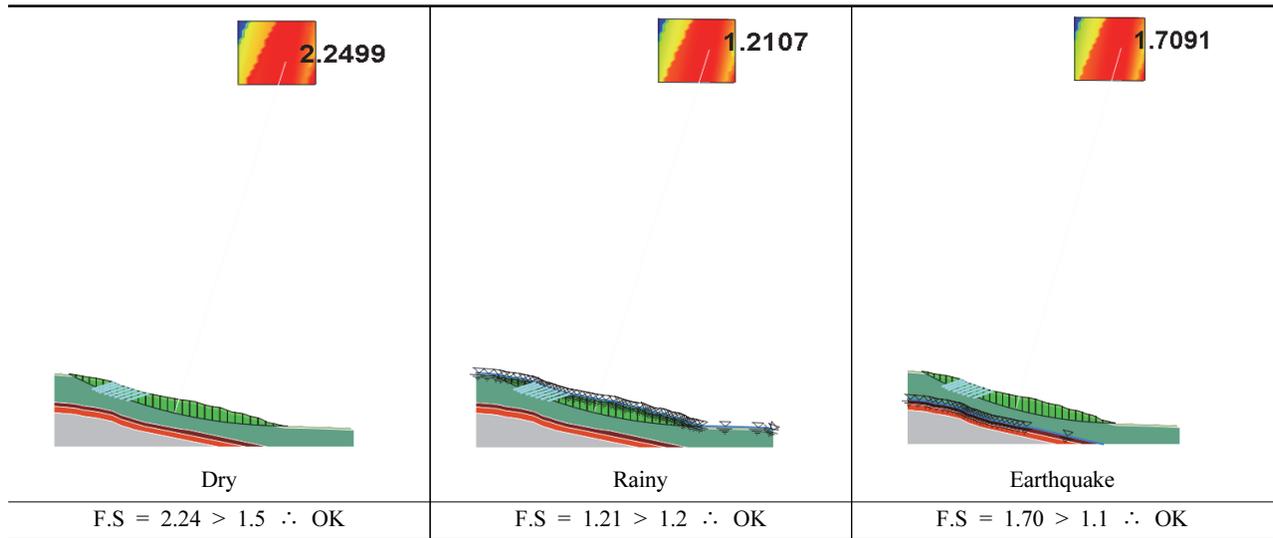


Figure 14. Slope stability according to the application of the soil nailing method.

트 옹벽과 지하수로 인한 붕락지 사이에 안정성을 고려해 보강공법으로 쏘일네일링을 시공하고 기왕의 표면형배수공 사이에 종배수로를 배치하는 것이 필요하다고 판단된다(Figure 14).

결론

1. 조사대상 지역의 지층은 표토층, 풍화토, 풍화암 및 연암층으로, 기반암으로 세일이 분포하고, 사암이 협재하는凸상 대지상 지형으로 붕적토 땅밀림 지역이었다.
2. 조사대상 지역에서 신축계 및 변위 측정기는 땅밀림이 재발생한 시기인 2020년 7월 1일부터 8월 27일까지 TW-1에서는 8.6 mm가 3.4 mm로(변이 차 5.2 mm), TW-2에서는 -6.5 mm에서 -7.6 mm(변이 차 1.1 mm), TW-3에서는 1.6 mm에서 8.1 mm(변이 차 6.5 mm)로 변화하여 땅밀림의 영향이 나타났다.
3. 2011년 7월부터의 항공사진을 분석한 결과, 땅밀림으로 인해 S50°W 방향과 E45°S 방향으로 피해가 발생하였으며, 2020년 재발생한 땅밀림 붕괴 방향은 S65°W, E45°S, E70°S 두 방향으로 진행되었다. 이 같은 결과는 지하수의 유향 분석 결과, 주 흐름 방향인 E82.5°S, S16.8°W의 방향과 유사한 것으로 나타나 지하수의 유출 방향으로 땅밀림이 발생하는 것으로 분석되었다.
4. 땅밀림지의 평균 산지 경사는 19.3°로 우리나라의 평균 산지 경사 25.°보다 낮은 완경사지에서 발생하였다. 인장균열이 발생한 상부보다 하부가 토양의 용적밀도가

낮게 나타났으며, 지하수가 유출되는 지역에서는 토양의 용적밀도가 낮게 나타났다. 수치지형도를 활용한 GIS 산사태위험등급 분석 결과, 1등급은 나타나지 않았으며, 2등급은 약 13.6%, 3등급은 약 53.0%, 4등급은 약 29.4%, 5등급은 약 4.0%로 나타났다.

땅밀림이 재발생한 조사 대상지는 땅밀림이 잘 발생되는 완구릉지 및 산사태위험등급이 낮은 3등급 이외 지역의 비율이 높은 결과로 볼 때, 땅밀림 위험지역에 대한 미래 땅밀림 위험지를 예측하는 빅 데이터를 수집하여 땅밀림 재해를 예방하기 위한 자료로 활용하는 것이 필요하다. 아울러 조사 대상지는 1차 땅밀림 발생 후 지반조사를 통한 안정성 검토를 실시하지 않고 복구하여 땅밀림이 재발생하였다. 특히 1차 땅밀림 발생 후 복구 시 종배수로 및 땅밀림과 밀접하게 관계하는 지하수 배출을 위한 수발공 및 지하 배수공을 설치하지 않아 땅밀림이 재발생 지역에 대해서는 이를 고려한 보다 완벽한 복구대책을 수립, 시공해야 한다.

감사의 글

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

References

Choi, K. 2018. Geological characteristics of land creep in Korea. Korean Society of Forest Environment Research

- 21: 108-117.
- 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. Physicochemical properties of organic and soil horizon in restoration area following forest landslide by creeping soils. *Journal of Agriculture & Life Science* 49(6): 27-35.
- Lee, M.K. and Kim, G.W. 2011. A comparison of landslide features using aerial photos. KSEG Conference April 7-9. 2011, Jeju. pp. 227-228.
- National Institute of Forest Science. 2017. A precedent investigation of the foreign and in the country status of landslide by land creeping, rehabilitation and management. National Institute of Forest Science Report. pp. 153.
- 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. 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. 2016. The actual conditions and management of land creep in Korea. *Journal of Korean Society of Forestry Environment Research* 19: 40-50.
- Park, J.H. 2018. What's land creep. *Korean Society of Forest Environment Research* 21: 96-107.
- Park, J.H., Seo, J.I. and Lee, C.W. 2019. The topography characteristics on the land creep in Korea. *Journal of Korean Society of Forest Science* 108(1): 50-58.
- Park, J.H. and Park, S.G. 2020. Analysis of tree-rings for influence of periods in which slow-moving landslides occur. *Journal of Korean Forest Society* 109(1): 62-71.
- 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.
- Park, J.H. 2021. Aerial photo data site in Korea. <http://map.ngii.go.kr/ms/map/NlipMap.do> (2022. 01. 03).
- 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.
- Woo, B.M. 1992. Erosion control and conservation. Hayngmunsa. pp. 310.

Manuscript Received : January 10, 2022

First Revision : February 7, 2022

Second Revision : April 6, 2022

Third Revision : May 2, 2022

Fourth Revision : May 26, 2022

Accepted : May 30, 2022