

경상북도 경주시 양북면 땅밀림지의 지질 및 토양물리성의 변화

박재현^{ID*} · 박성균

경남과학기술대학교 산림자원학과

The Geology and Variations of Soil Properties on the Slow-moving Landslide in Yangbuk-myun, Gyungju-si, Gyeongsangbuk-do

Jae-Hyeon Park^{ID*} and Seonggyun Park

Department of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology, Jinju 660-758, Korea

요 약: 이 연구는 경상북도 경주시 양북면 일원의 산지 땅밀림의 지질특성 및 땅밀림 후 변화되는 토양의 물리적 특성을 구명하고자 수행하였다. 조사지역의 지질은 생성시대가 백악기의 경상누층군으로 주된 구성 암석은 흑색셰일이며, 동쪽으로는 석영 장석질 반암이 분포하고, 그보다 아래쪽은 제4기 연일층군 역암이 분포한다. 암석은 매우 풍화된 풍화암의 형태를 나타내고 있어 땅밀림 지질로 나타났다. 땅밀림으로 무너진 최대 깊이는 12.0 m까지 붕적층으로 구성되어 있다. 땅밀림 방향은 비탈면 하부는 N46°E, 땅밀림지 상단부는 N62°E로 절리 및 주향 방향으로 발생하였다. 땅밀림으로 교란된 토양에서는 토양깊이 20 cm 까지는 토양경도가 기록되지 않는 완전교란상태이었고, 토양깊이 25 cm ~ 90 cm까지는 자연산림지 및 교란이 발생되지 않은 지역에 비해 토양경도는 1.4 ~ 4.7배 낮게 나타났다. 또한 땅밀림지역의 토양용적밀도는 1.24 ~ 1.29 g/cm³로 자연산림지보다 각각 약 1.6배 높게 나타났다. 토양의 공극률은 51.5 ~ 53.3%로 자연산림지보다 각각 약 1.3 ~ 1.4배 낮았다. 흑색 셰일지역의 토양투수계수는 8.75E-06 cm/s, 토양의 조공극률은 9.8%로 가장 낮게 나타났다.

Abstract: This study was conducted to measure the changes in the geological and soil properties following slow-moving landslide events in Yangbuk-myun and Gyungju-si, Gyeongsangbuk-do, South Korea. The geological characteristics of the study site comprised black shale in the Gyeongsang nodal group formed in the Cretaceous period and quartz feldspar carcinoma in the east side with conglomerate in the Yeonil group formed in the Quaternary period. The study site exhibited the geologic characteristics of a slow-moving landslide with severely weathered rocks. The maximum collapsing depth of the slow-moving landslide was 12.0 m with colluvial deposits. The strike and joint aspects in the slope areas of the slow-moving landslides were N46°E in lower slope and N62°E in upper slope, respectively. Soil hardness of ≤20 cm deep was not measured because of the completely disturbed soil resulting from soil creeping. Soil from 25 to 90 cm deep was 1.4-4.7 times softer in the slow-moving landslide areas than in the undisturbed or natural forests. Soil bulk density was 1.24-1.29 g/cm³ in land creep areas. Soil bulk in both areas was 1.6 times denser than that in the natural forest. The soil pore space was 51.5-53.3% in the land creep areas. The values are 1.3-1.4 times lower than those within the natural forest. Black shale areas showed the lowest coefficient of permeability (8.75 E-06 cm/s) and mesopore ratio (pF 2.7: 9.8%) compared with those resulting from other study areas.

Key words: geological and soil properties, the slow - moving landslide, black shale, soil bulk density, mesopore ratio

서 론

땅밀림은 활동면 위의 토피가 일체로 미끄러지는 산사

태의 한 형태로 이동 토피의 두께는 10 - 20m, 폭은 두께의 5 - 10배, 길이는 폭의 1.2 - 1.5배로 규모가 비교적 크고, 0.01 - 10mm/day 정도의 매우 느린 이동속도를 보인다(Varnes, 1984). 땅밀림은 사면경사가 25° - 35°정도인 집수사면에서 발생률이 높고, 지하수가 규칙적인 배열을 하는 경우 발생위험이 증가되는데(Nakamura, 1981), 땅밀림 발생시 상부 지표면에 활락애 및 인장균열이 형성

* Corresponding author
E-mail: pjh@gntech.ac.kr

ORCID

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

된다(Lee, 1991). Park et al.(2015)와 Park(2016)은 땅밀림 발생 시 토괴의 신축 및 매몰, 용기현상에 의한 계단상 지형이 발달하고, 도로의 변형, 구조물의 파괴, 수목의 이상성장 등의 뚜렷한 징후를 수반한다고 보고하였다. 땅밀림은 지층과 토층의 파괴가 발생하여 생기는데, 이와 같은 원인은 산체를 구성하는 지층과 토층에 내재하는 연약부가 상부 압력에 의해 파괴되기 때문이다. 산체의 구조 파괴로 인하여 지층과 토층의 본래의 구조는 교란되고, 토층 내에는 균열과 공극이 발생하여 체적이 증가한다. 이렇게 파괴되어 점성화된 토층이 아래쪽으로 이동하기 시작하여 표층부에 미지형이 형성되고, 이러한 미지형은 토층의 파괴로부터 생겨나는 것으로 지표면에 형성된 지형을 변화시킨다(Takaya, 2017).

일본에서는 땅밀림의 발생빈도가 높고 그 피해가 심하여 이에 대한 대책과 관련된 대응기술이 매우 발전되어 있으나, 우리나라에서는 발생사례가 적어 관련 연구 및 기술 축적이 부족한 실정이다(Woo et al., 1996; Park et al., 2003; 2005; Kim, 2004). 땅밀림에 토양교란에 의해 변형된 지괴의 토양강도는 토양용적밀도를 측정하여 분석하면 판단하기 쉬운데, 이는 산림작업 시 지표토양의 훼손 및 경화로 인하여 발생하는 산림훼손을 판단하는 지표가 된다(Krag et al., 1986). 한 예로 인위적 또는 기계적 답압으로 인하여 증가된 임도 및 작업로의 토양용적밀도가 교란되지 않은 자연임지 상태로 회복되기 위해서는 약 20년 이상이 경과되어야 한다는 연구결과가 있다(Sidle, 1980; Adams, 1981; Froehlich et al., 1985). 아울러 작업로 노면의 토양용적밀도는 토양표층으로부터 15cm 깊이까지 영향을 받기 쉬우며, 특히 Sidle(1980)은 벌채작업에 따른 토양교란 후 토양용적밀도는 7.5 cm 깊이에서 25~45%, 22.5 cm 깊이에서 25%가 증가한다고 하였다. 그러나 땅밀림지의 토양교란에 따른 토양용적밀도의 변화에 대한 연구는 전무한 상황이다.

이 연구를 수행한 경상북도 경주시 양북면 장항리 장항교차로 일원은 국도 4호선 건설을 위해 도로비탈면을 절취한 후, 2018년 10월 7일 전후에 집중호우에 의한 지반활동으로 땅밀림이 발생하여 산지 지괴가 밀려 내려가 도로비탈면에 설치된 콘크리트 옹벽 및 앵커 등을 파괴하고, 도로가 노체가 밀려올라가는 피해가 발생되었다. 따라서 이 지역은 장기적으로 땅밀림의 재발이 우려되고 2차 땅밀림이 발생할 경우 그 피해가 가중될 수 있는 지역으로서 명확한 원인규명과 적절한 대책이 시급히 요망되는 지역이다.

본 연구는 이러한 대상지의 땅밀림 지질특성 및 땅밀림 발생 후 변화되는 토양특성을 밝히기 위하여 수행하였다.

연구 방법

1. 대상지의 위치 및 범위

조사대상지는 경상북도 경주시 양북면 일원의 땅밀림지와 피해지역에 영향을 미치는 주변지역으로, 이 지역은 도로사면붕괴 이전에 산지 6부능선 부터 발생한 땅밀림에 의한 피해지로서 표고 10 m에서 땅밀림지 상부 경계면인 표고 152 m 까지 약 142 m의 범위에 위치하고 있으며, 땅밀림지의 평면적은 약 38,723 m²이다. 땅밀림지가 위치한 산지 최고표고가 260m임을 고려할 때 땅밀림은 약 약 6부 능선부터 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

2. 현장조사 및 지형분석

땅밀림지의 지형적 특성 및 발생 징후를 파악하기 위하여 현장조사를 실시하였으며, 부동산, 활락애, 균열, 요지, 용기지대, 단애 등의 위치, 방향, 경사, 규모 및 구조물의 파괴사례, 수목의 이상 성장 현상 등을 조사하였다. 땅밀림지에서 인장균열과 단차, 파괴지의 규모, 폭, 길이, 깊이를 GNSS(Gloval Navigation Satellite System)으로 조사하여 사진 촬영 및 야장에 스케치를 실시하고, 이를 GIS를 통해 분석하였으며(Figure 1), 암반의 공학적인 성질에 영향을 미치는 절리의 성질 중에서 중요한 요소인 절리방향, 절리간격, 절리 굴곡, 절리면 강도, 절리 틈새, 절리 충전 물질, 절리 수, 암괴 크기 등을 추가로 조사하였다. 이를 바탕으로 지형도 (1:25,000, 1:50,000)를 통해 땅밀림이 잘 발생하는 특징 및 미세지형분석을 실시하였다(Jau et al., 2000).

3. 토양특성 분석

땅밀림지에서는 인장균열의 발생에 따른 교란에 의해 토양공극 및 토양경도, 토양용적밀도에 변화가 발생하므로 이를 파악하기 위해 연구대상지인 땅밀림이 발생되지 않은 미교란지, 땅밀림지에서는 땅밀림지의 지질적 차이를 고려하여 흑색 셰일지역(①), 흑색셰일이 점토화 된 지역(②), 석영 장식질 반암이 풍화된 지역(③), 절토비탈면 표층토(④), 절토비탈면 토양깊이 50cm층(⑤), 반대쪽 비탈면 상단부(⑥), 대조구 산림지역(⑦)에서 토양이 교란되지 않도록 토양채취기(채토기)로 2반복 토양을 채취한 후 채취한 100cc 토양을 건조기에서 105℃로 48시간 건조 후 토양수분함유율, 토양채취용적과 건조토양의 비율로 토양용적밀도를 구하였고(Fuziwarra et al., 1996; David et al., 2005; Lee, 2006; Nyle and Ray. 2011), 토양의 삼상을 구하였다. 인장균열이 발생한 상, 하단부의 차이를 파악하기 위해 도로절토비탈면 상부(Ⓐ), 땅밀림지 하부(도로절토비탈면 상부, Ⓑ), 땅밀림 함몰 교란지(Ⓒ),



Figure 1. Location map of the study site.

상단부 단차 위(㉔), 대조구인 자연산림지(상단부 ㉔ 지, ㉔)반대사면 상부(㉔) 등으로 구분하고, 토양깊이 90cm 까지 측정이 가능한 관입식 토양경도계(DIK-5520)를 이용하여 토양깊이별 토양경도를 3반복 측정하였다. 또한 투수능측정기(DIK-4000)를 이용하여 투수속도를 구한 후 계산 값을 이용하여 토양의 투수계수를 측정하였다.

결과 및 고찰

1. 조사지역의 지질 및 지형, 입지특성

조사지역의 지질은 한국지질자원연구원의 지질도(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 2018)를 분석한 결과, 생성시대가 백악기의 경상누층군으로 주된 암석 구성은 흑색셰일이며, 동쪽으로는 석영 장식질 반암이 분포하고, 그보다 아래쪽은 제4기 연일층군 역암이 분포한다. 암석은 매우 풍화된 풍화암의 형태를 나타내고 있어 Choi(2018), Park(2018)의 연구결과와 비교하여 땅밀림 지질에 부합하는 것으로 판단된다. 대상지의 주향은 N50°E 이었으며, 경사방향은 사면경사와 동일하여 땅밀림 발생에 용이한 지질구조로 나타났다. 불연속면은 2방향수로 간

격은 보통(20 - 60cm)이었다. 국도 4호선 경주시 양덕동 장항교차로 도로 비탈면에 배수로 및 돌망태가 파괴된 지역을 중심으로 전석이 너덜과 같이 넓게 분포하고 있는 것으로 나타나, Park et al.(2015)의 보고와 같이 땅밀림지에 너덜이 분포하는 특징을 나타내고 있다. 흑색셰일은 땅밀림으로 발생한 단차에 고구마 모양으로 관입되어 있거나, 붕적토의 종 방향으로 분포하고 있는 것으로 나타났는데, 풍화가 심해 쉽게 부서지거나 강수 시 침투된 물에 쉽게 녹아 진흙의 형태를 나타내어 지층이 쉽게 밀리는 것으로 나타났다(Figure 2). Choi(2018)는 경상누층군의 사암과 이암, 셰일이 호층으로 나타나는 지역에서는 불연속면이 사면의 경사방향과 동일하고 풍화가 깊게 진전될수록 땅밀림의 발생이 용이하다고 보고하였는데, 이 지역의 흑색셰일 및 사암이 교호되는 지질특성과 유사한 것을 알 수 있다. 우리나라에서 땅밀림지 가운데 지질적으로 경상누층군에서 41.6%, 연일층군에서 8.4%의 땅밀림이 발생하였는데(Choi, 2018), 이 지역의 지질이 경상누층군과 연일층으로 구성되어 있어 우리나라의 땅밀림 발생이 가장 잘 일어나는 지질층에 속하는 것으로 나타났다.

조사지역의 입상은 혼효림이었으며, 주 수종은 상수리나



Figure 2. Distribution of black shale in the slow – moving landslide area.

무(*Quercus acutissima Carruth*)와 소나무(*Pinus densiflora* S. et Z.)이었다. 땅밀림으로 단차가 가장 크게 나타난 상부 지역은 표고 160 m까지 별채 후 묘지와 고사리 밭으로 이용되고 있어, 강수 시 집수가 매우 잘 발생하는 ㅁ형 지형을 이루고 있는 것으로 조사되었다. 아울러 도로비탈면 끝 부분 인장균열 및 단차가 발생한 지역은 묘지와 밭으로 평활하게 활용되고 있어, 이 지역도 강수 시 집수가 잘 되는 지역으로 평가된다.

토양형은 건조산림토양, 침식토양, 암쇄토양이었으며, B층까지의 토심은 90 cm 이상으로 매우 깊게 붕적되어 있는데, 땅밀림으로 무너진 최대 깊이는 12.0 m까지 붕적층으로 구성되어 있다. 땅밀림으로 이동하는 깊이를 나타내는 이동대는 300 cm 이상으로 나타났다. 인장균열 및 단차의 깊이는 0.60 – 12.0 m로 깊게 분포하고, 상단부 단차는 폭이 20.8m, 횡단면의 길이가 61.8 m로 무너졌으며, 양쪽으로 폭 2.5 – 8.5 m, 길이 90 – 150 m로 길게 양쪽으로 단차가 형성되면서 밀렸다. 토양구조는 괴상을 나타내었다. 토양수분 상태는 건조, 암석노출도는 20 - 30%의 범위로 이는 좌측 너털로 인한 영향으로 나타났다. 지형을 구분한 결과 이 땅밀림지는 구릉지로 조사지역의 위치(사면 10분비)는 1 - 6부의 범위를 나타내었다. 이 땅밀림지의 평면형은 ㅁ형미근형이었고, 종단면형은 ㅁ형으로 강수 시 집수가 잘 되는 지형적 특징을 나타내어 Park et al.(2015, 2016)의 연구결과와 유사하였다. 땅밀림 방향은 비탈면 하부는 N46°E, 땅밀림지 상단부는 N62°E로 주향과 유사한 방향으로 밀리는 상태이며, 도로 좌측의 계곡부 방향으로 땅밀림이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 도로 반대쪽 비탈면은 주향이 S30°E로 땅밀림 발생지와 역으로 경사방향이 진행하고 있어 반대쪽 비탈면은 파괴되지 않은 것으로 Kim et al.(2001; 2011)의 결과와 유사하였다.

땅밀림이 발생하는 지역의 미세지형을 지형도의 등고선을 이용하여 분석한 결과, 미세지형은 철상미근형(凸狀尾根形) 지형(Park, 2018)으로 나타났는데, 이러한 미세지형은 이 땅밀림지에서 2개소가 나타났다(Figure 1).

2. 조사지역의 토양용적밀도, 공극률

산림지역도 지역에 따라, 토심, 모암 등에 따라 토양용적밀도 및 토양공극률은 차이가 나타나는데(Jeong et al., 2002), 대상지의 토양용적밀도를 조사한 결과, 대조구인 자연산림지(⑦)의 토양용적밀도는 0.79 g/cm³이었으며, 반대쪽 비탈면 상단부 경작지는 0.96 g/cm³이었다. 그러나 석영 장식질 반암이 풍화된 지역(③)은 1.03 g/cm³으로 자연산림지보다 1.3배, 반대쪽 비탈면 상단부보다는 1.1배 높았다. 절토비탈면 표층토(④)의 토양용적밀도는 각각 0.53g/cm³으로 자연산림지보다 1.5배 낮았는데, 이와 같은 결과는 도로 개설에 따른 산지비탈면의 절취로 인해 표층토양이 교란된 데 따른 결과로 사료된다. 절토비탈면 토양깊이 50 cm층(⑤)의 토양용적밀도는 1.16 g/cm³으로 자연산림지보다는 높았는데, 이는 토양깊이에 따른 토양용적밀도의 증가에 기인한 결과로 사료된다. 그러나 흑색 세일지역(①), 흑색세일이 점토화 된 지역(②)에서의 토양용적밀도는 각각 1.24 g/cm³, 1.29 g/cm³로 자연산림지보다 각각 약 1.6배 높게 나타났다. 별채에 따른 토양용적밀도의 증가는 지표수대의 변화에 밀접한 관련을 가지며(Xu et al., 2002), 운재로 노면 토양의 용적밀도는 토양표층으로부터 15 cm 깊이까지 차량 등의 영향을 받아 높아지는 등(Sidle, 1980) 토양용적밀도가 높다는 것은 그만큼 토양의 무게가 증가한다는 의미를 가진다. 따라서 땅밀림지에서의 토양용적밀도에 대한 연구는 전무한 상황에서 Takaya(2017)는 점토의 함량이 높은 지역이 땅밀림에 취약하며, 땅밀림은 점토성분에 영향이 크다고 하였는데, 이

와 같은 결과는 흑색셰일이 점토화가 진행되면서 팡밀립에 주요하게 영향을 미치는 결과로 사료된다.

대상지의 토양공극률을 구한 결과, 대조구인 자연산림 지역(⑦)에서 토양공극률은 70.0%이었으며, 석영 장식질 반암이 풍화된 지역(③)은 61.3%, 반대쪽 비탈면 상단부(⑥)은 63.7 %로 자연산림지보다 낮았다. 절토비탈면 표층토(④)의 토양의 공극률은 80.0 %로 자연산림지보다 1.1배 높았는데, 이와 같은 결과는 도로 개설에 따른 산지비탈면의 절취로 인해 표층토양이 교란된 데 따른 결과이며, 절토비탈면 토양깊이 50cm층(⑤)의 토양의 공극률은 56.2 %로 자연산림지보다 낮았으나, 이는 토양깊이에 따른 토양용적밀도의 증가에 기인한 결과로 사료된다. 한편, 흑색 셰일지역(①), 흑색셰일이 점토화 된 지역(②)에서의 토양공극률은 각각 53.3%, 51.5%로 자연산림지보다 각각 약 1.3 - 1.4배 낮게 나타났는데, 이 또한 전술한 바와 같이 토양용적밀도의 증가에 기인한 결과로 판단된다. 즉, 토양공극률이 낮고 토양용적밀도가 높아지면 강수 시 토양공극에 침투한 빗물이 쉽게 중력방향으

로 유하지 못하여 토양하중이 증가하게 되고, 더욱이 팡밀립이 발생하기 쉬운 상태로 변하게 되며, 점토의 함량이 높은 지역일수록 팡밀립에 미치는 영향이 큰 데 (Takaya, 2017) 기인한 결과로 사료된다. 점토와 같이 미세한 입자의 토양은 모래와 같은 거친 입자의 토양보다 공극이 작기 때문에 흡수력이 더 크다는 Andy and William (1997)의 결과와 같이 흑색셰일이 강수 시 물을 흡수하여 하중이 커지게 되므로 팡밀립 발생에 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

3. 조사지역의 토양경도

대상지에서 토양깊이 90 cm까지 측정이 가능한 관입식 토양경도계(DIK-5520)를 이용하여 토양깊이별 토양경도를 3반복 측정된 결과(Table 1), 대조구로써 교란되지 않은 자연산림지(⑦)는 토심이 35 cm이었으며, 토양경도는 표층토양에서는 1.5 kgf/cm³이었으나, 토양깊이가 깊어질수록 토양경도는 증가하는 경향을 나타내었다. 반면 팡밀립이 발생한 경계면 상부(상단부 단차 위, ④)의 토양경도는

Table 1. Results of soil bulk density (g/cm³) and soil porosity (%).

Distribution	Site						Control (Forest)⑦
	①	②	③	④	⑤	⑥	
Soil bulk density (g/cm ³)	1.24	1.29	1.03	0.53	1.16	0.96	0.79
Soil porosity (%)	53.3	51.5	61.3	80.0	56.2	63.7	70.0

* Black shale area(①), Black shale turned into clay(②), Quartz, Feldspar porphyry weathering area(③), Cut slope overburden(④), Cut slope soil depth 50cm horizon(⑤), Upper section of the opposite incline(⑥), Forest area(⑦)

Table 2. Results of soil hardness (kgf/cm³)

Soil depth (cm)	Soil hardness (kgf/cm ³)					
	Site ①	Site ②	Site ③	Site ④	Control site ⑤	Site ⑥
0	1.0	3.0	0.0	2.2	1.5	1.5
5	5.1	7.0	0.0	6.0	8.1	8.0
10	5.1	11.0	0.0	8.0	9.0	7.5
15	5.1	13.5	0.0	8.0	7.6	7.5
20	5.1	14.0	0.0	10.0	8.2	7.5
25	5.3	15.0	3.2	10.7	9.4	11.5
30	10.2	15.0	8.0	14.0	15.8	11.5
35	12.2	15.0	8.0	14.8	20.0	12.0
40	13.0	16.0	8.3	17.5		12.0
45	16.1	17.0	8.3	17.5		12.0
50	18.9	17.0	8.3	17.5		12.0
60	19.0	17.5	8.7	17.5		12.0
65		17.5	12.0			12.0
70			12.0			12.0
80			12.0			12.0
90			10.4			12.0

* Top of cut slope(①), Land creep area bottom(top of cut slope, ②), Land creep sink disturbance area(③), Top relative height(④), Forest area(top of a concave ⑤), Upper section of the opposite incline(⑥)

Table 3. Results of coefficient of permeability (cm/s) and mesopore ratio (pF2.7, %)

Distribution	Site						Control (Forest)⑦
	①	②	③	④	⑤	⑥	
Coefficient of permeability (cm/s)	8.75E-06	2.07E-02	0.17E-02	0.61E-02	1.04E-02	0.79E-02	0.94E-02
pF2.7 (%)	9.8	10.7	21.4	21.3	23.4	22.7	34.6

* Black shale area(①), Black shale turned into clay(②), Quartz, Feldspar porphyry weathering area(③), Cut slope overburden(④), Cut slope soil depth 50cm horizon(⑤), Upper section of the opposite incline(⑥), Forest area(⑦)

자연산림과 유사한 값으로 나타났으나 토심은 60 cm로 나타났다. 그러나 팥밀림으로 교란되어 무너진 지역(㉠)에서는 토양깊이 20 cm까지는 토양경도가 0.0 kgf/cm³이었으며, 25 cm 깊이에서는 3.2 kgf/cm³, 30 - 35 cm 깊이에서는 8.0 kgf/cm³, 40 - 50 cm 깊이에서는 8.3 kgf/cm³, 60 cm에서는 8.7 kgf/cm³, 65 - 80cm에서는 12.0 kgf/cm³이, 90 cm 깊이에서는 10.4 kgf/cm³로 나타나 자연산림지(㉡)와 교란지 상부의 미교란지(상단부 단차 위, ㉢), 도로절토비탈면 상부(㉣), 팥밀림지 하부(도로절토비탈면 상부, ㉤)에 비해 현격하게 낮은 값을 나타내었다. 팥밀림으로 교란된 토양에서는 토양깊이 20 cm 까지는 토양경도가 매우 낮은 완전교란상태가 되고, 토양깊이 25 cm부터 90 cm까지는 자연산림지 및 교란이 발생되지 않은 지역에 비해 토양경도는 1.4 - 4.7배 낮게 나타났다. 이와 같은 결과는 팥밀림으로 인해 토양이 교란 또는 파괴되어 흐트러짐으로써 토양경도가 현격히 낮아지는 결과로 팥밀림에 의한 토양교란이 토양경도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 토양경도의 변화는 토양의 훼손이나 경화로 인하여 발생하는 산림훼손을 판단하는 지표가 되는데(Nakamura, 1981; Krag et al., 1986), 이러한 결과는 팥밀림지에서도 토양교란의 중요한 지표라 판단된다.

4. 조사지역의 투수계수(cm/s), 조공극률(pF2.7, %)

대상지에서 토양의 투수계수를 조사한 결과, 대조구인 자연산림지역(㉦)에서 토양의 투수계수는 0.94E-02 cm/s로 반대편사면의 토양투수계수(0.79E-02 cm/s)와 유사한 값을 나타내었으며, 흑색셰일이 점토화 된 지역(㉧)의 토양투수계수는 2.08E-02 cm/s로 조사지역 중 가장 높게 나타났는데, 이는 팥밀림으로 무너져 사암이 풍화된 토양과 섞여 토양공극이 파괴되어 토양이 흐트러진 데 따른 결과라 사료된다. 그러나 흑색 셰일지역(㉨)은 토양투수계수가 8.75E-06으로 매우 낮은 값을 나타내었는데, 이는 흑색 셰일이 점토성분으로 이루어져 토양이 물을 머금고 유출하지 않아 토양의 배수가 잘 이루어지지 않기 때문인 것으로 사료된다. 이 팥밀림지(㉩)는 미고결 된 토양으로 이루어져 있어 상부 요지로부터 강수 시 물이

침투되면서 흑색셰일 등이 물을 머금고 있는 등 원활한 배수가 이루어지지 못한 상태에서 지하수의 영향으로 팥밀림이 발생한 것으로 사료된다. 한편 모래층으로 이루어진 석영 장석질 반암이 풍화된 지역(㉪), 절토비탈면 표층토(㉫), 절토비탈면 토양깊이 50 cm층(㉬)의 토양투수계수는 각각 0.17E-02, 0.61E-02, 1.04E-02 cm/s로 비교적 투수가 용이하게 이루어지는 것으로 나타났다. 이는 흑색셰일의 점토층과 사암층의 투수계수가 현격하게 다르기 때문에 점토와 같이 미세한 입자의 토양은 모래와 같은 거친 입자의 토양보다 투수계수가 작다는 Andy와 William(1997)의 연구결과와 같다.

산림의 수원함양기능을 나타내는 조공극률(pF2.7, %)을 분석한 결과, 대조구인 자연산림지역(㉦)에서 토양의 조공극률은 34.6%로 가장 높았으며, 반대쪽 비탈면 상단부(㉧)의 토양의 조공극률은 22.7%로 대조구인 산림지역 보다는 낮았는데, 이는 경작 등의 활동에 따른 영향으로 사료된다. 아울러 석영 장석질 반암이 풍화된 지역(㉪), 절토비탈면 표층토(㉫), 절토비탈면 토양깊이 50 cm층(㉬)에서 토양의 조공극률은 각각 21.4%, 21.3%, 23.4%로 유사하게 나타났다. 반면 흑색셰일지역(㉨)과 흑색셰일이 점토화 된 지역(㉩)의 토양조공극률은 각각 9.8%, 10.7%로 매우 낮게 나타났는데 이는 모암인 흑색셰일의 영향에 따라 토양공극은 미세하지만 물을 머금으면 쉽게 기저유출 되지 않으므로 팥밀림에 불리한 영향을 미치는 것으로 사료된다. 점토성분을 많이 함유하는 흑색셰일의 지질적 특성에 따라 이 지역 토양의 조공극률은 낮게 나타나고, 이로 인해 점토를 다량 함유하고 있는 토양이 물을 머금게 되어 지하수로 배수가 원활하지 못하게 되므로 팥밀림 발생에 영향을 미치는 것으로 사료된다.

결론 및 제언

1. 조사대상지는 경상북도 경주시 양북면 일원의 팥밀림지와 피해지역 주변지역으로, 표고 10 m에서 팥밀림지 상부 경계면인 표고 152 m까지 약 142 m의 표고차를 가지며, 팥밀림지 평면적은 약 38,723 m²이

다. 팅밀림이 발생하는 지역의 최고표고는 260.0 m로 팅밀림지는 약 6부 능선부터 무너지는 것으로 나타났다.

- 조사지역의 지질은 백악기의 경상누층군으로 주된 구성 암석은 흑색셰일이며, 동쪽으로는 석영 장석질 반암이 분포하고, 그보다 아래쪽은 제4기 연일층군 역암이 분포한다. 암석은 매우 풍화된 풍화암의 형태를 나타내고 있어 팅밀림 지질로 나타났다. 팅밀림으로 무너진 최대 깊이는 12.0 m까지 붕적층으로 구성되어 있다.
- 팅밀림 방향은 비탈면 하부는 N46°E, 팅밀림지 상단부는 N62°E로 절리 및 주향 방향으로 발생하였다.
- 팅밀림으로 교란된 토양에서는 토양깊이 20 cm까지는 토양경도가 매우 낮은 완전교란상태이었고, 토양깊이 25 cm부터 90 cm까지는 자연산림지 및 교란이 발생되지 않은 지역에 비해 토양경도는 1.4 - 4.7배 낮은 결과를 나타내었다. 흑색 셰일지역(①), 흑색셰일이 점토화 된 지역(②)에서의 토양용적밀도는 각각 1.24, 1.29 g/cm³로 자연산림지보다 각각 약 1.6배 높게 나타났다. 흑색 셰일지역(①), 흑색셰일이 점토화 된 지역(②)에서의 토양의 공극률은 각각 53.3, 51.5%로 자연산림지보다 각각 약 1.3 - 1.4배 낮은 값으로 나타났다.
- 흑색 셰일지역(①)은 토양투수계수가 8.75E-06 cm/s로 다른 지역보다 가장 낮은 값으로 나타났으며, 토양의 조공극률도 9.8%로 가장 낮게 나타났다.

따라서 경상북도 경주시 양북면 일원에는 이 연구지역과 같은 지질구조를 가지는 지역이 넓게 분포하고, 배수구조가 불량한 지역이므로 이와 같은 특성을 지니는 지역을 조사하여 추후 팅밀림 발생을 미연에 방지할 수 있도록 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

References

- Adams, P.W. 1981. Compaction of forest soils: a pacific northwest extension publication. Oregon. USDA Forest Service. PNW-217.
- Andy, D.W. and William, J.E. 1997. Environmental Hydrology. pp. 480.
- Choi, K. 2018. Geological characteristics of land creep in korea. Korean Society of Forest Environment Research 21: 108-117.
- David, M.S., Jeffry, J.F., Peter, G.H., David, A.Z., 2005. Principles and applications of soil microbiology. Donghwapub. pp. 770.
- Froehlich, H.A., Miles, D.W. R. and Robbins, R.W. 1985. Soil bulk density recovery on compacted skid trails central Idaho. Soil Science Society American Journal 49(4): 1016-1017.
- Fuziwara, S., Anzai, M. and Kato, T. 1996. The Method and Application of Soil Test. pp. 281.
- 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 resions. Journal of Korean Forest Society 91(6): 694-700.
- Kim, J.S., Han, S.H. and Jeong, G.C. 2001. Surface geophysical investigations of a slope-failure terrane at Wiri, Andong, Korea. Econical Environmental Geology 34(2): 193-204.
- Kim, M.I., Kim, J.S., Kim, N.W. and Jeong, G.C. 2011. Surface geophysical investigations of landslide at the Wiri area in southeastern Korea. Environmental Earth Sciences 63: 999-1009.
- Kim, H.G. 2004. Slope stability and characteristics of shallow landslide occurred in granite hillslopes. Master. Thesis, KyungHee University, Seoul, Korea. pp. 150.
- Krag, P., Higginbotham, K. and Rothwell, R. 1986. Logging and soil disturbance in southeast British Columbia. Canadian Journal of Forestry Research 16: 1345-1354.
- Lee, M.W. 2006. Soil biology. Dongguk University. pp. 416.
- Lee, Y.N. 1991. Landslide II. Society of Geotechnical Engineering 7(1): 105-113.
- Nakamura, J. 1981. A study of forecast landcreep(I). Society of Forest Erosion Control and Road Engineering 16: 162-163.
- Nyle, C.B. and Ray, R.W. 2011. Elements of the nature and properties of soils. Kyobobook. pp. 679.
- Park, J.H. 2016. The actual conditions and management of land creep in korea. 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., 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., Lee, C.W., Kang, M.J. and Kim, K.D. 2015. Analysis of characteristic of forest environmental factors on land creeping occurrence. *Journal of Agriculture and Life Science* 49(5): 133-144.
- Sidle, R.C. 1980. Impacts of forest practices on surface erosion. A Pacific Northwest Extension Publication, Oregon. USDA Forest Service. PNW 195: 1-5.
- Takaya, S. 2017. Facts of landcreep. Nokdo Publication. pp. 255.
- Varnes, D.J. 1984. Slope movement types and processes. Transportation Research Board Special Report. pp. 11-33.
- Woo, B.M., Park, J.H., Choi, H.T., Jeon, G.S. and Kim, K.H. 1996. A study on the characteristics of the landslide in hyuseok-dong(I) - topographical characteristics and surface displacement -. *Journal of Korean Forest Society* 85(4): 565-570.
- Xu, Y.J., Burger, J.A. Aust, M. Patterson, S.C. Miwa, M. and Preston, D.P. 2002. Changes in surface water table depth and soil physical properties after harvest and establishment of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) in Atlantic coastal plain wetlands of South Carolina. *Soil and Tillage Research* 63: 109-121.
-
- Manuscript Received : November 5, 2018
First Revision : December 10, 2018
Second Revision : January 7, 2019
Accepted : January 28, 2019