

충북지역 토사재해에 영향을 미친 요소들에 대한 연구*

신원정** · 홍성찬*** · 김종연****

A Study on the Factors Affecting Debris Disasters in Chungbuk Province*

Won Jeong Shin** · Seong Chan Hong*** · Jong Yeon Kim****

요약 : 2020년 7월 말~8월 초에 발생한 집중호우로 인하여 충청북도에 457건의 토사재해가 신고되었다. 그중 충주시에서 210건의 신고가 있었으며, 이로 인한 피해 면적은 376.23ha로 충청북도 피해 전체의 거의 절반에 달했다. 본 연구에서는 2020년 발생한 충청북도 지역의 토사재해 특성을 파악하기 위하여, 토사 재해의 피해 현황 및 재해의 원인을 살펴보고 토사 재해의 유형을 구분하였다. 특히 충주시의 산사태 발생 장소를 중심으로 하여 각종 정보 시스템에서 피해 발생 위치의 암석특성, 위험도 등을 분석하고, 2008년~2021년 사이의 위성사진을 이용하여 해당 기간에 발생한 토사재해의 특성을 파악하였다. 분석 결과에 의하면 41개소에서는 토석류가 발생하였으며 그중 24개소에서는 토석류와 사면침식 및 토사유출이 모두 인식되었다. 토석류만 발생한 것으로 확인된 17개소 가운데 10개소는 곡지를 중심으로 대규모의 침식과 퇴적이 발생했다. 다른 지점에서는 지표유출로 인한 사면 침식 및 토사 유출이 주를 이루었다. 한편 토사재해가 발생한 곳 가운데 157개소(47.1%)는 2008년~2021년 사이에 식생이 완전히 제거된 바 있으며, 57개소(17.7%)에서는 부분적인 식생의 제거가 파악되었다. 즉, 토사재해 발생지가 전체의 64.9%에 달하여 식생의 제거가 상당한 영향을 준 것으로 추정된다. 또한 태양광 발전 시설은 하천과 곡지 주변의 시설들로 토사재해의 원인 지역이 아닌 단순 피해 지역으로 파악되었다.

주요어 : 토사재해, 토석류, 사면침식, 식생제거, 충청북도

Abstract : Due to torrential rains that occurred in late July to early August 2020, 457 landslides were reported in Chungcheongbuk-do, of which 210 were reported in Chungju-si to claim governmental relief fund. The damaged area was 376.23ha in Chungju-si and 333 landslide locations were identified. Using various information systems, the characteristics of rocks and the degree of risk were analyzed, and the characteristics of landslide disasters that occurred between 2008 and 2021 were identified using satellite images. According to the analysis result, debris flow occurred in 41 places, and debris flow, landslide and/or sediment flux caused by surface runoff were all recognized in 24 places. Large-scale erosion and sedimentation occurred in 10 of the 17 sites where only debris flow occurred. At other points, landslide and/or sediment flux caused by surface runoff were predominant. Meanwhile, vegetation was completely removed between 2008 and 2021 in 157 places (47.1%) of places where landslides occurred, and partial vegetation removal was identified in 57 places (17.7%). In other words, it is estimated that the removal of vegetation had a significant impact as the landslide disaster occurred at 64.9% of the total. Solar power generation facilities were located along rivers and valleys, and were identified as simply damaged areas rather than the cause of landslides.

Key Words : Debris disaster, Debris flow, Slope erosion, Vegetation removal, Chungbuk

*이 논문은 충북대학교 국립대학육성사업(2020)지원을 받아 작성되었음.

**충북대학교 교육개발연구소 박사후연구원(Post-Doctoral Research Fellow, Education Development Research Center, Chungbuk National University, shjles2995@naver.com)

***한국교원대학교 지리교육과 조교수(Assistant Professor, Department of Geography Education, Korean National University of Education, schong@knue.ac.kr)

****충북대학교 지리교육과 교수(Professor, Department of Geography Education, Chungbuk National University, terrai@cbnu.ac.kr)

I. 서론

사면에서의 침식과 퇴적을 통해 나타나는 사면 구성 물질의 이동은 중력에 의한 물질 이동인 매스 웨이스팅과 지표 유출에 의한 침식으로 구분할 수 있다. 이 가운데 중력에 의하여 지배되는 침식과정은 흔히 산사태로 정의되며, 낙석, 유동성 운동, 사태로 세분된다(Keller and Blodgett, 2007; 이동우 등 역, 2007). 이 과정들은 유역분지를 구성하는 사면이나 곡지로부터 외부로의 물질 유출을 수반하게 되며, 이렇게 유출되는 토사는 곡지와 그 주변에 인명·재산 피해를 야기하게 된다. 따라서 이를 토사재해로 규정할 수 있으며, 우리나라와 일본에서 발생하는 토사재해는 주로 강우에 수반되어 나타나는 지형적 재난에 해당한다. 산지나 곡지에서 만들어진 토사가 수분에 완전히 포화되어 수분을 따라 사면의 방향으로 이동될 경우 인간에게 피해를 주는 경우가 많다. 이 토사재해에는 다양한 퇴적물질의 급격한 이동 현상들이 포함되나, 주로 사면에서의 유수에 의한 침식 작용과 수분에 완전히 포화되어 유체와 유사한 운동 양상을 보이는 토석류(debris flow)가 대표적이다(타카하시 타모츠, 2005; 한국시설관리공단 시설안전연구소 유지관리기술그룹 역, 2011).

한편 우리나라에서는 주로 하계(7월-9월)에 토사재해가 발생하였으며, 이는 많은 재산과 인명피해를 유발해왔다. 2010년~2020년 사이에는 전국적으로 3,400ha의 면적이 산사태 피해를 입어 7,359억 원의 복구비용이 발생하였으며 61명이 희생되었다(산림청, 2021). 이러한 우리나라의 산사태 피해는 집중 호우 및 태풍과 연결되어 나타나는 것이 일반적이다. 특히 집중호우가 장기간 연속적으로 발생하거나(2020년), 집중호우와 태풍의 내습 시기가 서로 겹쳐서 나타날 때 피해가 발생하는 경우가 많다(2011년, 2012년, 2019년).

1976년 이후 우리나라의 연평균 산사태 발생 면적은 692ha였으며, 최근에는 연간 산사태 발생 면적이 231ha(1980년대) → 350ha(1990년대) → 713ha(2000년대)로 증가해왔다(김연중 등, 2020). 특히 2016년 이후에는 산사태 피해가 더욱 증가하여 2020년에는 무려 1,343ha의 피해가 발생하였다.

이처럼 산사태 발생의 증가는 기후 변화와 무관하지 않다. 1차적 원인으로는 시간당 50mm이상의 집중호우 발생 빈도가 증가한 것을 고려할 수 있다. 1990년대 107

회에 달하던 집중호우 발생 횟수는 2000년대 129회로 증가했으며, 2010년대에는 142회로 증가하였다. 특히 2020년에는 7월 28일~8월 11일 간의 지속적인 집중호우로 인해 약 1,194ha에 달하는 대규모 피해가 발생하였다.

또한 태풍의 발생 및 우리나라에 영향을 주는 태풍의 수 변화도 고려해볼 수 있다. 1981~2010년의 기간을 평년으로 할 때, 태풍 발생 건수는 6월 1.7개, 7월 3.6개, 8월 5.8개, 9월 4.9개였다. 하지만 2018년에는 태풍 발생 건수가 4개(6월), 5개(7월), 9개(8월), 4개(9월)로 증가하였으며, 2019년에는 1개(6월), 4개(7월), 5개(8월), 6개(9월), 2020년에는 1개(6월), 7개(8월), 4개(9월)로 나타났다. 우리나라에 직접적으로 영향을 미친 태풍의 수 역시 2018년에 5개(6월 1개, 8월 2개, 9월 2개), 2019년에 7개(7월 1개, 8월 3개, 9월 3개), 2020년에는 4개(8월 3개, 9월 1개) 등으로 평년값인 3.1개를 넘어서고 있다. 물론 이 변화가 연속적인 증가 유형은 아니며 연간 변동이 있으나, 전반적으로는 증가하는 경향이 나타난다.

한편 충청북도는 2020년 7월과 8월에 집중적인 강우가 발생하였으며, 이로 인해 총 457개소 지점, 376.23ha의 면적이 산사태 피해를 입었다. 하지만 산사태로 인해 많은 재산 피해를 입었음에도 불구하고, 이에 대한 특성이나 원인에 대해서는 명확히 조사되지 못하였다. 따라서 앞으로의 토사재해를 대비하기 위해서는 최근(2020년)에 발생했던 사례를 보다 면밀히 살필 필요가 있으며, 토사재해의 원인에 대한 규명도 필요하다고 생각된다.

이에 본 연구에서는 2020년 8월 장마 기간 동안 발생한 충청북도의 토사재해의 발생 지점의 위치와 각 지점의 특성을 분석하고자 하였다. 특히 피해가 가장 심하게 발생한 충주시 지역을 중심으로 발생한 토사재해의 특성과 영향을 미친 요인들을 파악하고자 하였다. 충주시에는 지자체 소관 지역인 사유지 및 지자체 소유지에서 152건, 94.12ha의 피해가 신고되었으며, 사방댐 3개소 3ha가 피해를 입은 것으로 신고되었다. 또한 계류보전 지구 1개소 0.7ha, 국유림 41개소 65.62ha, 국유림 내 임도 13개소 7.89ha의 피해 신고가 이루어졌다. 충주시는 총 210개소 이상의 지점에서 산사태가 발생하고, 약 171.33ha에 달하는 면적이 피해를 본 것으로 신고되었다. 이는 충청북도 전체 피해 지점의 46.0%, 피해 면적으로는 45.5%에 해당하여, 충청북도 산사태의 거의 절반 가까이 충주시에서 발생했다고 할 수 있다.

본 연구를 위해 산사태위험정보시스템(sansatai.forest.

go.kr)과 KAKAO MAP(map.kakao.com), 그리고 Google Earth 위성사진을 이용하여 충주시의 토사재해 발생 지점의 특성을 분석하였다. 또한 '산사태위험정보시스템' 상의 정보(산사태위험등급, 토심, 모암, 임상, TWI, 사면 경사, 사면길이, 사면 곡률 사면 방위)를 각 지점별로 모두 확인하였다. 그러나 현재의 산사태 위험 정보는 5m×5m의 면적을 기본 단위로 하는 정보 체계로, 산사태가 발생한 지역의 정보와 명확히 일치하지 않는 문제점이 나타났다(그림 1). 즉, 산사태 발생지역이라 하더라도 각 방안에 따라서 각각의 값이 다르게 나타나는 문제가 있어 대뿔값의 산정에 문제가 있었으며, 특히 모암, 임상 등을 제외한 모든 값들이 이러한 영향을 받는 것으로 나타났다. 모암 및 임상의 경우에는 각각 1:5,000 및 1:50,000 기본도의 정보를 활용하고 있으며, 다른 정보들은 픽셀별로 계산되는 값으로 종합적인 산사태 위험도가 계산되어 있다. 따라서 본 연구에서는 신고가 이뤄진 곳의 위성사진을 확인하여 중앙 부분의 모암과 임상 특성을 파악하였고, 이를 통하여 토사재해와 발생 지점의 특성을 파악하였다. 그러나 모든 지점에 대한 분석이 가능한 것은 아니었으며, 일부 지역은 2020년 이후의 위성사진이 제공되지 않고 있어 그 경우는 배제하였다. 또한 연구에 이용된 통계 자료는 피해 신고의 횟수로, 실제 피해 발생 지점을 명확히 정리한 것이 아니었다. 한 건의 신고에 다수의 지점들이 포함된 경우가 있어, 추가 분석을 통해 이를 모두 파악하였고 중복 지점들은 제거하였다.

II. 충청북도 및 충주시의 산사태 피해 개관

1. 토사 재해의 피해 현황

충청북도청에서 집계한 2020년 충청북도의 토사재해 피해 지역의 신고 상황은 다음과 같다.

본 연구에서는 충청북도 충주시에서 산사태 피해가 접수된 지점들을 대상으로 각 지점별 산사태 피해의 특성을 파악하였다. 특히 가장 피해면적이 가장 넓은 충주시를 중심으로 살펴보았다. 피해 신고 건수와 실제 피해 지점을 종합하여 정리한 결과, 충주시에서는 사유지 및 지방자치단체 소유지역에서 320개소, 국유지에서 17개소를 확인하였다. 신고 건수와 실제 피해 지점의 개수가 차이는 이유는, 한 건의 신고에서 여러 지점의 피해를 접수한 경우들이 포함되었기 때문이다. 그리하여 중복되는 지점을 제외하고 피해가 발생한 333개의 지점을 위성사진 상에 표기하였다(그림 2). 그 결과 주로 충주시의 동북부 지역에 피해지점들이 집중적으로 분포하고 있는 것이 확인되었다.

2. 토사 재해의 원인

이러한 토사재해는 여러 원인에 의해 발생할 수 있으나, 기본적으로 지질 분포와 사면경사의 영향을 생각해 볼 수 있다. 일반적으로 지질은 암석이 경연차 및 풍화

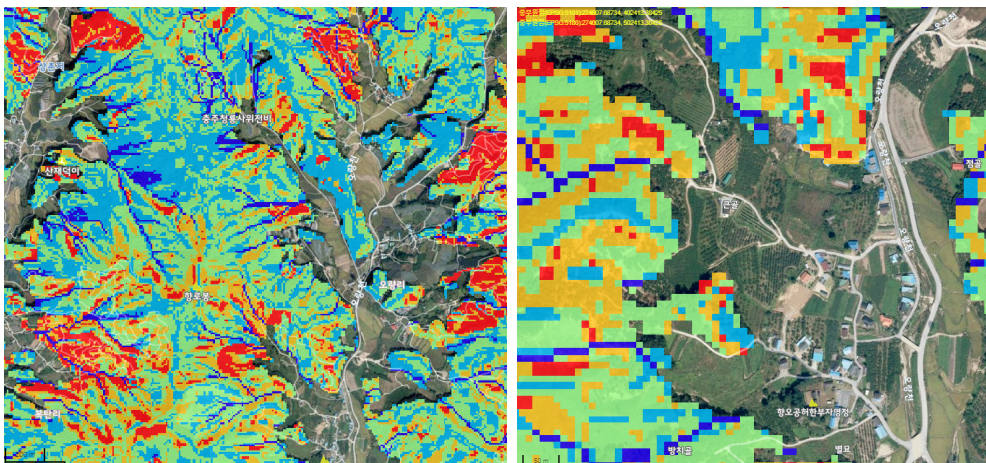


그림 1. 산사태 위험지도의 사례

자료 : 산사태위험정보시스템.

표 1. 충청북도의 사유지 산사태 및 토사유출 피해 현황(충청북도)

구분	청주	충주	제천	보은	옥천	영동	증평	진천	괴산	음성	단양	합계
자연산사태	8	164	44	-	-	1	-	22	4	16	32	291
임도설치지	-	19	21	4	-	-	-	3	-	10	5	62
벌채·조림지	-	11	11	-	-	-	-	3	-	-	13	38
태양광	-	2	2	-	-	-	-	-	-	-	-	4
합계	8	196	78	4	0	1	0	28	4	26	50	395

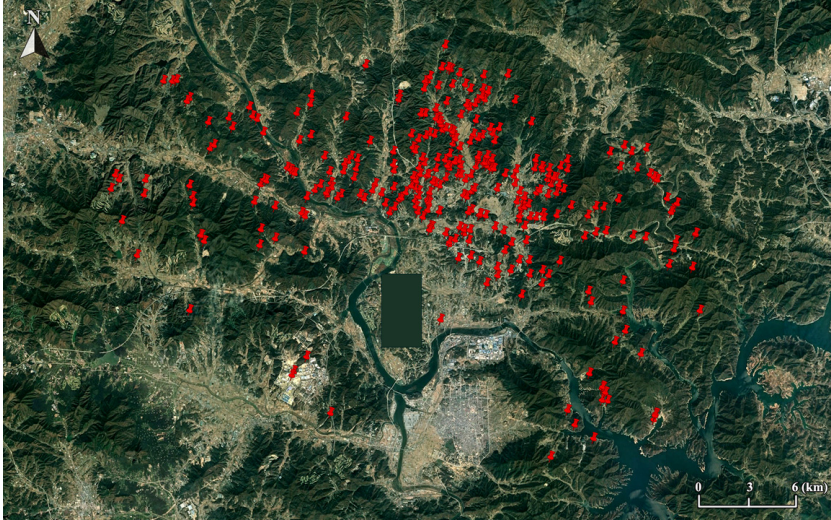


그림 2. 충주시 인근의 토사재해 발생 지점

자료 : 구글어스(Google Earth).

에 따른 특성에 따라 산사태 발생에 영향을 준다. 기반암이 산지 토사재해에 미치는 영향으로는 사면 붕괴 작용과 관련된 사면 구성 물질 생산 부분, 그리고 토양층의 깊이 분포 등이 있다.

본 연구 지역의 지질은 중생대의 화강암과 고생대 옥천계 퇴적암 및 변성암, 그리고 선캄브리아의 변성암(편암과 편마암)으로 구성되어있다. 이들은 풍화 환경에 따라 각각 다른 풍화 양상을 보이며, 생성되는 풍화산물들도 차이를 지닌다. 특히 화강암 지역의 경우 새프롤라이트층이 형성되어, 이후의 사면 침식에서 상당한 양의 풍화산물이 제거된다. 이에 비하여 석회암 계열의 암석은 용식과정을 통한 지형 변화도 유발되지만, 용식과정을 거친 풍화 산물과 풍화되지 않은 기반암 간에 경계가 형성된다. 이때 기반암 부분은 불투수층의 역할을 하게 되고, 수분이 공급되는 경우 풍화층이 수분에 의해 쉽게 포화된다. 변성암의 경우에도 화강암과는 다른 풍화 양상이 나타난다.

특히 본 연구 지역의 경우 화강암 분포 지역과 편마암 분포 지역의 특성이 지형 경관의 차이로 확인된다. 충주시에서 화강암 분포 지역은 소위 산록완사면 형태의 완경사 사면이 나타나고, 편마암 지역은 상대적으로 경사가 급한 산지가 나타나는 것으로 알려져 있다. 또한 주변 지역에는 화강암 풍화대가 노출된 구릉 지형들이 나타난다(장재훈, 2002). 이러한 지질적인 특성은 산지의 토사재해를 유발하는데도 영향을 미치게 된다. 화강암의 경우 풍화대로 인해 비교적 완경사의 지형이 나타나지만, 대신 풍화대 부분이 상대적으로 침식에 취약하기 때문에 사면 침식이 보다 활발하게 이루어지게 된다.

본 연구 지역에서 산사태가 발생한 지역의 암석 분포는 그림 3과 같으며, 산사태 발생 지역 333개소 가운데 화강암 분포 지역이 249개소로 75%에 달했다. 이에 비하여 편마암 및 편암 부분이 43개소(12.9%), 천매암 및 점판암 부분이 26개소(7.8%), 퇴적암 부분이 15개소(4.5%)로 나타나고 있었다. 물론 각 암석의 분포 면적을

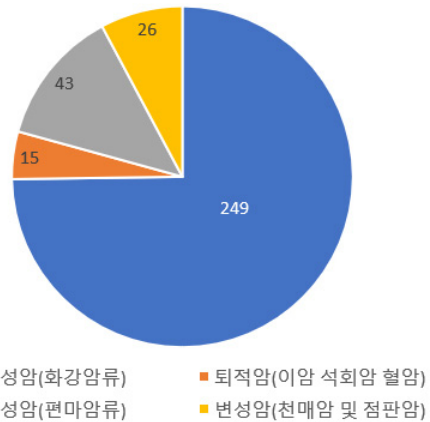
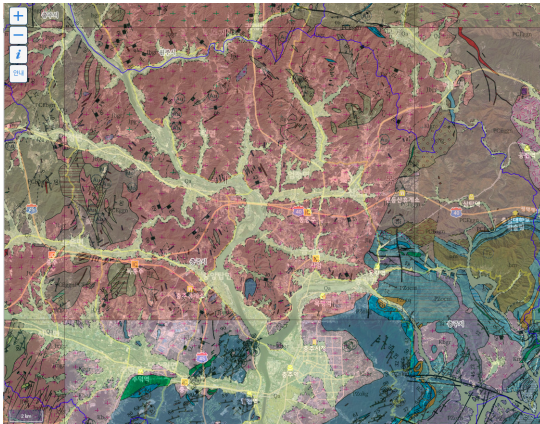


그림 3. 충주시와 인근 지역의 지질과 토사재해발생 지점의 암석 종류별 분포

자료 : 지오빅데이터 오픈플랫폼, 산사태위험정보시스템.

보더라도 화강암의 분포 지역이 넓기는 하나, 전반적으로 화강암 부분에서 산지 토사재해의 강력하게 발생했던 것으로 추정할 수 있다. 그리고 이는 이전 지역에 대한 이전의 연구 결과와도 유사하다(김민석, 2016).

또한 단순히 암석 종류 이외에도 암석이나 토양이 지니는 특성이 토사재해 발생에 영향을 줄 수 있다. 김경수(2007)에서 편마암, 화강암, 3기 퇴적암이 분포하는 지역 194개소를 분석한 결과, 세립 입자의 비율이 높고, 액성한계(liquid limit)가 낮은 경우, 공극률이 크고, 밀도가 낮은 곳에서 산사태가 잘 일어나는 것으로 연구되었다. 그리고 화강암류에서 투수 계수가 가장 큰 것으로 나타났으며, 동일한 종류의 암석일 때에는 투수성이 양호한 경우에 산사태가 빈번하게 발생하였다(김경수, 2007).

한편 화강암 지역의 경우 사면 경사가 21.7° ($N=243$, $\sigma=7.49$), 퇴적암 지역은 24.6° ($\sigma=7.19$), 편마암 지역은 23.2° ($\sigma=9.88$), 점판암 등의 지역은 19.7° ($\sigma=9.77$)로 나타났다. 이들의 표준 편차가 크게 나타나는 이유는 인위적인 개발(도로 건설, 공원 건설 등)로 인해 평탄화가 진행되거나, 산지와 곡지가 함께 분포하는 지역을 포괄하는 것으로 생각된다. 특히 산사태 피해에 대한 신고가 이뤄진 곳들은 상당수가 인위적인 시설들이 분포하는 지역으로, 이러한 환경사 부분의 문제가 포함된 것으로 판단할 수 있다. 하지만, 전반적으로는 사면의 경사가 산사태 발생에 큰 영향을 주지는 못하는 것으로 보인다.

III. 충주시 토사재해의 유형

토사재해의 유형은 다양한 기준에 따라 구분될 수 있다. 산지에서 발생하는 토양 및 풍화산물에 대한 침식 작용은 중력에 의한 사면 붕괴 작용과 유수에 의한 사면 침식 과정으로 구분할 수 있다. 중력에 의한 사면 물질 이동은 소위 '활동성 운동'으로 구분되며, 사면의 물질이 중력의 영향을 받아 수분에 포화되지 않은 상태로 전단면을 따라 이동하는 양상을 의미한다. 이에 비하여 유수에 의한 침식 작용은 사면에서의 침식과정과 그로 인한 물질의 이동과정으로 세분해 볼 수 있다. 통상적으로 사면의 하부에서는 퇴적이 발생하게 되며 경로 상에서는 침식과 퇴적이 동시에 나타나는 특징이 있다. 추가적으로 유동성 운동이라고 분류되는 물질 이동은 구성 물질의 특성에 따라서 이류, 토석류 등으로 구분되는데, 본 연구에서는 이들을 묶어 토석류로 분류하였다.

우리나라의 재해에 관한 법령 중에 하나인 「사방사업법」에서는 사면에서 발생하는 대규모 물질이동과 붕괴를 산사태와 토석류로 구분하고 있다. 먼저 자연적 또는 인위적인 원인으로 산지가 일시에 붕괴되는 것은 산사태로 정의하고, 산지나 계곡에서 토석·나무 등이 물과 함께 빠른 속도로 유출되는 것은 토석류로 분류하였다(사방사업법 제2조 제5항 및 제6항). 해당 법률에 의하여 구축된 산림청의 산사태 정보 시스템에서는 산사태를 A유형과 B유형으로 구분하였으며, 각각 사면 상에서의 침식과 물질의 이동, 그리고 곡지에서의 물질 이동으로 구분하였다(그림 4).

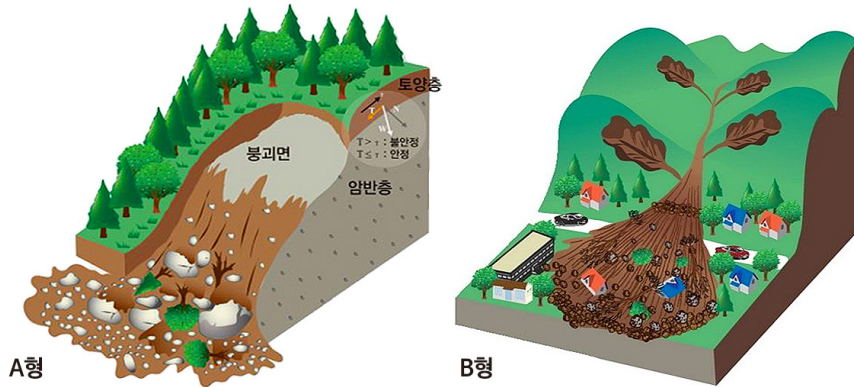


그림 4. 사방사업법에 따른 우리나라의 산사태 구분 유형

자료 : 산사태위험정보시스템.

1. 사면침식 및 토사유출

1) 사면침식 및 토사유출 과정

본 연구에서는 사방사업법의 구분 유형에 따라 토사 재해를 두 가지로 나누어 살펴보았다. 먼저 지표면을 전반적으로 침식하고 물질을 이동시키는 과정(A유형)과, 곡지를 따라 선상으로 물질을 이동시키는 과정(B유형)으로 구분하였다. 이 중 전자는 면을 침식하는 과정으로, 전반적으로 사면을 붕괴시키거나 물질을 침식하여 단거리 이동 및 퇴적시킨다. 이는 흔히 산사태, 토사 유출 등과 같은 이름으로 사용된다. 본 연구에서는 이를 '사면 침식 및 토사유출'로 정의하였다. 사면침식 및 토사 유출은 유역 분지 혹은 유역 소분지에서 발생하는 토양 침식과, 침식된 물질이 유역 외부로 유출되는 현상을 강조한다. 다시 말해 사면에서 형성되는 세곡과 우곡의 침식과정을 통해 사면물질이 제거되고, 이들이 유역분지 외곽의 경사 변환점 등을 중심으로 퇴적되는 현상이라 볼 수 있다(김민석, 2016). 우리나라의 경우 산사태의 이동 물질 대부분이 풍화 산물층 또는 토양층으로 되어 있으며, 토양층과 풍화 산물층의 깊이가 10cm 이내인 경우 산사태의 위험도가 낮은 것으로 추정된다(송영석 등, 2007). 또한 토양층의 경우 점토와 이토의 함량이 높고 상대적으로 경사가 급한 곳, 그리고 수분 침투율이 낮은 곳을 중심으로 지표 유출이 활발하게 일어나며, 이에 따라 토양의 침식 역시 활발히 이루어진다는 견해도 있다(김진관 등, 2007).

한편 유수에 의한 이동 외에도 지표 유출과 직접적으로 관련되지 않는 물질 이동 과정도 존재한다. 강우가

발생하지 않은 상태에서도 사면에서의 물질 이동 방식은 다양하게 나타나며, 개별입자들의 구르기(rolling), 미끌어짐(sliding), 튀어오름(bouncing) 등에 의해서도 물질이 사면 아래로 이동하게 된다. 이러한 과정을 건조 라벨(dry ravel)이라 하며, 급경사의 건조, 반건조 환경 및 암석 사면에서 활발히 일어나는 것으로 알려져 있는데, 건조 라벨에 의해 이동되는 물질들은 다양한 기원을 지닌다.

이 외에도 식생의 위쪽 사면에 집적되었던 암설들이 이동할 때는 다량의 퇴적물들이 하천 유로를 따라 일시적으로 이동하게 되며, 일부는 소규모의 사태를 통하여 이동하게 된다. 또한 산발 등과 같은 원인으로 토양의 점성이 감소하는 경우에는 사면 안정성이 저하되어 물질 이동이 활발하게 일어나게 된다. 그리고 계절적으로 토양수분의 변화하는 경우에도 건조 라벨을 통한 물질의 이동을 유발하게 된다(Gabet, 2003).

2) 충주시 피해 사례

전술한 내용을 바탕으로 충주 지역에서 발생한 토사 재해의 양상을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 그림 5의 A는 구릉지의 사면 일부가 침식되고, 주변 환경사지에 물질들이 집적되는 양상이 나타난다. 해당 사진에서는 농경지 부분까지 토사가 유출되면서 피해가 발생한 것으로 볼 수 있다. 침식은 주로 초본류 식생이 정착된 사면이 제거되는 것에서부터 시작된 것으로 추정되며, B에서는 대규모의 우곡(gully)이 성장한 것이 관측된다. 일반적으로 사면의 가장 상부 즉, 분수계 인근에는 지표 유출량이 적고, 유수에 의한 침식이 우적(raindrop) 침식



그림 5. 산지 사면의 침식 및 토사 유출 유형

자료 : 카카오 맵(KAKAO Map).

으로 제한되는 무침식대가 존재한다. 그러나 하부로 가면서 점차 지표 유출량이 증가하고, 포상 홍수류에 의한 침식이 발생함에 따라 간헐적인 세곡(trill)이 발달하게 된다. 이후 다수의 세곡이 형성되면서 사면이 침식되고 유량이 증가하게 되면, 세곡은 보다 규모가 큰 우곡으로 성장하게 된다. 이러한 과정의 결과 사면의 붕괴가 일어나고 다량의 퇴적 물질이 그림 5의 C와 같은 형태로 집적된다. 한편 곡지의 측면에서 본다면 이 부분은 토석류와 사면 토사 유출 사이의 중간적인 특성을 지닌다고 볼 수 있으며, 흔히 소규모 토석류로 판단되는 경우가 많다(그림 6). 그러나 이 경우 물질이 기존의 하천이나 하천 곡지를 따라서 이동하지 않고, 사면의 낮은 부분을 따라 새롭게 개석이 일어난 것으로 보인다. 따라서 일반적인 토석류와는 다른 것으로 판단하였다. 또한 D는 산사태의 전형적인 붕괴 현상에 해당하며, 붕괴된 물질들이 특정한 곡지를 따라 이동한 것이 아니라, 전반적으로 사면 아래로 이동한 것으로 보인다.

다음으로 그림 6은 충주시 소태면 하청마을 인근을 흐르는 오랑천-한강 합류부 주변의 사면 침식 사례에 해당한다. 사면의 상부에는 우곡의 형성에 의한 침식이 나타나고, 오랑천으로 유입하는 부분에서는 소규모의 선상지성 퇴적이 나타난다. 이 경우 유역 분지 퇴적물의 생산-이동-퇴적이 모식적으로 나타나는 것으로 볼 수 있다. 이에 해당 토사재해를 토석류로 구분하지 않고 사면의 침식 및 토사 유출 사례로 분류하였다.

다른 매커니즘으로는 하천의 곡지 등을 따라서 강력한 하방침식이 일어나고, 국지적 침식 기준면에 저하됨에 따라, 두부침식을 통해 사면의 상부 방향으로 곡지가 성장하는 양상도 있다. 이 경우에도 상부 사면에서부터 공급되는 유수의 양이 침식 강도에 큰 영향을 주게 된다. 주로 중소 규모의 하천이 통과하는 부분 인근의 계곡이나, 곡지 유출부에서부터 상류 방향으로 진행되는 침식이 이러한 과정이라고 볼 수 있다. 이러한 침식은 곡지보다는 사면을 중심으로 발생하게 된다.



그림 6. 오랑천 인근 사면의 침식과 토사 유출

자료 : 카카오 맵(KAKAO Map).



그림 7. 인공시설에서 발생한 토사유출 사례

자료 : 카카오 맵(KAKAO Map).

다음으로 인위적인 시설물이 들어선 곳에서 발생하는 산사태의 경우, 시설이 만들어지면서 지표 피복이 제거되고, 이로 인해 침식능이 증가하는 것으로 볼 수 있다. 인공 시설이 건설되면서 지표를 피복하고 있던 토양이 침식되면, 여러 교란이 일어나면서 침식에 대한 토양의 저항능은 감소하게 된다. 그림 7의 경우 이러한 상황에서 피해가 발생한 것으로, 높은 강우 강도에 의해 침식이 발생함에 따라, 물질이 이동·퇴적된 것으로 보인다. 특히 지표 피복이 완전히 제거되어 나대지가 노출된 경우, 인근의 사면이 붕괴되면서 큰 피해를 일으킨 것으로 보이며, 공사 등을 목적으로 표토를 제거한 경우에도 상당한 규모의 침식 및 퇴적 피해가 나타난 것이 확인되었다(그림 7).

한편 2020년 산사태에서 상당한 논란이 되었던 부분은 산지에 만들어진 태양광 발전 시설로 인한 침식 가능

성이다. 당시 언론과 정치권에서는 산지 태양광의 건설이 사면 아래 지역 주민들의 피해를 유발했다고 주장하였다(연합뉴스, 2020년 8월 11일자; 조선일보, 2020년 8월 17일자). 하지만 충청북도의 경우 산사태 가운데 산지 태양광 시설 관련 피해가 발생한 곳은 4개에 불과하였다. 그중에서도 3곳은 태양광시설 설치 사면에 강력한 침식이 발생하여 피해를 입었는데 반해, 1곳은 인근 계곡의 범람이나 곡지의 침식으로 인해 태양광 발전 시설이 피해를 입은 사례이다. 또한 충주시(그림 8)와 제천시(그림 9)에서 확인된 2개소의 경우 토석류가 인근의 곡지를 따라 통과하면서 태양광발전 시설이 피해를 본 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 볼 때 태양광 시설의 경우 입지 문제에 대한 검토는 필수적이지만, 해당 시설이 토사재해를 유발했다는 주장은 성립되기 어려운 것으로 보인다.



(a) 위성사진

(b) 현장사진

그림 8. 충주시 태양광 시설의 토사재해피해

자료 : 충청북도 산림녹지과.



(a) 위성사진

(b) 현장사진

그림 9. 제천시 태양광 시설의 토사재해피해

자료 : 충청북도 산림녹지과.

2. 토석류에 의한 피해

1) 토석류의 발생 과정

사면 침식의 다른 사례로는 토석류에 의한 피해를 들 수 있다. 토석류는 실제 우리나라 토사재해에서 가장 강조되는 부분이다. 토석류는 주로 소규모 유역 분지의 급경사 사면에서 발생하는 것으로 알려져 있으며, 유역면적은 약 20~30Km², 하도의 평균 최소 경사는 19% 이상일 때 잘 발생하게 된다. 일부에서는 산지 경사가 5~10%인 경우에도 발생하는 것으로 알려져 있다(Scheidl and Rickenmann, 2010). 2009년 캘리포니아 산불 발생 지역에서의 연구에 따르면, 30분 이내의 짧은 시간 동안의 강우강도가 토석류의 발생 시기와 발생 강도에 영향을 준다. 특히 5분 간의 단기 강우강도가 강한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 그러나 누적 강수량이나 사면의 토양 수분 함량은 큰 영향을 주지 않는 것으로 보고되었다(Kean *et al.*, 2011). 토석류를 유발하는 요인들은 다양하며, 2020년의 경우처럼 장기간에 걸친 강수는 사면의 토양을 수분으로 완전히 포화시켜, 사면에서의 다량의 물질 이동 현상을 급격하게 유발한다. 이러한 토사 유출

의 결과 계곡과 평지가 만나는 부분을 중심으로 급격한 돌발홍수가 나타나며, 이로 인하여 분급이 불량하고 급격한 퇴적이 일어나는 선상지성 퇴적층이 나타난다. 이들은 산지로부터 흘러내리는 하천의 유로가 토사의 퇴적으로 인하여 변동함에 따라서 다수의 로브를 지니는 양상을 보여준다(Borga *et al.*, 2014).

토석류는 사면에 집적된 퇴적물질이 수분에 의해서 완전히 포화되면서 급속히 이동해 가는 작용으로, 주로 곡지를 따라서 이동하는 양상을 보여 준다. 1차적으로는 산지에 집적된 물질이 유수의 작용으로 이동하는 과정이라 할 수 있으며, 이들은 주로 곡지의 바닥이나 산지 하천을 따라서 이동하는 것으로 볼 수 있다. 또한 이러한 토석류는 이동되는 과정에서 분급이 이루어지는데, 상당수의 조립 물질들은 이동 경로 상에 퇴적되는 경우가 많고, 세립 물질들은 곡지부나 경사가 감소하는 부분을 중심으로 퇴적된다.

한편 토석류를 예방하기 위해 사방댐 등을 건설하는 경우가 많으나, 사방댐이 존재하더라도 대규모의 토사 유출이 과도하게 발생하는 경우, 사방댐 자체가 매몰되거나 파괴되기도 한다(그림 10).



그림 10. 충주시 지역의 토석류에 의한 사방댐의 매몰

자료 : 카카오 맵(KAKAO Map).



그림 11. 충주시에서 발생한 토석류 사례

자료 : 카카오 맵(KAKAO Map).

일반적으로 토석류 발생 과정은 침투 유발 토양 미끌어짐(infiltration triggered soil slip)과 지표유출에 의한 지표유출 지배형 침식(runoff dominant erosion)으로 구분된다. 먼저 전자는 토양이나 기반암 암체가 사태를 통하여 이동을 시작한 후, 토석류 등을 따라서 사면 하부로 이동되는 것을 말한다. 이들은 사태로 붕괴된 사면(landslide-scar)을 퇴적물의 기원지로 하며 하천까지 퇴적물이 이동된다. 사태에서 토석류로의 변형되기 위해서는 토양의 쿨롱력(Coulomb) 붕괴, 토양 내 높은 공극압에 의한 부분적 혹은 전면적인 토양 유체화, 사태로 이동되는 물체의 내부 진동에너지(internal vibrational energy) 변화 등이 이루어져야 한다. 이러한 과정들은 기본적으로 토양 내의 공극수압 변화와 관련되며, 이에 따라 이를 침투 유발 토양 미끌어짐으로 표현한다(Iverson *et al.*, 1997).

반면 지표유출-지배형 토석류는 포상홍수류, 세곡류, 우적 침식의 과정을 통하여 만들어진 물질들이 0차 또는 1차 하천의 분지 내에 있는 다양한 와지를 중심으로 저장된 후, 사면 경사가 급하거나 유역 면적이 넓어 퇴적 물질과 유량이 충분한 경우, 사면의 특정 부분으로부터 토석류가 발생하게 된다. 토석류가 사면을 이동하는 과정에서 지니는 운동에너지의 변동에 따라서 조립 물질들은 주로 이동 과정의 하도에 퇴적되며, 세립 물질들은 곡구 등의 완경사지까지 유출되는 양상이 나타난다(Cannon *et al.*, 2001).

이러한 퇴적물질의 이동 거리는 여러 환경 요인에 따라 다양하게 나타나며 수평이동거리(L)/퇴적지점 간의 고도차(H)를 '순효율'이라는 지표로 표현한다. 이 값이 클 경우 고도차에 비해 이동 거리가 길어지게 된다. 우리나라의 238개 지점에 대한 분석 결과에서는 순효율 값

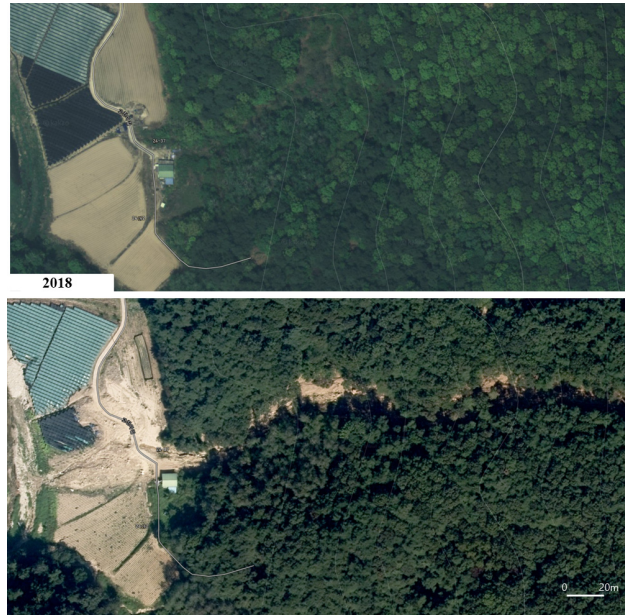


그림 12. 토석류에 의한 선상지성 지형의 형성 사례

자료 : 카카오 맵(KAKAO Map).

이 2~6으로 나타났으며, 대푯값은 4.3으로 나타났다. 이는 이탈리아(2~4 정도)에 비하여 차이가 크다고 할 수 있으며, 우리나라의 토석류 이동 거리가 상당히 다양한 것으로 해석할 수 있다(최두영·백중철, 2012).

2) 토석류 피해 사례

본 연구에서는 산사태 신고가 접수된 곳들 중에서, 소하천의 하상이나 곡지에 퇴적물들이 크게 집적된 경우에 토석류가 주로 발생한 것으로 판단하였다. 구성 물질에 따른 구분은 별도로 실시하지 않았다. 그 결과 연구 대상 지점 333개소 가운데 토석류가 발생한 것으로 판단된 곳은 41개소였으며, 나머지는 주로 사면의 침식과 토사 유출이 발생한 것으로 나타났다. 41개소 가운데 24개소에서는 토석류와 토사 유출이 함께 관찰되었으며, 토석류만 발생한 것으로 확인된 17개소 가운데 10개소는 곡지를 중심으로 대규모의 침식과 퇴적이 나타났다(그림 12).

그림 12에는 두 가지의 유형이 드러나는데, 한 유형은 곡지 내의 퇴적이 차지하는 비중이 크고 곡구로 유출되는 부분은 상대적으로 작은 것으로 나타나고 있으며, 다른 유형은 곡지에 유출되는 퇴적물이 상당한 규모로 쌓이면서 상대적으로 큰 규모의 선상지성의 지형이 나타

나는 것으로 볼 수 있다(그림 12). 선상지성 지형은 토석류가 산지를 통과하여 10° 이하의 완경사 평야 등으로 유입하는 경우 탁월하게 형성되는 것으로 볼 수 있다. 한편 이들은 유역분지 내에서 일부 사면의 붕괴 현상 등이 나타나기도 하지만, 전반적으로 보면 유역 분지 내의 사면 붕괴 등은 대규모로 나타나지 않는다. 특히 사면의 식생 제거와 같은 요소들은 크게 도드라지게 관찰되지 않는다. 또한 토석류에 의해 유역분지 밖으로 유출되는 퇴적 물질의 양은 기본적으로 퇴적물질을 공급하는 유역면적에 비례한다. 다만 각 지역의 국지적 환경에 따라 물질이 이동 과정에서 하도 내에 퇴적되는 비율은 상이하게 나타날 수 있으며, 때로는 그 값이 44% 이상에 달하기도 한다(Nyman *et al.*, 2011).

IV. 토지 이용의 변화와 산지 토사재해의 발생

앞서 지적한 바와 같이 충청북도 충주시에서는 333개소에서 산지 토사재해가 발생하였다. 재해 발생 지점들의 경우 화강암 지역이 우세하기는 하였으나, 암석 특성이 지배적인 요인이 되지는 못하였다. 토사재해가 발생

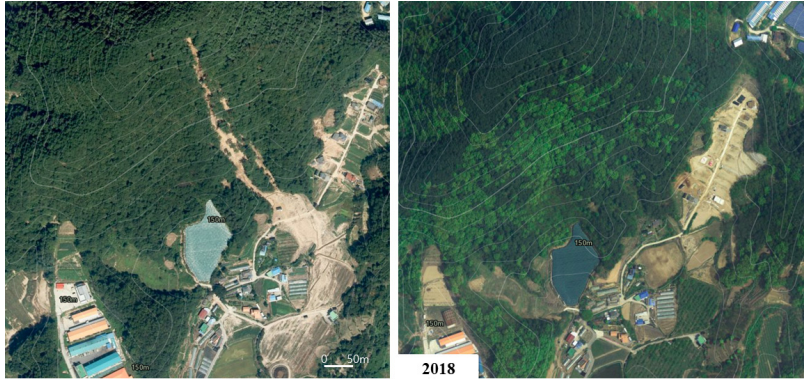


그림 13. 충주시 자연 산사태 사례

자료 : 카카오 맵(KAKAO Map).



그림 14. 식생 변화 지역에서의 토사재해 발생 사례

자료 : 카카오 맵(KAKAO Map).

한 지역에 대한 분석 결과, 상당수의 지점들에서 식생이 제거된 것으로 보인다. 공식 통계에 의하면(표 1), 충주시의 토사재해 신고 건수 196건 가운데 벌채 조림지는 11개소, 임도 설치지 19개소, 자연 산사태 164개소 등으로, 산림의 변화가 일어난 곳의 비율은 적다고 볼 수 있다. 자연 산사태는 수목의 변화가 없이 사면을 따라서 사면이 붕괴되고 그 물질이 사면 아래로 이동된 현상을 지칭하는 것으로 보인다(그림 13). 그림 13에서 제시되는 것과 같이 사면의 식생에 특이한 변화가 없는 구간에서도 경사가 급한 구분을 따라서 사면의 토사 유출이 나타난다.

그러나 본 연구에서 2008~2021년 동안의 각 지점 자료를 확인한 결과, 산지 토사재해가 발생한 것으로 확인된 333개소 가운데 식생이 완전히 변화된 곳이 157개소

(47.1%), 일부분의 식생이 제거된 곳이 59개소(17.7%)로 나타났으며, 공원 부지 4개소, 도로 3개소, 급경사면 5개소, 골프장 및 임도 각 1개소 등으로 나타났다. 임도가 개설된 부분 역시 단순히 임도만 개설된 것이 아니라 식생이 상당 부분 제거된 상태에서 임도가 드러난 것으로 보는 것이 합리적인 것으로 판단되었다. 그리고 이러한 식생이 변화하지 않은 곳은 96개소(28.8%)로 확인되었다. 이는 이전에 보고되지 않은 결과로, 2008년 이후 식생의 일부 또는 전부가 변화된 곳은 전체의 64.9%에 달한다. 이는 사면에서의 토사재해 발생과 식생의 변화가 상당히 관련이 깊은 것으로 볼 수 있다.

앞서 지적한 식생의 제거는 수종 갱신 등을 목적으로 수목이 제거된 곳이나, 산불 등을 통해 식생이 파괴된 곳을 의미한다. 이러한 식생 제거가 나타난 시기는 앞서

지적인 바와 같이 2008년 이후이다. 실제 새로운 식생이 정착된 지 10년 이상 경과한 지역이라고 하더라도 수령 및 나무 크기 등에서 주변 식생과 식별되는 경우가 대부분이었으며, 상당수는 식생이 제거되고 초본류가 정착되어있는 경우가 많았다. 한편 산사태 정보시스템상의 식생 표기는 소경목(흉고 직경 6~15cm)으로 나타나는 경우가 많아, 조림이 이뤄진지 오래되지 않은 것으로 판단된다. 또한 나무와 나무 사이 부분은 초본류가 정착한 것으로 확인된다. 초본 역시 우적에 의한 침식 등에는 상당한 수준의 저항을 보이는 것으로 알려져 있으나, 세곡 성장과 우곡 성장 등의 과정에는 큰 영향을 주지 못하는 것으로 보인다. 따라서 침식의 측면에서 이들은 나뎠지와 유사한 특성을 지니는 것으로 볼 수 있다.

또한 이와 관련된 침식 효율성에 대한 연구는 다양하게 진행되고 있다. 예컨대 강우 실험에 의하면 토양이 침식에 저항하는 힘인 전단응력(shear strength)은 토층 상부에서는 낮은 값이 나타나고, 깊이가 깊어지면서 일정한 수준으로 증가하여 안정화되는 경향성이 나타난다. 즉 토양의 침식은 상부의 표토 부분으로 제한되는 것으로 볼 수 있으며, 세곡과 소규모 우곡의 형성에 상당한 영향을 주는 것으로 볼 수 있다. 전단응력의 증가는 침식에 대한 저항력을 정하게 되며, 일정 깊이에 도달하면 하방침식 보다는 측방침식과 곡폭의 확장이 일어날 것으로 예상된다. 이에 따라 유수에 의한 토양 침식은 초기에는 강하게 일어나지만, 일정 시간이 경과하면서 퇴적물의 공급량이 감소하는 것으로 볼 수 있다(Nyman *et al.*, 2013).

지표 유출로 만들어지는 세곡의 형성과정과 그로 인한 퇴적물 생성에 대한 연구에 의하면 1분간 198~259mm/hr 강도의 강우가 15~20분간 지속되었을 때 광범위한 지표 유출을 유발된다. 이 지표 유출로 형성되는 세곡을 중심으로 사면의 수분이 집중되며, 이로 인해 하곡을 중심으로 강력한 침식이 발생한다. 이 때 세곡의 성장을 3차원적으로 보면, 세곡의 깊이 증가 및 곡폭 확장 그리고 세곡의 밀도 증가가 나타난다. 세곡의 깊이 증가는 침식 초기에 주로 빠르게 진행되고, 침식이 진행됨에 따라서 깊이가 깊어짐과 동시에 곡폭도 증가하게 된다. 특히 세일에서는 다른 암석(사암)에 비해 침식이 활발히 일어나는 것으로 연구되었는데, 이는 세일에서의 침투능이 사암보다 낮아서 지표 유출이 보다 유리하게 일어나기 때문으로 보았다(Alessio *et al.*, 2021).

또한 식생의 변화가 일어난 대표적인 사례로 산불에 의한 식생 파괴를 고려해볼 수 있다. 미국의 경우 식생 변화의 상당 부분이 산불로 인하여 발생하며, 이로 인해 발생하는 토사재해에 대한 논의가 다수 존재한다. 일반적으로 산지의 식생 변화는 사면에서의 퇴적물의 생산 자체에도 영향을 주게 되는데, 특히 산불에 의한 지표면의 가열과 연소는 토양 입자의 결합 기재인 식물 뿌리, 곱팡이, 유기물질에 영향을 줌으로써 토양의 침식능(erosibility)에 영향을 가한다.

이 외에도 벌목과 같은 식생의 제거 역시 이와 유사한 효과가 나타난다고 볼 수 있다. 벌목의 경우 식생의 줄기를 제거하고, 일부에서는 중장비를 동원하여 뿌리를 뽑아내기도 한다. 하지만 식물 뿌리의 잔뿌리 부분은 잔류하다가 부패하게 되며, 식생 뿌리의 밀도는 토양 침식능에 상당한 영향을 준다. 산불과 벌목으로 인하여 표토층의 안정성이 훼손되고, 직경 2mm 이하의 실뿌리들이 지표 부근에서 불타거나 소모되는 경우, 구조가 훼손되고 비점성질의 침식능이 큰 입자와 자갈들이 나타난다. 그리고 이러한 토양층의 성격은 퇴적물질의 공급과 토석류 발생에 영향을 주게 된다(Shakesby and Doerr, 2006)

한편 나무 자체는 퇴적물의 저장 기능도 수행한다. 급경사 사면에서 나무의 역할 중에 하나는 상부 사면으로부터 공급되는 물질을 집적시키는 댐의 역할이다. 다시 말해 식생은 사면에서의 물질 이동을 제한하는 국지적인 거칠기 요소로 작용한다. 이 때 나무에 의하여 저장되는 퇴적물질의 양은 나무의 두께에 비례하며, 이러한 저항요소의 뒤편에는 퇴적물질의 무더기가 만들어진다. 그러다 산불 등에 의해 퇴적물 댐이 소각되거나 벌목으로 나무가 제거되는 경우, 사면에서의 퇴적물 이동이 급증하는 현상이 나타난다. 집적되는 퇴적물의 부피는 퇴적물의 안전성에 따른 마찰 경사를 넘어서는 수준에서 최대화되며, 부피는 사면의 경사가 증가함에 따라 감소하게 된다. 그러나 마찰 경사의 2배 이상이 되는 경우에는 퇴적물 더미의 부피가 사면의 경사와 독립적으로 나타난다(Lamb *et al.*, 2013).

우적 등에 의한 사면 침식 연구에 의하면, 강우 강도가 토양 침식의 지배적인 영향을 미치는 것으로 나타나며, 일반적으로 안정화된 토양에 비하여 교란이 발생한 토양에서 침식이 활발히 일어나는 것으로 알려져 있다. 특히 사면의 교란 정도는 사면의 경사보다 중요하게 작용



그림 15. 임도 건설 부분의 토사재해

자료 : 카카오 맵(KAKAO Map).

한다(양동윤 등, 2005). 산지에서 식생이 제거되면 사면에 가해지는 강우 강도와 강우 에너지가 변화되며, 특히 강우 입경에 대한 토양 요소의 저항을 약화되거나 강화된다(김진관 등, 2016). 이를 종합적으로 고려하면, 다양한 방식으로 이뤄지는 식생 제거는 사면의 토사재해 발생에 상당히 중요한 역할을 하게 된다. 또한 식생 제거에 따른 영향은 단기간에 걸치는 것이 아니라, 중경목 이상으로 성장할 때까지 계속 영향을 미친다고 볼 수 있다. 따라서 식생이 제거되는 경우 사면에서의 침식을 저지하기 위한 장기간의 사후 관리가 필수적인 것으로 보인다. 특히 사면에서의 다양한 침식과정을 통제하기 위한 사방사업의 시행이 이뤄져야 할 것으로 보인다. 또한 이와 같은 사면의 식생 제거뿐만 아니라, 임도의 건설에서도 동일한 사면 토사재해 예방방안이 마련되어야 할 것으로 보인다(그림 15). 임도의 경우 도로의 기능을 위하여 절단면이 만들어지기 때문에, 이 부분이 관리되지 않는 경우 대규모의 토사 유출이 발생하게 된다.

한편 토석류의 발생은 지형 발달의 측면에서도 상당한 중요성을 지닌다. 토석류에 의한 침식과 퇴적이 지형 변화에 미치는 영향은 시간 규모에 따라서 다르게 평가될 수 있다. 비록 건조 지역이기는 하지만 오스트레일리아 남동쪽 산림 지대의 경우, 토석류에 의하여 운반되는 토사의 양이 400~800년간의 침식률과 유사한 것으로 조사되었다. 이를 유역분지 전체의 삭박률로 산출해보면 3.4mm의 양으로 계산되는데, 지난 3만 년간 이 지역의 삭박률이 15~25mm/ka임을 고려한다면, 이는 150년에서 220년에 해당하는 유역분지 전반의 삭박률이라고 할 수 있다. 즉, 유역분지 내에서 토석류에 의한 삭박은 자주 일어나지는 않으나 큰 변화를 수반하는 중요한 이벤트로 볼 수 있다. 특히 이러한 과정은 유역분지 유출부

의 중요한 삭박 기제로 고밀도류의 역할을 강조하는 것으로 보인다(Nyman *et al.*, 2020). 특히 20°이상의 경사를 지니는 곡지가 나타나는 곳에서는 퇴적물의 이동에서 토석류가 지배적이라고 볼 수 있다(Benda and Dunne, 1997; Montgomery, 1999; Gomi *et al.*, 2002). 또한 주빙하 지역 등의 경우 토석류에 의해 이동·퇴적되는 사면 물질들이 곡구에 집적되어 선상지성 지형을 형성하게 된다. 그리고 이는 빙기 이후의 지형 발달 과정을 추정하고, 향후 추가적인 토사 유출 재해를 예측하기 위한 중요한 지표로서 작동한다.

토석류는 비교적 피해 규모가 크며, 주거지가 형성되어 있는 곡지 부분이 피해 지역인 경우가 많다. 그리고 이는 인명과 재산 피해로 이어지게 된다. 특히 전형적인 산악 지역이 아닌, 도시 내의 여러 소규모 산지에서 토석류 피해가 발생하는 일이 생기면서 이에 대한 대책 마련이 필수적이다(김연중 등, 2020). 최근 산사태의 증가는 기후변화로 인한 강우강도의 증가 및 강우량 변동과도 관련이 있지만, 본 연구 결과에 의하면 토지 이용의 변화와 산불로 인한 식생 피복의 변화 역시 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히 토지 이용 변화에 의한 산사태의 발생에는 식생의 제거가 큰 영향을 미치는 것으로 추정되었다. 또한 식생이 변화한 후 10년 이상 지난 뒤에도 사면에서의 토사 유출이 발생할 가능성이 큰 것으로 드러나고 있다. 따라서 기존의 식생을 제거하고 묘목을 식재한 이후에도 사면에서의 토사 유출을 방지하기 위한 활동을 지속하는 것이 필요하다고 판단된다. 특히 산간 곡지가 마을로 유입하는 경우, 토석류 피해를 저감하기 위한 다양한 대안 시설 및 토지 이용 관리 방안이 마련되어야 할 것으로 보인다. 물론 토사 유출의 양과 빈도에 대한 장기적인 모니터링 역시 시행되어야

할 것으로 생각되며, 수집된 정보를 활용하여 정기적인 토사 방지 대책을 마련해야 할 것으로 판단된다.

V. 결론

2020년 7월 28일-8월 11일 간의 집중호우로 인하여 전국적으로 1194ha에 달하는 대규모 피해가 발생하였으며, 충청북도 지역에서도 376.23ha의 면적에 피해가 발생하였고, 그 중 충주시에서는 171.33ha의 면적이 피해를 입었다. 본 연구에서는 토사재해가 발생한 것으로 신고된 210개소에 대한 분석을 통하여 333개의 피해 발생 지점을 파악하였으며 이에 대한 분석을 실시하였다. 분석은 각 지점에 대한 산림청의 산사태정보시스템의 데이터와 위성사진을 활용하였다.

피해 지역의 기반암은 화강암이 가장 많았으며(75%), 편마암이 그 뒤를 이었다. 산지에서의 토사재해는 크게 사면 침식과 유출 그리고 토석류로 구분하였다. 본 연구에서는 사면에서의 유수에 의한 침식과 단거리 이동 이후의 퇴적을 사면 침식과 유출로 보았으며, 곡지를 따라 나타나는 상대적으로 거리가 긴 이동을 토석류로 판단하였다. 발생 빈도 측면으로 본다면 토석류(41개소) 보다는 사면의 토사 유출 양상이 보다 우세한 것으로 나타났다. 한편 산지 토사재해가 발생한 것으로 확인된 333개소 가운데 2008년 이후 식생이 완전히 변화된 것으로 확인된 곳이 157개소(47.1%), 일부분의 식생이 제거된 곳이 59개소(17.7%)로 나타나 지표 식생의 변화와 토사재해가 발생한 지역 간에 상당한 상관이 있는 것으로 나타나기도 하였다. 이는 현재의 토지 이용을 공식적인 통계상으로 정리된 것과 상이한 부분이다.

2000년대 이후 우리나라에서도 단시간에 걸친 집중호우의 발생으로 인한 산지 사면의 재해에 대한 논의가 상당수 진행되었으며, 이에 대한 대안으로 사방댐의 건설 등과 같은 대안이 상당히 논의되었다. 그러나 이보다 기본적인 정보의 수집과 정보가 선행되어야 할 것으로 보인다. 즉, 각 산사태 발생 지점에 대한 현장 조사와 정밀 조사가 진행되어야 할 것으로 보인다. 또한 이 자료를 이용한 정밀한 지도의 제작과 재현 주기의 파악과 같은 작업이 이뤄져야 할 것으로 보인다.

참고문헌

- 김경수, 2007, “산사태지역 자연사면의 지질별 토질 특성과 상관관계분석” 지질공학, 17(2), 205-215.
- 김민석, 2016, “GeoWEPP model을 이용한 화강암과 변성암 기반 두 소유역에서의 토사유출 특성 분석” 한국지리학회지, 5(1), 61-70.
- 김연중·김태우·김동겸·윤종성, 2020, “도심지 급경사지에서 토석류 범람 특성 및 사방댐 기능” 한국수자원학회 논문집, 53(8), 627-636.
- 김진관·김민석·백봉현·양동윤, 2007, “점토함량, 경사, 그리고 토양수분변화가 우곡간 침식에 미치는 영향: 단일 크기 복합 인공강우기를 이용하여” 한국지형학회지, 14(3), 115-121.
- 김진관·장재원·정관수·최훈·김민석, 2016, “인공 강우 시뮬레이터의 강우 특성 분석을 통한 최적 운영방법 제안” 한국지리학회지, 5(1), 51-60.
- 산림청, 2021, 2021년 전국 산사태예방 종합대책 대안 산림청 송영석·채병곤·조용찬·이춘오, 2007, “독도 동도지역의 토질특성 및 산사태가능성 조사” 지질공학, 17(4), 665-671.
- 양동윤·김진관·김주용·김민석, 2005, “토양침식에 미치는 토양표면상태의 영향” 한국지형학회지, 12(2), 63-72.
- 장재훈, 2002, 「한국의 화강암 침식지형」, 서울: 성신여자대학교출판부.
- 최두영·백중철, 2012, “한국 토석류의 이동거리 특성” 대한토목학회논문집 B, 32(3B), 193-201.
- 타카하시 타모츠, 2005, 「地質・砂防・土木技術者 研究者のための土砂流出現象と土砂害対策」, Nagoya: 近未來社 (한국시설관리공단 시설안전연구소 유지관리기술그룹 역, 2011, 「토사유출현상과 토사재해대책」, 서울: 씨아 이알).
- Alessio, P., Dunne, T., and Morell, K., 2021, Post-wildfire generation of debris-flow slurry by rill erosion on colluvial hillslopes, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(11), e2021JF006108.
- Benda, L. and Dunne T., 1997, Stochastic forcing of sediment supply to channel networks from landsliding and debris flow, *Water Resources Research*, 33(12), 2849-2863.
- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., and Jakob, M., 2014, Hydrogeomorphic response to extreme

- rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows, *Journal of Hydrology*, 518, 194-205.
- Cannon, S.H., Kirkham, R.M., and Parise, M., 2001, Wildfire-related debris-flow initiation processes, Storm King Mountain, Colorado, *Geomorphology*, 39(3-4), 171-188.
- Gabet, E.J., 2003, Sediment transport by dry ravel, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B1), 2049.
- Gomi, T., Sidle, R.C., and Richardson, J.S., 2002, Understanding Processes and Downstream Linkages of Headwater Systems: Headwaters differ from downstream reaches by their close coupling to hillslope processes, more temporal and spatial variation, and their need for different means of protection from land use, *Bioscience*, 52(10), 905-916.
- Iverson, R.M., Reid, M.E., and LaHusen, R.G., 1997, Debris-flow mobilization from landslides, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 25(1), 85-138.
- Kean, J.W., Staley, D.M., and Cannon, S.H., 2011, In situ measurements of post-fire debris flows in southern California: Comparisons of the timing and magnitude of 24 debris-flow events with rainfall and soil moisture conditions, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F4), F04019.
- Keller, E.A. and Blodgett, R.H., 2007, *Natural hazards: Earth's processes as hazards, disaster, and catastrophes*, Hoboken, NJ: Prentice Hall(이동우·김지수·김영석·윤성효·김진규·박덕근·김교원·길영우·윤순옥·우경식·하진욱·신동복·김원사·박성우 역, 2007, 「자연재해와 방재」, 서울: 시그마프레스).
- Lamb, M.P., Levina, M., DiBiase, R.A., and Fuller, B.M., 2013, Sediment storage by vegetation in steep bedrock landscapes: Theory, experiments, and implications for postfire sediment yield, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2), 1147-1160.
- Montgomery, D.R., 1999, Process domains and the river continuum, *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 397-410.
- Nyman, P., Box, W.A.C., Stout, J.C., Sheridan, G.J., Keesstra, S.D., Lane, P.N.J., and Langhans, C., 2020, Debris-flow-dominated sediment transport through a channel network after wildfire, *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(5), 1155-1167.
- Nyman, P., Sheridan, G.J., Moody, J.A., Smith, H.G., Noske, P.J., and Lane, P.N.J., 2013, Sediment availability on burned hillslopes, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(4), 2451-2467.
- Nyman, P., Sheridan, G.J., Smith, H.G., and Lane, P.N.J., 2011, Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia, *Geomorphology*, 125(3), 383-401.
- Scheidl, C. and Rickenmann, D., 2010, Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(2), 157-173.
- Shakesby, R.A. and Doerr, S.H., 2006, Wildfire as a hydrological and geomorphological agent, *Earth-Science Reviews*, 74(3-4), 269-307.
- 연합뉴스, 2020년 8월 11일자, “산사태로 도마 위에 오른 ‘산지 태양광’…비중 줄이고 관리 강화”
- 조선일보, 2020년 8월 17일자, “공익 위해 말한다… 산지 태양광 99% 부실공사, 이번 산사태 초래”
- 구글어스(Google Earth), <https://earth.google.com>
- 국가법령정보센터, <https://www.law.go.kr/법령/사방사업법>
- 카카오 맵(KAKAO Map), <https://map.kakao.com>
- 산사태위험정보시스템, <https://sansatai.forest.go.kr>
- 지오빅데이터 오픈플랫폼, <https://data.kigam.re.kr>
- 교신 : 김종연, 28644, 충청북도 청주시 서원구 충대로 1, 충북대학교 사범대학 지리교육과(이메일: terrai@cbnu.ac.kr)
- Correspondence : Jong Yeon Kim, 28644, 1, Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do, Korea, Department of Geography Education, Chungbuk National University (Email: terrai@cbnu.ac.kr)
- 투고접수일: 2022년 2월 28일
심사완료일: 2022년 3월 19일
게재확정일: 2022년 3월 25일