

현장 조사를 통한 토석류 특성 분석

Analyses of Debris Flow Characteristics through Site Investigation

유 남 재* 최 영 준** 이 철 주***
Yoo, Nam-Jae Choi, Young-June Lee, Cheol-Ju

Abstract

Most of debris flow occurred in Korea have been known to be caused by the heavy rainfall at the soil deposits on the mother rock, affected by conditions of rainfall, topography and geology, especially terrain deposits. A study on debris flow behavior should be carried out by investigating various types of debris flow systematically and analyzing their complicate characteristics in the engineering view points.

Tremendous debris flows occurred at Duksan-ri in Inje-gun of Gangwon province during summer in 2006. These sites are selected to study the characteristics of debris flow by investigating the influencing factors on it and analyzing their correlations between them. Most of data about influencing factors were obtained by visiting sites in field..

키워드 : 토석류 특성, 현장 조사, 덕산리

Keywords : *characteristics of debris flow, site investigation, Duksan-ri*

1. 서론

최근 기상이변과 이상기후로 인해 이상홍수 및 극한홍수가 빈번하게 발생하고 있으며, 이로 인해 최근 많은 피해를 입고 있는 실정이다.

우리나라의 연 강수량은 지역에 따라 중부지방은 1100~1400mm, 남부지방은 1000~1800mm, 경북지역은 1000~1200mm이며, 경남해안 일부지역은 1800mm정도, 제주도지방은 1450~1850mm이다. 계절적으로는 연 강수량의 50~60%가 7,8월에 집중되고 있다(2008,기상청). 이러한 집중강우가 산사태의 직접적인 원인이지만 동일강우 지역에서

지질요소의 특성에 따라 산사태 발생빈도와 양상이 달라진다. 대부분 장마철에 집중되는 기후조건에서는 강우에 의한 산사태 문제에 대해 적극적인 사면안정대책이 요구되는 실정이다[1].

산사태는 지질과 지형을 고려하여 강우시의 산지사면의 응력변화를 예측함으로써 그 발생 유형 및 특성을 파악할 수 있다. 하지만 산사태를 일으키는 여러 가지 요소들의 기여도가 다르기 때문에 산사태가 일어나는 지점을 예측한다는 것과 사태 물질로 인한 피해 예상지역을 알아내는 것은 결코 쉽지 않다. 그러나 최근에는 새로운 강우 패턴에 의해 경기, 강원 일부지역에서 내린 국지성 집중호우로 인하여 기존 인공사면에서 자주 산사태가 발생하고 있으므로 이를 방지하기 위한 제도적 장치의 필요성이 요구되고 있다[2].

국내에서 발생하는 산사태는 대부분은 토석류(debris flow)에 해당하며, 7월 8월에 집중되는 호우에 기인되는데 본 연구에서는 2006년 7월 집중

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

*** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사, 교신저자

강우와 태풍 '에위니아'의 동반 작용에 의해 발생한 강원도 인제군 인제읍 덕산리 지역의 5번 군도에 토석류 발생으로 피해를 입었던 4개의 토석류 발생현장을 연구대상지역으로 선정하고 토석류 발생 현장을 직접 방문, 현지 조사를 실시하고 대상 지역에서 수집된 지형, 토질, 계곡의 경사 등 토석류와의 상관관계를 분석하였다. 이러한 분석 자료들로 토석류의 시작과 이동 그리고 퇴적에 이르는 토석류 거동특성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 토석류의 정의와 분류

토석류(debris flow)에 대한 정의는 Stiny(1910)는 Die Muren란 저서에서 그가 현탁물과 하상물을 운반하고 산악지대 집중호우 발생하는 홍수를 토석류(debris flow)라고 정의 하였으며 유량의 증가로 퇴적물이 운반되는 과정에서 어느 한계이상에서 계곡속의 용암흐름과 같이 물, 흙, 모래, 자갈, 암석, 나무 등의 혼합물로 점성적인 성질의 물질로 변환된 흐름이라고 정의하였다. 또 다른 정의를 보면 토석류는 오랫동안 풍화작용을 받아 흙과 암석이 많이 생긴 산이 폭우나 장마로 인해 물로 포화되어 그 무게가 마찰력을 지탱하지 못하여 흘러내리는 현상이다. 장년기 지형 산에서 때때로 일어나는 산사태의 일종이고 한번 토석류가 발생한 곳에는 바닥의 암반이 나타나서 새로운 토양이 되어 식물이 무성해질 때까지 오랜 시간이 걸린다. 주로 지역적인지질학적 구성과 식생의 상태에 따라 좌우되며, 발생지역의 지형, 지질학적 특성, 경사도 등에 따라 다양한 물질로 구성되며 크기는 세립질부터 암괴 크기까지 다양한 크기를 보인다[4][5].

토석류의 분류는 포함되는 재료에 따라 토석류(debris flow), 토사류(sand flow), 이류(mud flow)로 구분된다. 흙의 분류기준인 통일분류법(USCS)에 따르면 약 5mm 이상의 입자가 50% 이상 포함되면 토석류로 분류할 수 있고 0.0075mm미만의 입자가 50%이상이면 이류로 분류할 수 있으며 이 중간상태를 토사류로 분류한다. 토석류는 유체와 흙의 혼합비율에 따라 흐름 특성이 달라지는데 용적농도비(volumetric concentration, $C_d = V_s/V$) 또는 질량비(mass ratio, $N_{mass} = \rho_s V_s / \rho_f V_f$)로 이 혼합비율을 정의할 수 있으며 여기서, V_s 는 토석류 속의 흙의 부피, V 는 토석류 전체의 부피, ρ_s 는 토석류 속의 흙의 밀도, ρ_f 는 토석류 흐름의 밀도이며 V_f 는 토석류 흐름의 부피이다. 토석류의 용적농도비는 0.4~0.8 범위를 가지는 것으로 알려져 있다. 용적농도 0.4 미만인 경우 흙입자가 흐름의 바닥에서 이동하는 소류(bedload transport)상태가 되고 용적농도 0.8 이상이 되면 거의 고체 상태로서 산

사태와 같이 흐름특성보다는 전단파괴상태가 지배적이게 된다.

토석류는 발생형태에 따라서 계곡을 따라 이동하는 계곡형 토석류(channelized debris flow)와 사면에서 발생하여 하부로 이동하는 사면형 토석류(open slope debris flow)로 구분하기도 한다. 계곡형 토석류는 계곡을 따라 먼 거리를 이용하면서 규모가 증가하며 이동경로와 하부에 매우 큰 피해를 야기한다. 사면형 토석류는 계곡부가 아닌 사면부에서 발생하여 사면하부로 이동하는 형태로서 비교적 이동거리가 짧다. 사면형 토석류는 계곡형 토석류의 초기파괴형태로 간주되기도 한다. 토석류 규모나 흐름속도에 따라 분류하기도 한다[5].

2.2 토석류의 발생 경로

2.2.1 토석류의 발생(Initiation)

토석류의 시작은 지형경사가 급한 산악 구간에 집중 강우가 발생할 때 첫번째로 사면활동으로 인한 자연사면 전면의 붕괴와 인공사면의 붕괴, 둘째로 계곡바닥과 측면의 세굴 및 침식, 셋째로 자연 토사층의 붕괴에 기인하여 시작되는 것으로 알려져 있다. 시작 형태에 따라 토석류의 규모와 흐름특성도 달라지지만 각각의 시작 메커니즘을 정확히 규명하는 것은 여전히 연구단계에 있으며 신뢰성 있는 예측과 해석을 실용적으로 적용하기는 아직 어려운 상태이다[6].

사면발생은 주로 20°~45° 경사를 가진 사면에서 발생하며 경사각이 작은 사면에서는 토석류 발생 에너지가 충분치 않으며 45°보다 큰 경사면에서는 토사층이 얇거나 활동이 발생할 수 있도록 연속성을 갖는 경우가 흔하지 않다. 단일의 사면 활동이 토석류를 발생시킬 수 있지만 대부분 여러 곳에서 발생한 사면활동들이 동시에 발생하여 계곡에 모여들면서 토석류를 유발하는 것이 일반적이다[5].

사면의 전단파괴에 기인한 토괴가 비교적 완전한 경사에서도 토석류로 발전하는 현상은 토질역학적 관점에서 설명되고 있다. 파괴토괴가 지속적으로 이동하는 것은 전단변형에 의한 흙의 체적변화와 이에 따른 과잉간극수압의 발생과 관련이 있다. 체적감소가 발생하는 흙내에서는 파괴 순간 비배수상태에서 과잉간극수압이 발생하며 이로 인한 전단강도의 감소는 토괴의 진행성 파괴를 가속화시키게 된다. 하부로 이동하기 시작하는 토괴는 파괴구간 하부의 표토층에 비배수 하중(undrained loading)을 가하게 되며 토괴의 이동경로에 있는 표층부도 같이 파괴되고 이동하는 토괴의 규모는 점차증가하게 된다. Sassa(1985)는 점토에서의 압밀모델과 유사한 압밀-전단 모델(consolidation-shear model)로서 이를 설명하고 있다[7][8].

2.2.2 토석류의 이동(transport)

사면활동이 발생하면 활동의 억제 없이 하부사면으로 급속히 진행된다. 입상재료의 토석류는 구조적으로 파괴되고 이동하면서 매질이 완전 제형 되어 유체 운동(flow like motion)과 같은 특성을 갖으며 다소 균일한 속도 분포를 갖으면서 진행한다. 이동경로의 하상물질 대한 급속한 제하(rapid loading)로 토석류의 체적이 증가하고 지반의 포화도가 상승하게 된다. 이와 같이 토석류 경로의 중간부를 운반영역으로 볼 수 있으며 유로 경로의 경사각이 적정의 값으로 감소할 때 퇴적이 발생하며 이것을 토석류 에어프로(debris apron)이라고 한다[5].

토석류의 이동은 계곡의 지형경사와 계곡형태, 지반특성, 혼합물의 특성, 기존 계곡을 흐르는 유량, 장애물의 여부 등에 따라 매우 복잡한 양상을 나타낸다. 토석류의 이동과 관련된 주된 연구는 침투 토석 유량과 토석류 유속, 토석류 수심을 예측하는데 중점을 두고 있다. 토석류 흐름 특성 규명을 위해서는 토석류 흐름내의 전단거동특성을 알아내는 것이 매우 중요하다. 수리학적 관점에서 토석류 흐름을 점성유체(Non-Newtonian fluid model) 또는 초기전단저항력을 가진 점성유체로 가정하는 Bingham fluid model 이 가장 많이 연구된 바 있다. 하지만 점성유체모델은 토석류의 흐름이 유체에서부터 고체 상태에 이르기까지 다양한 상태로 변화할 수 있는 특성을 설명하지 못하는 단점이 있다.

토석류 흐름특성을 설명하는 보다 일반화된 이론은 Iverson(1997)이 체계화시킨바 있다. 그는 연속체혼합물이론(continuum mixture theory, Atkin and Craine, 1976)을 수정하여 비압축성 간극유체와 고체의 질량보존법칙, 모멘텀 보존법칙으로부터 지배방정식을 유도하고 흐름이 정지해 있을 때와 관성력이 지배적인 운동상태에서 유체와 고체 혼합물의 흐름을 설명하였다. 그는 토석류 흐름내에 포함된 고체 입자간 충돌에 의한 모멘텀 전달이 간극유체에 과잉 간극수압을 발생시키며 발생한 간극수압에 의해 토석류 내의 마찰저항이 감소하면서 토석류가 매우 긴 거리를 빠른 속도로 이동하는 것이라고 설명하고 있으며 유속이 감소하면 입자간 충돌에 의해 간극유체에 발생하는 과잉간극수압이 감소하게 되고 마찰저항력이 증가되어 토석류의 퇴적이 발생하는 것으로 설명한 바 있다 [9][10].

이 이론은 토석류의 흐름과정 중에 추가 또는 퇴적되는 고체질량의 변화량, 토석류 흐름거동, 퇴적거동을 직관적으로 설명하기는 유용하지만 고체 입자와 유체사이의 모멘텀 전달과 이로 인해 토석류 내에 발생하는 과잉간극수압을 정량적으로 산정하기가 매우 어렵다는 점에서 실질적으로 이용

되지는 못하는 실정이다. 이론적인 토석류 흐름에 대한 연구는 토석류가 유체와 고체사이의 상태에서 변화한다는 점과 토석류가 반고체 상태에서도 긴 거리의 완만한 경사면을 빠른 속도로 이동하는 이유를 잘 설명하고 있다. 하지만 이론적인 연구는 아직도 지속적인 연구단계에 있으며 실용적인 적용은 더 많은 자료의 축적과 실무적용을 위한 특성 값의 조사와 시험방법에 대한 규정이 필요할 것으로 보인다.

2.2.3 토석류의 퇴적(deposition)

토석류의 퇴적은 지형경사가 완만한 구간이나 계곡 폭이 넓어져 수심이 감소하는 지점에서 발생하기 시작한다. 즉, 토석류를 이동시키는 관성력이 감소하거나 토석류 내에 포함된 입자를 이동시키는 유체의 소류력이 감소하면 입자의 이동이 멈추게 되어 퇴적이 발생한다. 계곡에 갇혀 흐르는 토석류 흐름의 횡방향 속도분포는 계곡의 좌우측이 작고 가운데가 가장 큰 형태를 나타내는데 이러한 속도분포는 흐름의 가운데에 있는 입자들을 흐름의 가장자리로 이동시키게 되고 이동된 큰 입자들은 작은 유속으로 인하여 계곡의 양쪽에 퇴적되기도 한다. 토석류에 포함된 입자 퇴적에 대한 이론적인 설명은 아직까지 명확하지 않다.

지형경사가 완만해지면 중력에 의한 관성력이 작아지므로 유속이 감소하게 되고 토석류 흐름 자체의 점성(Bingham model의 경우) 또는 토석류 내에 포함된 입자간 마찰저항(Iverson Model인 경우)이 저항이 증가하며 입자들의 흐름은 멈추고 세립분을 포함한 물만 흐르는 것으로 이해할 수 있다. 토석류의 퇴적은 침강에 의한 자중압밀과 유사한 현상으로 이해하기도 한다[11].

3. 덕산리 지역의 토석류 거동분석

3.1 개요

토석류는 지형, 지질 및 토질구성의 내적요인 뿐만 아니라 강우, 침식 및 지진 등의 외적요인의 작용을 받는다. 특히 여름철의 계절성 집중강우에 의한 토석류가 대부분 많이 발생하여 왔다.

본 연구는 그림 1에서 보는 것처럼 강원도 인제군 인제읍 덕산리 지역의 5번 군도에 토석류 발생으로 피해를 주었던 4개의 현장을 선정하였으며 연구는 2008년 7월~10월까지 실시하였다. 연구대상으로 선정된 이유는 토석류 거동에서 발생영역, 운반영역, 퇴적영역 중 퇴적영역을 제외하고는 발생영역과 운반영역이 초기 피해당시의 모습을 지금도 보존하고 있기 때문이다.



그림 1. 덕산리 토석류 발생지역

3.2 조사지역의 토석류 발생 특징

3.2.1 토석류 지역의 강우특성

강원도 지방은 남북으로 길게 태백산맥을 중심으로 동쪽과 서쪽이 기후적으로 전혀 다른 특성을 나타내고 있으며 높은 산악지방이 많이 분포되어 기후적으로 특이한 분포를 보이고 있다. 이는 산세가 험해 기압차가 큰 형상이 잦은 데다, 동해에서 발생한 수분 유입량도 많아 집중호우가 빈발한다(강원지방기상청, 2002).

본 연구지역 내의 토석류 발생은 2006년 7월로 그 원인은 기상학적으로는 240mm에 이르는 집중호우와 지상학적으로는 산사태와 토석류 발생이 용이한 얇은 토심, 급경사 암반 지형 및 산림관리 미흡으로 인한 수목근계(樹木根系)의 토양 결속력 부족이 지적되고 있다.

특히 대형 토석류 피해 발생원인은 그림 2에서 보는 것처럼 7월 15일 집중호우 이전 7월 10일 태풍 "에위니아"의 소멸과 7월 13일의 선행강우로 인해 토양수분(Soil Moisture)이 포화되어 있는 상태에서 7월 15일 08시를 기점으로 240mm에 이르는 집중호우가 발생하면서 산사태로 분류되는 자연사면 붕괴, 토석류 발생 계안유실(溪岸流失)로 인해 발생된 토석과 유목이 하도(河道)로 유입되어 빠르게 이동하던 중 통수 및 내수기능이 취약한 하천 시설물에 통수장애를 발생시켰다. 이로 인하여 하천시설물의 붕괴 및 유실과 함께 과거 계곡을 따라 시설된 도로시설물이 통수장애를 심화시키면서 피해가 가중되었다.



그림 2. 2006년 여름의 한반도 주변의 고기압 현황

그림 3~6은 당시의 피해상황을 직접적으로 보여주는 사진으로 토석류 피해가 인명과 재산적으로 얼마나 많은 피해를 주는지를 보여주고 있다



그림 3. 2006년 덕산리 일대 피해사진



그림 4. 2006년 덕산리 일대 피해사진



그림 5. 2006년 덕산리 일대 피해사진

3.2.2 강원도 지역의 지상학적 특이점

태백산맥을 중심으로 지형표고차가 크고, 경사가 급한 강원도의 산악지형으로 인해 자연사면의 잔적토심은 대부분 1m 이내로서 강우발생시 토양 수분 함양기능(함양기능)이 낮아 강우-유출 패턴이 빠른 지상학적 특성을 나타낸다(그림 7).

강우-유출에 영향을 끼치는 인자로서는 기상학적 인자(climatic factor)와 지상학적 인자(physiographic factor)가 있으며 이 중 지상학적 인자는 유역특성(basin characteristics)과 유로특성

(channel characteristics)으로 구분된다. 유역특성 구성인자가 되는 지리적 요소로는 유역크기, 형상, 경사, 방향, 고도 및 하천밀도가 있고, 물리적 인자로서는 토지이용과 피복, 지표침투조건, 토성(토성), 침투계수(침투계수)를 결정하는 지질상태, 호수 또는 늪지대의 지형조건, 인공배수 등이 있다.

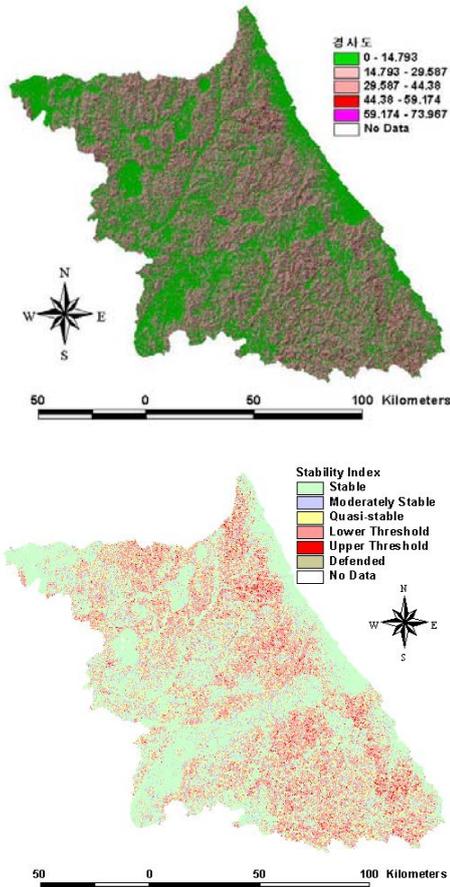


그림 5. 강원도 지형경사 및 안전도 지수(출처 : 2002 강원도 수해백서)

3.2.3 조사지역 토석류 발생 경로

토석류의 발생경로를 살펴보기 위하여 토석류의 피해가 가장심한 퇴적부분부터 거꾸로 토석류의 시작부 까지 따라 올라가면서 현장조사를 하였다. 현장조사는 GPS 장비를 가지고 사면활동 현장의 최상부 지점부터 좌표를 얻어 가면서 실시하였으며 사면 혹은 계곡의 방향, 경사 그리고 폭이 급격하게 바뀌는 곳에서 GPS좌표 및 이와 토석류 발생경로를 나타낼 수 있는 폭, 심도, 경사, 경사방향 등을 측정하였다.

본 연구대상지역에는 그림 6에서 보이듯이 총2

개의 분류와 각 분류에서의 2개의 지류로 나뉘었다. GPS좌표 N38.09668 E128.21645와 N38.09375 E128.21013 에서 시작하는 분류는 덕산리 01(좌), 덕산리 02(우)를 합쳐 덕산리 01이라 정하였으며 GPS좌표 N38.09673 E128.22137와 N38.09407 E128.22156에서 분류는 덕산리 02(좌), 덕산리 02(우)를 합쳐 덕산리 02라고 정하였다.



그림 6. 본 연구대상지역(인제군 인제읍 덕산리)

(1) 덕산리 01 계곡의 토석류 현장조사 결과

현장조사 결과 덕산리 01(좌)의 총연장은 1.8km 이고 상부 사면부터 사면 01 이라 정하여 총 사면 14까지 14개의 사면활동이 나타났으며 알 수 있었으며 이 중 사면 06부터 사면 14까지는 현재 야계 사방 형태로 복구가 되어 있었지만 사면 01~사면 05까지는 아직 사면활동 당시의 모습이 그대로 남아 있었다.

그림 7은 덕산리 01(좌)에서의 사면 01~05까지의 사면활동 형태를 보여주는 나타내는 것이다. 사면들의 형상은 모두 부채꼴 형상으로 이루어져 있었으며 아무런 복구의 흔적이 없었으며 사면의 형태로 미루어 볼 때 사면 가장자리로부터 연속적인 침식이 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

그림 7에 사면들의 연장과 경사는 표 1과 같이 나타나고 있다.

표 1 덕산리 01(우) 계곡 사면의 특성

	사면 01	사면 02	사면 03	사면 04	사면 05
연장	45.5m	66.4m	92.7m	121.8m	143.2m
경사	32.5°~40°	32°~39°	27°~41°	19°~36°	24°~41°

표 1에서 사면의 연장을 살펴보면 사면 01과 사면 02의 연장은 각각 연장은 45.5m, 66.4m 이며 사면 03~05의 연장은 92.7m~143.2m로 나타나고 있다. 특별한 유사점 없이 점점 커지는 것을 볼 수 있다. 상부의 사면과는 달리 계곡의 하부쪽에 있는

사면일수록 사면의 연장이 점점 길어지고 있음을 볼 수 있다. 이것은 하부의 사면들은 사면활동이 나타난 사면과 사면활동으로 토석이 쓸려가는 계곡부와의 경계를 구분하기 힘들어 사면활동과 본류 계곡부에 접하는 곳까지를 모두 사면의 연장에 포함하였기 때문이다. 사면의 경사는 사면발생은 주로 20°~45° 경사를 가진 사면에서 발생한다는 문헌과 비슷한 약 30°에서 40° 사이의 경사를 형성하고 있었다.



그림 7. 덕산리 01(좌) 계곡의 사면 01~05

그림 7은 덕산리 01(좌)에서 사면 07과 사면 11의 형태를 보여주고 있으며 덕산리 01(좌)의 계곡상부의 사면 01~05의 사면과는 달리 야계사방으로 시공 되어 있음을 볼 수 있다. 이미 복구가 되어 있지만 사면의 형태와 규모로 보아서 토석류 규모의 증가에 상당한 기여를 했음을 추정할 수 있다.



그림 8. 덕산리 01(좌) 사면07, 사면11

사면활동으로 쓸려 내려온 토석은 그림 9에서

보여주는 본류 계곡부로 유입이 되고 이렇게 유입된 토석과 집중호우로 불어난 물에 의해서 토석류가 형성되어서 계곡의 하부로 흘러가게 된다.



계곡 (a) 계곡 (b)
계곡 (c) 계곡 (d)
그림 9 덕산리 01(좌) 계곡부

계곡은 크게 침식부분과 퇴적 부분으로 구분할 수 있으며 그림 8에서 계곡 (a)의 경우 사면 01 바로 밑으로 이어지는 계곡으로 계곡의 경사는 38°이며 계곡 (b)는 사면 03을 지난 이후의 계곡으로 경사는 35° 이다. 계곡 (a), (b)를 보면 계곡의 침식의 흔적이 나타나 있음을 알 수 있고 계곡 (c)와 (d)의 경우 사면 04를 지난 이후의 계곡부로서 계곡의 경사는 19°로 경사가 완만해 졌음을 알 수 있다. 또한 계곡의 바닥을 보았을 때 침식보다는 퇴적의 흔적이 많음을 알 수 있다. 하지만 계곡 (c)의 경사는 18°로써 상부로부터 밀려온 토석류가 전체적으로 퇴적된 것은 아니며 주로 입경이 큰 것들이 바닥에 쌓이기 시작했음을 알 수 있다.

덕산리 01(우)의 총연장은 0.83km이고 덕산리 01(좌)과 같이 상부 사면부터 사면 01 이라 정하여 총 사면 06까지 6개의 사면활동이 발생하였음을 알 수 있었으며 그림 10은 덕산리 01(우)의 사면을 보여주는 것으로 덕산리 01(좌)와는 달리 전부 야계사방 형태로 복구가 되어 있었다.



그림 10. 덕산리 01(우) 사면

그림 10에서 보이는 것처럼 덕산리 01(우)의 계곡들도 덕산리 01(좌)의 계곡과는 다르게 계비온

등으로 많은 복구가 되어 있었다.



그림 11. 덕산리 01(우) 계곡

그림 12에서 계곡의 쌓여있는 토사의 입경을 보면 덕산리 01(좌)와 덕산리 01(우)는 입경의 크기도 많이 차이를 알 수 있었다.



(a) 덕산리 01(좌) (b) 덕산리 01(우)

그림 12. 계곡부의 토사 입경

(2) 덕산리 01 계곡의 토석류 현장조사 결과

덕산리 02의 경우 역시 덕산리 02(좌)와 덕산리 02(우)로 나뉘어져 있으며 덕산리 02(좌)의 총연장은 0.65km이고 덕산리 02(우)의 연장은 0.32km로 나타났으며 사면활동은 덕산리 02(좌)에서 3개 덕산리 02(우)에서 2개로 나타났다. 덕산리 02의 사면은 모두 복구가 되어 있지 않아 사면활동 당시의 모습이 그대로 남아 있었다.

그림 13는 덕산리 02에서의 사면활동 형태를 보여주는 나타내는 것이다. 덕산리 01 계곡의 사면과 동일하게 사면들의 형상은 모두 부채꼴 형상으로 이루어져 있었으며 아무런 복구의 흔적이 없었으며 사면의 형태로 미루어 볼 때 사면 가장자리로부터 연속적인 침식이 이루어지고 있음을 알 수 있었다.

그림 13에 사면들의 연장과 경사는 표 2와 같이 나타나고 있다

표 2. 덕산리 02 계곡 사면의 특성

사면번호	덕산리 02(좌)			덕산리 02(우)	
	사면 01	사면 02	사면 03	사면 01	사면 02
연장	42.5m	34.4m	37.5m	23.5m	27.5m
경사	37.5°~40°	32°~39°	37°~41°	27°~36°	32°~41°

표 2에서 사면의 연장을 살펴보면 덕산리 02

(좌)의 사면 01~03의 연장은 각각 연장은 42.5m, 34.4m, 37.5m 이며 덕산리 02(우) 사면 01과 02의 연장은 23.5m, 27.5m로 나타나고 있다. 덕산리 01 지역과는 달리 사면은 모두 계곡의 상부에 위치하고 있었다. 사면의 경사는 주로 27°~41°경사가 나왔는데 이것역시 약 20°~45° 사이의 경사의 사면에서 사면활동 발생한다는 문헌과 일치 하였다.



그림 13. 덕산리 02(좌&우) 사면

덕산리 02에서는 사면활동으로 쓸려 내려온 토석은 그림 14에서 보여주는 분류 계곡부로 유입이 되고 이렇게 유입된 토석과 집중호우로 불어난 물에 의해서 토석류가 형성되어서 계곡의 하부로 흘러가게 된다.



(a) 덕산리 02(좌) 계곡 (b) 덕산리 02(우) 계곡

그림 14. 덕산리 02 계곡

덕산리 02에서도 계곡도 덕산리 01의 계곡과 마찬가지로 상부의 계곡에는 주로 침식의 흔적이 하

부의 계곡에서는 퇴적의 흔적이 나타나고 있었다.

그림 15에서 계곡의 쌓여있는 토사의 입경을 보면 덕산리 02(좌)와 덕산리 02(우)의 입경의 크기는 덕산리 01과는 다르게 차이가 많이 나지 않음을 알 수 있었다.



(a) 덕산리 02(좌) (b) 덕산리 02(우)

그림 15 계곡부의 토사 입경

4. 결론

본 연구는 2008. 07 ~2008. 10 사이에 이루어졌으며 연구 대상은 토석류가 발생한 강원 인제지역 덕산리 토석류 현장을 선정하여 현장 조사 결과를 바탕으로 토석류 발생에 영향을 미치는 각종 환경인자와의 상호 관련성을 검토하여 토석류 거동 특성 분석을 실시하였다.

1) 현장 조사결과 짧은 시간에 높은 강우강도를 보인 집중호우로 인해 붕괴가 발생한 것으로 토석류 발생당일 이전 태풍과 선행강우로 인해 토양수분이 포화되어 있는 상태에서 최대시간 강우강도가 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 이는 강우량의 연속성에서 집중강우의 발생이 토석류 피해를 일으키는 것과 대체적으로 비례하다는 의미로 이해할 수 있다.

2) 조사 지역의 토석류 유형은 사면활동에 의한 사면붕괴와 집중호우로 인한 지표수가 지형적이 조건에 의해 계곡부에 집중되어 토석류가 점점 발전한 전형적인 계곡형 토석류(channelized debris flow) 형태로 분석된다.

3) 조사 지역의 지형은 야산이고 지질은 화강암이 기반암으로 폭넓게 분포되어 있으며 대부분 붕괴도 층으로 형성되어 있다. 토질은 대부분 실트 성분을 함유한 세립 내지 조립질의 모래나 점토질 세립분이 포함된 흙이 분포된 지역으로 태풍에 의한 집중호우로 토사층이 포화되면서 강도가 급격히 저하되어 강우 즉시 활동이 발생한 경우로 판단된다.

본 연구를 통하여 토석류와 관련 요인간의 관계를 파악할 수 있었으며 연구의 결과가 보다 구체적으로 활용되기 위해서는 보다 많은 대상으로 산사태가 발생한 지역에 대한 사례분석이 이루어져야 한다.

토석류의 조사는 다양한 방법을 이용하여 토석류 발생원인 규명과 발생특성 해석을 위해서는 현장에서 정밀하고 철저한 조사가 반드시 수행되어야 하며, 이를 토대로 암석이나 물리적·공학적 특성을 고려한 토석류 해석이 뒤따라야 할 것이다. 따라서, 현장 조사과정을 기반으로 한 토석류 해석의 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않으며, 이러한 과정을 생략한 결과의 신뢰도는 재고되어야 할 것이다.

향후에는 토석류 발생지역의 강우데이터 수집을 통해 지역적 특성, 지질학적 특성, 강우특성 별로 그 특징을 분류하고 강우량 파악을 정확히 예측하기 위한 각 항목에 대한 조사 및 실험을 신중을 기해야 할 것이며 나아가 토석류를 유발할 수 있는 여러 인자들과의 상관관계 연구도 지속적으로 진행해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호#08지역기술혁신 B01-01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] 감사원, 자연재해 대비실태 감사결과, pp. 1~21, 2003.
- [2] 강원지방기상청, 강원도 지역별 기후요람, pp1~12, 2002.
- [3] 농림부, 산지개발에 따른 산사태 발생특성 및 산지 토사재해예지시스템개발, pp.1~10, 2003.
- [4] Stiny. j, Die Muren. Verlag der Wagner'schen Universitäts-buchhandlung, Innsbruck. Debris Flows (English translation by M. Jakob and N. Skermer, 1997, 106.), EBA Engineering Consultants, Vancouver, Canada., 1910.
- [5] M. Jakob and O. Hungr, Debris-flow Hazards and Related Phenomena, pp.9~21, 2005.
- [6] Takahashi, T., Debris Flow : Mechanics, Prediction and Countermeasures, 448p, Taylor&Francis, London, UK., 2007.
- [7] Anderson, S.A., Sitar, N., Analysis of Rainfall-induced Debris flows, J. of Geotech. Eng. Vol. 121, No. 7, pp. 544~552, 1995.
- [8] Sassa, K., The Mechanism of Debris Flow, Proceedings of the 11th Intl. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 1173~1176, A.A.Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1985.

- [9] Iverson, R.M., *The Physics of Debris Flows*, Review of Geophysics, V. 35, No. 3, pp. 245~296, 1997.
- [10] Atkin, R.J., Craine, R.E., *Continuum Theories of Mixtures: Basic Theory and Historical Development*, Quarterly J. of Mechanics and Applied Mathematics, Vol. 29, No. 2, pp. 209~24, 1976.
- [11] Davis, J.J., *Gravity-Driven Consolidation of Granular Slurries - Implications for Debris-flow Deposition and Deposit Characteristics*, J. of Sedimentary Research, Vol. 70, No. 1 pp. 64~83, 2000.