

# 집중호우에 의한 토석류 및 비탈면 붕괴 사례 분석

박병수, 서홍석\*

본 연구는 2013년 집중호우에 의해 강원도 횡성에서 발생한 토석류와 비탈면 붕괴 현장에 대한 강우특성과 산사태 원인분석에 대한 연구이다. 인공비탈면 1개소와 산지 2개소에 대한 산사태 현장조사 결과 산지계곡의 도처에 쌓여있는 간벌목이 집중호우시 우수의 원활한 배수를 방해하고 우수가 집수되도록 하여 사면파괴에 상당히 영향을 끼친 것으로 분석되었으며 일부현장에서는 배수시설의 부재와 다짐불량 등으로 우수가 사면내로 용이하게 침투하므로써 사면파괴가 발생되었다. 한편, 강우분석결과 최대시우량 및 일강우량, 누적강우량 등은 산림청 산사태 주의보를 초과하였으며 장기간에 걸친 호우로 지반이 포화되어 있는 상태에서 집중호우로 인하여 급경사지 붕괴가 발생한 것으로 나타났다.

**주제어:** 산사태, 토석류, 강우특성, 집중호우

## 1. 서론

우리나라는 태풍이나 장마철 집중호우로 인한 산사태 발생이 매년 증가하고 있으며 올해에도 장마철 장기간의 호우로 인하여 강원도에 많은 산사태 발생과 함께 인적·물적 피해가 발생하였다. 산사태 발생요인은 여러 가지가 있으나 집중호우로 인해 얇은 산사태가 발생하고 충분한 선행강우로 인한 토양에 집중호우로 강우가 침투하므로써 일시적으로 부유대수층이 형성되고 토양의 유효강도가 감소하고 얇은 산사태가 발생한다고 하였다(Campbell, 1975). 최근 이러한 산사태중 절개지 붕괴에 의한 것 뿐만 아니라 상부 자연사면에서 발생한 산사태가 계곡을 따라 흘러내려와 도로에 피해를 주는 토석류의 피해가 심각하게 대두되고 있다. 토석류는 집중호우와 산사태가 결합해서 나타나는 복합적인 재해로써 주로 물의 흐름에 의해 발생하며 계곡부를 따라 흐르는 유속의 증가에 따라 주변 계곡 토사의 침식과 대규모 암반의 이동현상이 동반함에 따라 큰 재해가 발생하는 특징을 가지고 있다.

2006년 영동고속도로 비탈면 수해조사 결과에 따르면 집중호우로 절개지 붕괴는 62곳, 토석류 발생은 22곳이 발생하였으나 붕괴량에 있어서 절개지는  $4,365m^3$ , 토석류는  $84,990m^3$ 으로 나타나 토석류

\* 교신저자.

가 절개지와 비교하여 붕괴횟수는 작았지만 붕괴량에 있어서는 무려 20배나 더 많이 발생하여 피해의 실제적인 원인인 것으로 분석되었다(유병옥 외, 2006).

우리나라에서 발생하는 산사태는 강우강도, 지형조건 및 토질 특성 등의 3가지 요소에 의해 주로 크게 영향을 받는 것으로 보고되었다(김경수 외, 2000). 이와 같이 산사태에 대한 연구는 주로 산사태를 예측하기 위한 연구(김상규, 1997; 채병곤 외, 2004)와 현장조사를 통하여 산사태의 원인을 규명하려는 연구(윤영호, 2010; 백용, 2006; 박종호, 2006)가 주를 이루고 있다.

본 연구에서는 우리나라에서 발생하는 산사태 재해의 원인과 대책을 위한 유용한 자료를 제공하기 위하여 토석류 발생현장을 중심으로 산사태 발생 현장조사를 통해 그의 발생특성을 알아보고자 하였다. 따라서 2013년 7월 집중호우에 의해 강원도 횡성에서 발생한 산사태에 대한 현장조사를 실시하여 강우특성과 산사태 특징에 대해 분석하였다. 조사지역은 강원도 횡성의 청일면 고시리, 갑천면 상대리, 청일면 갑천리 3개소이며, 횡성은 조립질 흑운모화강암이 분포하여 화학적 풍화작용에 약해 풍화침식이 보다 활발히 일어나는 지질적 특성을 가지고 있다(최준식 외, 2010).

## II. 강우특성 분석

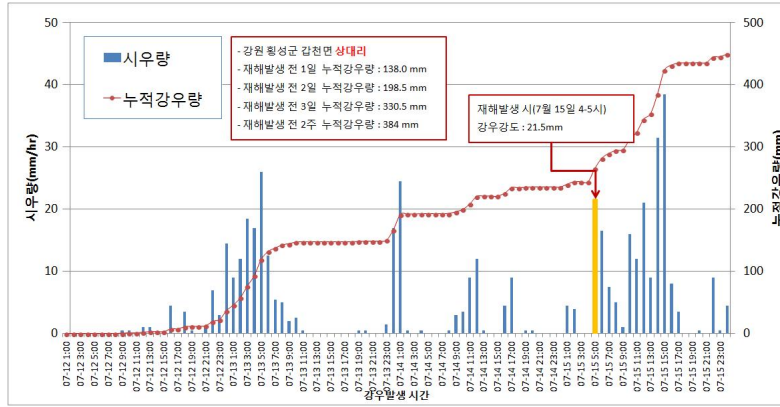
산사태 발생원인을 알아보기 위하여 횡성군에서 자체적으로 운영하는 관측소 자료에 근거하여 산사태 발생 전후 최대시우량, 일일강우량, 누적강우량을 다음 표와 그림에 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이, 재해발생 전 2주간의 누적강우량은 383~445mm, 재해발생 선행 일우량(7월 14~15일)은 76~138mm/day, 급경사지 붕괴 직전의 최대시우량은 21.5~25mm/hr이었다.

<표 1> 강원도 횡성군의 강우발생 현황(AWS 분석)

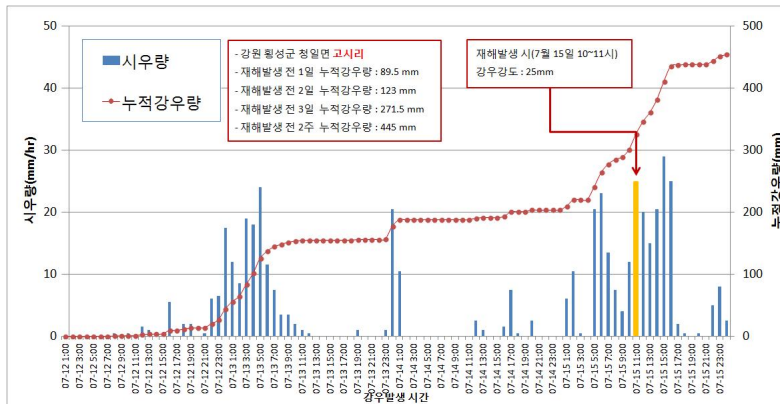
| 구분<br>(관측소명) | 최대시우량(mm) |              | 일 강우량(mm) |         | 2주간 누적강우량(mm) |           |
|--------------|-----------|--------------|-----------|---------|---------------|-----------|
|              | 강우량       | 발생일시         | 강우량       | 발생일     | 강우량           | 발생일       |
| 고시리(청일)      | 25        | 7.15일 10~11시 | 89.5      | 7.14~15 | 445           | 7.01~7.15 |
| 상대리(갑천)      | 21.5      | 7.15일 4~5시   | 138       | 7.14~15 | 384           |           |
| 갑천리(청일)      | 23        | 7.15일 5~6시   | 76        | 7.14~15 | 383           |           |

최대시우량은 산림청 산사태 주의보기준(20mm/hr)의 약 1.5배, 일강우량은 산사태 주의보기준(80mm/day)의 약 1.7배, 누적강우량은 산사태경보기준(200mm)의 약 2.2배로서 산사태가 발생할 수 있는 많은 양의 강우가 있는 이후에 집중호우가 있었음을 알 수 있다. 또한, <그림1>~<그림3>에서 볼 수 있듯이 급경사지 붕괴 발생 직전에 최대시우량이 발생하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 2013년 7월의 강원도 횡성지역의 붕괴(7월 15일 6:15~11:00)는 최대시우량 발생시간(04:00~11:00) 직후에 발생한 점으로 보아 장기간에 걸친 호우로 지반이 포화되어 있는 상태에서 집중호우로 인하여 급경사지

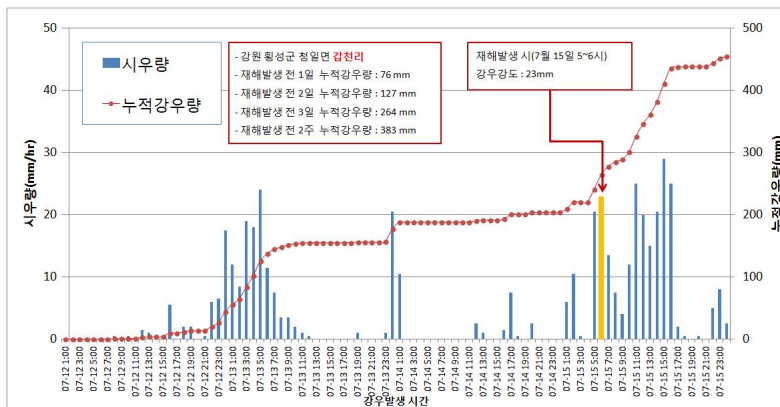
붕괴가 발생된 것으로 판단된다.



〈그림 1〉 청일면 고시리 AWS 분석



〈그림 2〉 감천면 상대리 AWS 분석



〈그림 3〉 청일면 감천리 AWS 분석

### III. 붕괴지역 현장조사

#### 1. 붕괴지역의 개요

급경사지 붕괴원인을 알아보기 위하여 2013. 7. 25~26까지 2일간 현장조사를 실시하였다. 산사태 현장은 다음 <표 2>에 나타난 바와 같이 2013년 7월 15일 산사태가 발생한 지역으로 인공비탈면 1개소, 산지 2개소로써 토석류와 산지붕괴로 주택이 매몰되는 등 피해를 입힌 지역이다.

<표 2> 급경사지 붕괴지역의 주요현황

| 위치      | 구분    | 피해상황                         | 급경사지 규모 |     |     | 급경사지 대상 | 붕괴 이력   | 재해위험 지역 |
|---------|-------|------------------------------|---------|-----|-----|---------|---------|---------|
|         |       |                              | 연장      | 높이  | 경사도 |         |         |         |
| 청일면 고시리 | 산지    | 산지붕괴(토석류), 도로매몰, 주택 및 농경지 매몰 | 7.4m    | 16m | 31° | 미대상     | -       | 누락      |
| 갑천면 상대리 | 인공비탈면 | 인공비탈면 붕괴(토석류), 주택 및 농경지 매몰   | 43m     | 33m | 48° | 미대상     | -       | 누락      |
| 청일면 갑천리 | 산지    | 택지 뒷편 산지 붕괴, 주택 일부 매몰        | 8m      | 15m | 30° | 미대상     | 과거일 부파괴 | 누락      |

#### 2. 청일면 고시리 산사태

본 현장은 2013년 7월 15일 집중호우(일강우량 89.5mm/day, 최대시우량 25mm/hr)가 발생하여 자연비탈면 상부 2개소가 붕괴된 후 토석류로 전환되어 약 1.2km의 계곡을 따라 이동하면서 하류부의 주택, 농경지 그리고 도로에 피해를 입힌 현장이다

##### 1) 자연비탈면 붕괴부

비탈면 붕괴는 <그림 4>에 나타난 바와 같이 산 정상으로부터 9부능선의 좌우 2개소에서 사면파괴가 발생되었다. 좌측사면은 간벌목을 실시한 지역으로서 27°의 경사면이며 폭 4m, 길이 21m, 깊이 1.2m의 소규모로 사면파괴가 발생되어 토괴가 계곡을 따라 하부로 이동되었다. 우측 사면에서는 폭 7.4m, 길이 16m, 깊이 1.9m의 토괴가 31°의 가파른 경사면을 따라 파괴되어 계곡을 따라 이동되었으며 사면파괴 부위에서는 기반암인 화강암이 일부 노출되었으며 기반암은 풍화가 약간 진행된 상태였다. 현장 사면의 토사는 점질분이 많이 함유된 토사로 오랜 기간의 집중호우로 많은 물을 머금게 되어 전단강도가 쉽게 감소될 수 있는 특징을 보였다.

사면파괴가 발생한 지역은 과거 간벌목이 수행된 곳으로서 간벌목은 산지 각 계곡의 도처에 쌓여 있어서 집중호우시 우수가 원활히 배수되지 못하고 우수가 침수되도록 하여 사면파괴에 상당히 영향

을 끼친 것으로 보였다. 실제 사면파괴 발생지역의 바로 아래 계곡에서는 파괴된 사면 부근에서 이동된 간벌목들이 상당수 퇴적된 것을 볼 수 있었다.



<그림 4> 좌, 우측 파괴사면과 주변의 간벌목 전경

## 2) 토석류 유출구간(계곡부)

<그림 5>~<그림 8>에 계곡하류부 및 토석류 유출에 따른 피해현장을 나타내었다. 사면파괴 발생 지점으로부터 흘러내린 토사는 계곡 주위 토사를 침식하면서 계곡부를 1.2km 유하한 후 퇴적되었다.



<그림 5> 계곡 유하부 전경



<그림 6> 계곡 하류부 전경



<그림 7> 파손된 농경지



<그림 8> 파괴된 도로 전경 및 작은 배수구로 인해 월류된 토사

계곡은 상부 25°로부터 하부 10~15°의 경사를 보였고 계곡하부에 이르러 주택, 농경지 부근에서 퇴적이 시작되면서 많은 피해를 발생시켰다. 김경식(2008)은 고속도로에서 발생한 토석류 48개소에 대한

자료분석을 통하여 계곡을 이동하는 토석류는 계곡경사와 계곡형태에 따라 침식과 퇴적의 양상이 달라지는데 약  $15^\circ$ 이상의 계곡에서는 침식이 우세하고 약  $10^\circ$ 미만의 계곡경사에서는 퇴적이 우세하다고 보고하였는데 본 현장에서의 계곡 침식부 및 퇴적부의 경사도 이와 유사한 것으로 나타났다.

## 2. 갑천면 상대리 산사태

본 현장은 <그림 9>, <그림 10>에 도시한 바와 같이 묘목장용으로 축조된 인공비탈면이 붕괴되면서 토석류로 전환되어 약 500m를 이동하면서 하류부의 주택 1채를 전파하고 상당수의 농경지를 매몰시키는 등의 피해를 입힌 지역으로 2013년 7월 15일 일강우량 138mm/day, 최대시우량 21.5mm/hr의 집중호우가 발생하여 산사태가 발생하였다.

### 1) 인공비탈면 붕괴부

본 지역은 산지 정상부를 절취후 2단으로 성토한 사면으로 산지 정상부에서는 길이 44m, 경사  $24^\circ$ 로 사면을 절취하였고 바로 아래에는 관상수를 재배하기 위한 묘목장용 부지를 폭 80m, 길이 30m로 조성하였다. 그러나 2013년 7월 중순경부터 발생한 집중호우는 배수시설도 없고 다짐도 전혀 되지 않은 묘목장용 부지에 쉽게 침투되었으며 더불어 사면 우측에 위치한 작은 계곡으로부터 흘러 내린 유수도 묘목 재배단지로 이동, 침투되어 결국 재배단지 우측사면에서 사면파괴가 발생하였다. 사면파괴는 폭 33m, 길이 43m, 깊이 8m의 대규모로 발생되었다.



<그림 9> 전체전경 및 파괴된 사면



〈그림 10〉 배수시설 없는 묘목경작지 및 우측 계곡전경

## 2) 토석류 유출구간(계곡부)

〈그림 11〉, 〈그림 12〉는 묘목장에서 사면활동 후 하부 농경지 및 민가로 이동한 전경과 묘목경작지 상의 인장균열을 나타낸 것이다. 사면파괴가 발생된 후 토석류로 전환되어 이동되면서 사면 아래 300m 지점에 위치한 주택 1채를 전파시켰고 전답 상당부분을 매몰시키는 피해를 야기했으며 파괴된 토사는 발생지점으로부터 하천변까지 약 500m를 이동하면서 퇴적되었다. 현장 조사결과 파괴된 사면 주위에는 인장균열이 도처에서 발견되어 추후 집중호우시 추가 파괴 가능성이 존재하므로 시급한 복구 및 보완조치가 필요한 지역이다.



〈그림 11〉 농경지에 퇴적된 토사 및 파손된 농가



<그림 12> 묘목 경작지 상의 인장균열

### 3. 청일면 갑천리 산사태

본 현장은 2013년 7월 15일 일강우량 76mm/day, 최대시우량 23mm/hr의 집중호우로 민가 뒤편 야산에 길이 15m, 폭 8m의 사면파괴가 발생하여 파괴된 토사가 민가의 일부에 침투하여 주택 일부를 파손시킨 지역이다.

<그림 13>에 나타낸 바와 같이 사면파괴 부위에서는 당시의 집중호우로 인하여 깊은 골이 형성되어 있었다. 본 지역에서는 7년 전의 집중호우시 사면파괴 부위 상부에서 작은 규모의 파괴가 발생되었으나 그대로 방치하여 금번의 집중호우시 우수의 집중을 초래하여 사면파괴가 발생된 것으로 판단된다.



<그림 13> 파괴사면 전경 및 손상된 가옥

## IV. 결론

본 연구에서는 2013년 7월 집중호우에 의해 강원도 횡성에 위치한 인공비탈면 1개소, 산지 2개소로써 토석류와 산지붕괴로 주택이 매몰되는 등 피해를 입힌 산사태에 대한 현장조사를 실시하여 강우특성과 산사태 특징에 대해 분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 강우분석 결과 최대시우량 및 일강우량, 누적강우량 등은 산사태 산립청 산사태 주의보를 초과하였으며 최대시우량 발생시간 직후에 붕괴가 발생한 점으로 보아 장기간에 걸친 호우로 지반이 포화되어 있는 상태에서 집중호우로 인하여 급경사지 붕괴가 발생된 것으로 나타났다.

2) 사면파괴 발생지역의 계곡에 간벌목 퇴적 등을 조사한 결과, 산지 계곡의 도처에 쌓여있는 간벌목이 집중호우시 우수의 원활한 배수를 방해하고 우수가 침수되도록 하여 사면파괴에 상당히 영향을 끼친 것으로 분석되었다.

3) 조사된 현장 일부에서는 배수시설의 부재와 다짐불량 등으로 인하여 우수가 사면내로 용이하게 침투함으로써 사면파괴가 발생되었으며 파괴된 토사는 토석류로 전환되어 하부지역의 주택, 농경지 등에 피해를 입힌 것으로 조사되었다.

## 참고문헌

- 김경석. 2008. 토석류 발생지형과 유발 강우특성 분석. 대한토목학회. 28(5C): 263-271.
- 김경수, 김원영, 채병곤, 조용찬. 2000. 강우에 의한 산사태의 지질공학적 특성. 대한지질공학회. 10(2): 163-174.
- 김상규, 서홍석. 1997. 레올로지 모델을 이용한 토석류 이동해석. 한국지반공학회. 13(5): 133-143.
- 박종호, 장범수. 2006. 집중호우에 의한 성토사면 붕괴사례. 한국지반공학회. 2006가을학술발표대회 논문집: 626-631.
- 백용, 김부생, 박경부, 김학준. 2006. 토사재해 저감 대책방안을 위한 사례. 한국지반공학회. 2006가을학술발표대회 논문집: 611-614.
- 유병옥, 장범수, 최승일, 최우경. 2006. 2006고속도로변 토석류 피해발생 및 대책. 한국지반환경공학회. 가을학술발표대회 논문집: 115-127.
- 윤영호. 2010. 현장조사에 의한 토석류의 발생특성 연구. 한국환경기술학회. 11(2): 109-115.
- 채병곤, 김원영, 나종화, 조용찬, 김경수, 이춘오. 2004. 제3기 퇴적암 및 화산암 분포지의 산사태 예측 모델. 대한지질공학회. 14(4): 443-450.
- 최준식, 유남재, 김중환. 2010. 집중호우에 의한 유역별 산사태발생 특성: 강원도 원주.횡성을 중심으로. 2010 대한토목학회 정기학술대회 논문집: 2155-2158.
- Campbell, R. H. 1975. *Soil Slips, Debris Flows, and Rainstorms in the Santa Monica Mountains and Vicinity, Southern California*, US Geological Survey. Reston. VA, USGS Professional.

**朴柄洙**: 강원대학교에서 공학박사학위(논문제목: 직접법에 의한 지반공학문제의 System Identification, 1999년 8월)를 취득하였으며, 현재는 강원도립대학 건설토목과 조교수로 재직 중이다. 주 연구분야는 사면안정, 준설매립, 토석류 재해 분야이며, 강원 영서지역 산사태 및 강우특성 분석(2012), 강원 인제지역 토석류 사방시설의 준설 및 퇴적특성 분석(2012), 토석류 발생 사면의 불포화토 사면안정해석(2012)등의 논문을 게재한 바 있다. 현재 대한토목학회 회원 등으로 활동 중이다(bspark@gangwon.ac.kr).

**徐興錫**: 동국대학교에서 공학박사학위(논문제목: 토석류의 이동과 퇴적에 관한 연구, 1997년 2월)를 취득하였으며, 현재는 강릉영동대학교 토목건설과 부교수로 재직 중이다. 주 연구분야는 사면보강, 연약지반 분야이며, Seepage and Slope Stability Analysis on the Occurrence of Debris Flow at Jinbu, Korea(2010), Debris Flow in Metropolitan Area: 2011 Seoul Debris Flow(2013) 등의 논문을 게재한 바 있다. 현재 대한토목학회 회원 등으로 활동 중이다(seohsk@gyc.ac.kr).

투 고 일: 2013년 10월 22일

수 정 일: 2013년 11월 22일

게재확정일: 2013년 11월 25일

# A Case Study for the Slope Face Collapse and Occurrence of Debris Flow According to Heavy Rain

Byung Soo Park, Hung Seok Seo

This is a study about the analysis of cause of landslide and rainfall characteristics for the slope face and debris flow occurred in Hoengseong Gangwon Province in the year 2013. From the results of field test for the one artificial slope face and two mountain area, it was found that thinning-out trees laid everywhere in mountain area interrupted the drainage and caught rain water. Therefore, it affected slope failure. Furthermore, slope failure was occurred because of no drainage facility and compaction failure in somewhere. By the way, the maximum rainfall intensity, day rainfall amount, and accumulated rainfall amount were exceeded the limit of landslide watch in Korea Foreset Service. It could be determined that sharp slope area was collapsed by heavy rain and saturated by long term rainfall.

**Key words:** landslide, debris flow, rainfall characteristics, heavy rain