

# 지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 산정에 관한 기초연구

## A Study on Estimation of Amount of Debris-Flow using Terrestrial LiDAR

전 계 원<sup>1)</sup> · 전 병 희<sup>†</sup> · 안 광 국<sup>2)</sup> · 장 창 덕<sup>3)</sup> · 김 남 균<sup>4)</sup>

Jun, Kyewon · Jun, Byonghee · Ahn, Kwangkuk · Jang, Changdeok · Kim, Namgyun

**ABSTRACT** : The purpose of this paper is estimating of the amount of debris flow in hazard area using terrestrial LiDAR surveying data. Jecheon area was selected for this study. Then, the surveyed LiDAR information of DEM and 1:5000 digital map of DEM have been compared with each other and the amount of debris flow has been estimated. The result of this study was shown that the amount of erosion was 24,150 m<sup>3</sup> and deposition was 14,296 m<sup>3</sup>. Well shape of channelized debris flow, hillslope debris and deposition at the bending reach of a channel can be found in the area. This study on estimation of the amount of debris flow was expected to provide more informations for debris flow of disaster mitigation and simulation work.

**Keywords** : Debris flow, Heavy rainfall, Digital elevation model, Terrestrial LiDAR

**요 지** : 본 연구에서는 지상 LiDAR(Light Detection And Ranging) 스캔자료를 이용하여 토석류 재해 발생지역에 대한 토석류 발생량을 산정하고자 하였다. 충북 제천시를 연구대상지역으로 선정하여, 1:5000 수치지도를 이용한 DEM(수치표고모형)자료와 LiDAR 측량자료를 이용한 수치표고모형자료를 비교분석 하고 토석류 발생량을 산정하였다. 연구결과 침식량은 24,150m<sup>3</sup>, 퇴적량은 14,296m<sup>3</sup>로 산정되었고, 수로형 토석류와 사면형 토석류의 형태, 만곡부에서의 퇴적 등이 적절히 표현되었다. 토석류 발생량의 산정 연구는 토석류 재해저감이나 대책수립 및 수치모의에 유용한 기초자료로 활용 될 것이다.

**주요어** : 토석류, 집중호우, 수치표고모형, 지상 LiDAR

## 1. 서 론

### 1.1 연구배경 및 목적

토석류(debris flow)란 흙과 물이 섞여 이동하는 현상으로 이동경로와 퇴적지점에 있는 시설물, 가옥 및 인명에 매우 큰 피해를 입히는 자연재해이다. 토석류는 집중호우로 인한 사면파괴, 산지계류에서의 급류에 의한 하상의 침식 등 다양한 유발요인에 기인하여 발생하며, 피해의 저감과 예측을 위해서는 발생지역의 지형, 지질, 강우유출특성 등의 체계적인 연구가 필요하다.

국외의 토석류 재해분석을 위한 연구를 살펴보면 일본, 이탈리아, 캐나다 등 피해발생이 빈번한 나라를 중심으로 활발히 연구가 진행되고 있으며 각 나라의 고유한 지형, 지질적인 특성과 강우 등의 수문특성의 차이로 인해 다양한 연구형태를 보이고 있다. 일본은 교토대학 방재연구소, 방재과학기술연구소 등을 중심으로 토석류해석연구를 진행하

고 있으며, 특히 방재과학기술연구소에서는 일본 전역을 대상으로 하는 1:50,000 축척의 산사태지형분포도를 작성하였다. 홍콩은 1995년부터 사면자료를 데이터베이스로 구축하여 위험등급을 매기고 피해의 저감을 위해 산사태방지대책 프로그램을 운영하고 있으며, GIS를 활용한 분석기법을 이용하여 재해위험지도를 제작하고 있다. 캐나다의 경우 지질조사소에서 국가지질재해 프로그램의 일부로 산사태재해에 대한 발생예측 및 모델개발에 관한 연구를 수행하고 있으며 스위스는 최근 스위스연방연구소에서 토석류 방호시스템을 위한 수치해석 프로그램을 개발하고 유연성 방호시스템에 관한 활발한 연구가 진행 중이다.

국내에서의 토석류 연구는 사면재해 중 하나로 분류되어 일부 진행되다가 최근 기후변화와 더불어 2002년 태풍루사, 2003년 태풍메미 그리고 2006년 강원도 지역의 집중호우 등으로 많은 인명과 재산피해를 준 토석류재해 발생사례의 증가로 인해 토석류 연구분야가 주목을 받고 있다. 연구는 주로 토석류의 발생을 예측하기 위한 회귀모형의 이용(채병곤

1) 비회원, 강원대학교 방재전문대학원 조교수

† 정희원, 강원대학교 소방방재학부 조교수(E-mail : bhjun@kangwon.ac.kr)

2) 정희원, 충북대학교 토목공학과 조교수

3) 비회원, 강원대학교 방재전문대학원 박사과정

4) 비회원, 강원대학교 방재전문대학원 석사과정

등, 2004), 강원지역에 발생한 사면재해에 대한 현장조사를 통한 피해현황조사 및 복구대책(유병욱 등, 2006; 이철주 등, 2009)에 관해 이루어지다가 최근에는 토석류 특성파악을 위한 모형실험(김기환 등, 2008)과 토석류 현장모니터링(김용균 등, 2008), 시뮬레이션을 통한 토석류 산사태의 재현(서용석 등, 2008) 및 항공사진이나 항공 LiDAR를 이용한 피해지 조사나 붕괴토사량 추정(윤호중, 2008; 이창우 등, 2009) 및 재해지도를 제작하기 위한 연구도 이루어지고 있다.

최근 연구동향을 살펴볼 때 토석류재해를 저감시키고 재해지도 작성이나 피해복구대책을 수립하기 위해서는 먼저 피해 발생지역과 발생량 예측에 관한 연구가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 최근 항공 LiDAR와 더불어 활용도가 높아지고 있는 지상 LiDAR를 이용하여 지난 2009년 7월 집중호우로 인해 발생한 충북 제천시 지역의 토석류 발생 현장에 대해 분석하고 토석류 발생량을 측정하기 위한 기초 연구를 수행하고자 한다.

## 1.2 연구지역 토석류 발생현황

연구 대상 지역인 충북 제천시에 발생한 토석류재해는 2009년 7월 14일 제천시 일대를 지나간 최대시강우량 64mm/hr(제천시 봉양읍)의 집중호우로 인해 발생하였다. 14일 낮부터 충북 제천, 충주 및 음성에 내려졌던 호우정보는 호우주의보로 바뀌었다가 15일 새벽 3시 10분을 기해 해제되었다(7월 19일자 YTN뉴스 인터넷기사). 제천시 합동조사반의 피해조사에 따르면 19일까지 주택침수 36동, 농경지침수 및 매몰 31.9ha, 산림피해 13개소 18.29ha, 임도 5개소 3.3km이며 도로 8개소, 하천피해 35개소 등으로 집계되었고 피해현장에는 중장비 361대와 인력 355명이 투입되었으며 피해액이 6억 3천 만원으로 집계되었다(7월 19일자 청주newsis 인터넷기사).

그림 1은 토석류 발생지역의 현장을 나타낸 사진이다. 이 지역의 토석류는 그림 1(a)와 같은 수로형태와 그림 1(b)와 같은 사면형태가 복합적으로 발생했으며 계곡의 만곡부와

그림 1(c)와 같이 계곡 완경사지에 일부 퇴적되고 나머지는 하류에 위치한 공전저수지로 유입되었다.

## 2. 연구방법

### 2.1 지형특성

재해현장의 특성을 파악하기 위해 현지조사를 실시하였고 문헌조사와 1:5000 수치지도를 분석하여 연구지역의 지형특성과 토석류발생의 관계를 조사하였다. 현지조사는 토석류의 발생과 이동 및 퇴적지역을 구분하여 토석류가 이동하는 경로를 따라 이루어졌으며 각 단계의 토석류 거동에 대한 내·외적 요인을 살펴보고 피해규모를 파악하였다. GPS 장비를 이용하여 토석류 이동경로에 대한 위치자료를 수집하고 유량이 유입되는 계곡부의 지형특성도 조사하였다. 또한 1:5000 수치지도와 ArcView 프로그램을 이용하여 피해 발생지역의 고도분포, 경사 및 주변지형특성 및 특이점 등을 사전에 조사하여 현장조사 시 비교·검토하였다.

본 연구지역은 토석류재해가 최근에 발생하였고 피해 복구공사로 인한 현장정리가 거의 이루어지지 않은 지역이다. 또한 추가 발생 우려가 높고 발생경로가 예측하기 쉬우며 발생과 이동 및 퇴적을 한 번에 관찰하기 쉬운 장점을 가지고 있어 지속적인 모니터링이 이루어진다면 토석류 특성분석을 위한 다양한 자료가 도출될 수 있는 지역이다. 따라서 본 연구에서는 이 지역의 지속적인 변화를 관찰하기 위해 지상 LiDAR장비를 이용하여 현장의 지형을 스캔하여 지형특성을 파악하고 장기모니터링을 위한 모형을 구축하였다.

### 2.2 토석류 발생량 산정

지상 LiDAR를 이용한 재해현장 스캔자료와 1:5000 축척의 수치지도를 이용한 분석으로 지형변화 및 토석류 발생량을 산정하였다. 현장의 스캔에 사용한 장비는 RIEGL사의 LMS-Z210ii로 반사율 80%기준에서 최대 측정거리 650m,



(a)



(b)



(c)

그림 1. 충북 제천시 토석류 발생지역 현장사진(2009. 10. 25)

수직 0°~80°, 수평 0°~360° 범위로 15mm의 오차수준으로 포인트를 획득할 수 있으며, 카메라와 GPS를 장착하면 측정 포인트의 RGB값 및 절대좌표를 획득할 수 있다. GPS는 HUACE사의 X90 2주파 RTK(Real Time Kinematic) 장비로 국토지리원에서 구축한 VRS(Virtual Reference System) RTK시스템을 이용하면 수평방향 ±10mm+1ppm, 수직방향 ±20mm+1ppm의 정확도를 가진다.

레이저를 이용한 지형·지물의 측정은 측정 대상에 레이저를 쏘아 표면에서 반사되어 되돌아오는 레이저광을 광센서(light-detecting sensor)를 이용하여 감지, 분석하는 방법으로 이루어지며 장치는 송신부(transmitter), 수신부(receiver), 처리부(processor)로 구성된다.

Time-Of-Flight(TOF) 또는 Ranging으로 불리는 레이저스캔방법은 레이저 빔을 보내는 레이저 다이오드에서 나온 빛이 대상의 표면에 부딪혀 일부는 주변으로 퍼지게 되고 나머지는 수신부로 되돌아오게 되는데 이 때 돌아온 빛의 왕복시간과 각도를 계산하여 측정하는 방법이다. 측정에 사용된 장비를 다음의 그림 2에 나타내었다.

토석류 발생량은 발생 전의 정밀지형자료의 확보가 사실상 어렵고 발생시점에서의 측정이 어렵기 때문에 다양한 방법으로 추정할 수밖에 없다. 토석류 발생량을 추정하는 방법 중 측량을 통한 추정방법을 몇 가지 소개하면 다음과 같다. 첫째, 일반적으로 많이 실시하는 토석류 발생량 산정방법으로 현장조사 시 줄자와 폴을 이용하여 일정간격으로 붕괴지의 폭과 깊이를 측정하고 이를 통해 붕괴량을 산정하는 방법이다. 붕괴지의 범위가 크지 않고 현장조사 시 인력에

의해 간편하게 산정할 수 있다. 하지만 인력의 접근이 어렵거나 붕괴지가 붕괴 전 오목(凹)이나 볼록(凸)인 형상을 가졌을 때 많은 오차가 발생한다. 둘째, 아래의 식 (1)과 같이 대상지역의 면적에 전체 유역의 산사태 발생면적 비율을 곱하고 붕괴지역의 평균토심을 곱하여 계산하는 방법이다(윤호중 등, 2009). 재해지도의 제작 시 피해규모와 피해범위를 산정하기 위해 사용할 수 있다. 셋째, 토석류 발생 전 지형을 추정하는 원리에 의한 방법으로 “산지사면이 연속적이며 일정 각도로 안정한 상태”인 것을 전제로 발생 후 측정된 지형자료에서 토석류 발생지의 측량점을 제거한 뒤 TIN(Triangle Irregular Network)보간법을 통해 발생 전 지형을 산정하고 발생체적을 계산하는 방법이다.

$$\text{토석량(m}^3\text{)} = \text{유역면적(m}^2\text{)} \times \text{산사태발생면적비율(\%)} \times \text{붕괴지평균토심(m)} \quad (1)$$

본 연구에서는 피해 발생 전의 1:5000 수치지도를 이용하여 토석류 피해지역의 수치고도모형(DEM; Digital Elevation Model)을 만들고 이를 발생 전 지형으로 가정하고 발생 후 지상 LiDAR를 이용하여 획득한 자료와 비교하여 토석류 발생량을 추정하였다.

토석류 발생량 추정과정은 그림 3과 같다. 먼저 지상 LiDAR 장비를 이용하여 대상지역의 지형정보를 측량한다. 각 지점에서의 스캔자료는 상대좌표로 구성되어 있으므로 스캔지점간의 스캔자료의 연산을 통한 절대좌표로의 변환이 필요하다. 따라서 측정 시 측정 지역의 중첩이 가능한 지점을 적절히 선정하여야 한다. 그림 4는 연산과정을 거쳐 3차원 모



그림 2. 지상 LiDAR 장비(LMS-Z210ii)

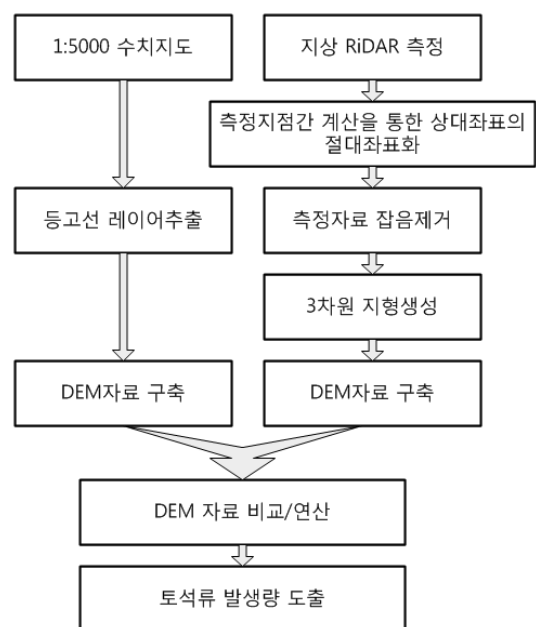


그림 3. 토석류 발생량 도출 과정

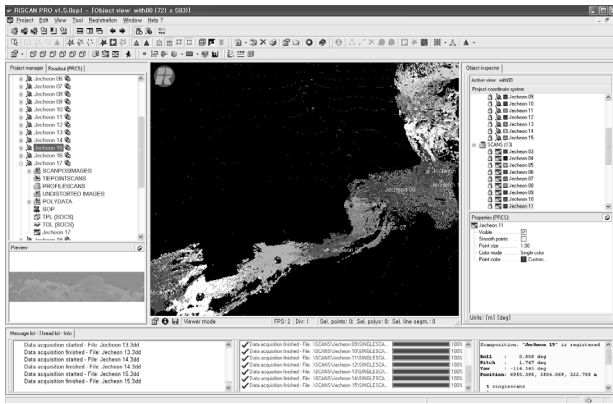


그림 4. 스캔자료를 이용한 3차원 모형의 생성

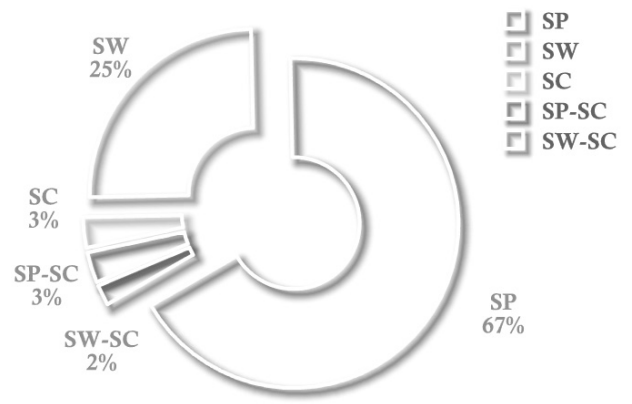


그림 6. 통일분류법에 의한 제천시 토질의 분류

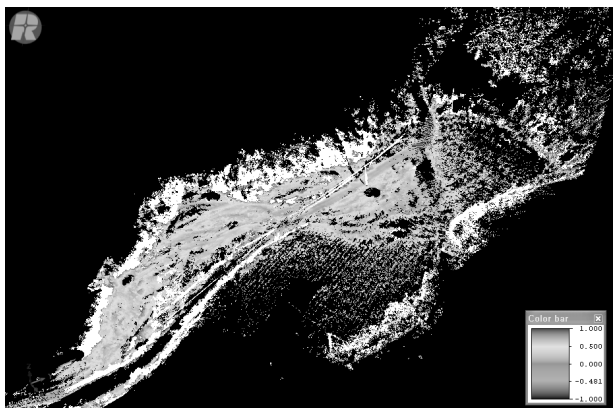


그림 5. 지상 LiDAR 스캔자료에서의 수목제거

형이 생성된 스캔자료를 나타낸 것이다. 절대좌표로 변환된 지형정보에는 아직 인공지형물이나 수목 등의 불필요한 정보가 존재하며 이를 제거하여야 실제 지형에 해당하는 정보를 얻을 수 있다. 측정정보에 대한 잡음의 제거 방법은 수작업으로 일일이 대조하여 지면점 외의 수목이나 인공구조물을 제거하는 방법, 반사율에 의한 제거 방법, 각종 필터 (Elevation Threshold Expanding Window, Maximum Local Slope, Morphological 등)를 활용한 방법 등 다양한 방법이 있으며 본 연구에서는 획득한 원시 자료를 이용하여 격자화 (Grid)된 지면정보를 생성하고 이를 기준으로 버퍼링하는 잡음제거방법을 사용하였다(그림 5). 이러한 방법에 의해 잡음이 제거된 지형자료를 이용하여 DEM자료를 구축하고 1:5000 수치지도를 활용하여 생성한 DEM과의 연산을 통해 토석류 발생량을 산정하였다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 지형분석

2009년 7월 14일 발생한 제천시 지역의 토석류재해를 연구하기 위하여 실내사전조사를 실시하고 2009년 10월 중순

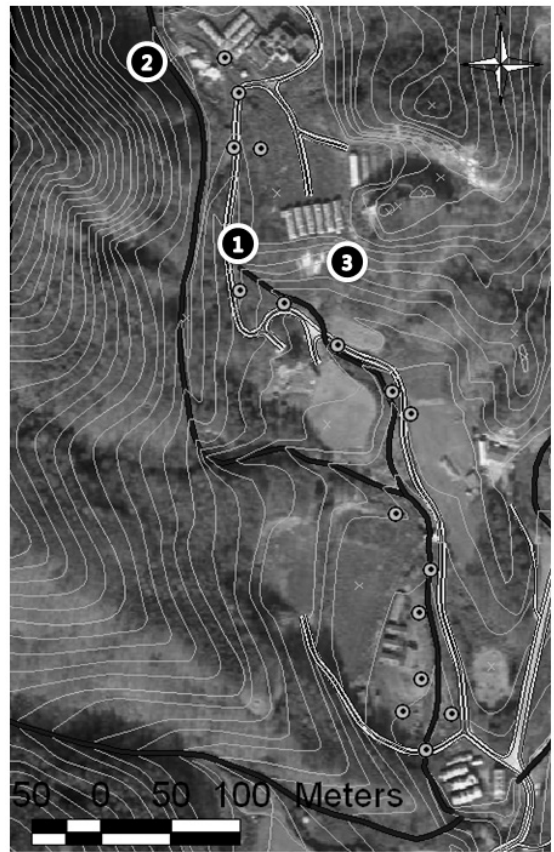


그림 7. 충북 제천시 토석류 발생지역

현장조사를 실시하였다. 연구지역은 충북 제천의 북쪽에 위치하며 북동-남서 방향의 능선이 주로 발달하고 있으며 계곡부의 발달은 동-서 방향으로 주계곡이 발달하였다. 제천 지역은 다른 충청지역에 비해 해발고도가 높고 북쪽에 위치한 사면경사도 급하게 발달하고 있지만 제천시가지에 영향을 줄 수 있는 산사태 발생의 확률은 상대적으로 낮으며 주로 북북동-남남서 방향의 소계곡 주변 사면에서 산사태가 발생할 가능성이 높은 것으로 연구되고 있다. 제천지역의 토층을 통일분류법(USCS; Unified Soil Classification System)에 따라 분류하면 그림 6과 같이 주로 사질지반의 SP, SW,

SC, SP-SC 및 SW-SC 등으로 분류되었다(한국지질자원연구원, 2009). 화강암류의 사질토지대는 일반적으로 집중호우에 의한 표층붕괴나 토석류의 재해를 받기 쉬운 지대로 알려져 있다(정두영, 1999).

제천지역 토석류 피해지역의 경우 웹사이트(다음지도)에서 제공하는 영상자료와 1:5000 수치지도를 이용하여 도출된 특이점(유로변화, 지형변화 등)과 이에 대한 현장답사 결과를 같이 분석해 본 결과 그림 7에 나타난 것처럼 기존에 형성되어 있던 하천 ①의 자연적인 흐름을 막고 인위적으로 ②로 우회 시켰던 것이 집중호우로 인해 급증한 유출량을 소화하지 못해 월류한 것으로 분석된다. 월류하여 유출된 흐름은 하도상에 퇴적된 토사와 하도 좌우안을 침식시켰고 ③번 위험사면도 파괴되어 하천으로 유입된 것으로 분석되었다. 연구지역 상류를 조사한 결과 강한 집중호우로 인하여 수로를 형성하고 있던 호박돌 크기의 석재가 이탈하고 유하 및 퇴적되어 피해를 가중시킨 것으로 판단된다. 그림의 황색점은 지상 LiDAR 측정지점을 나타낸 것이다.

### 3.2 토석류 발생량

토석류 발생량을 산정하기 위해 지상 LiDAR를 이용하여 3차원 지형정보를 생성하였다. 측정지점은 총 21개 지점에서 측정하였으며 각각 GPS를 장착하여 측정지점의 절대좌표를 획득하였다. 1:5000 수치지도를 이용하여 형성한 DEM과 지상 LiDAR 측량자료를 이용한 DEM자료를 ArcView에서 연산하여 추정된 토석류 발생량을 침식과 퇴적으로 구분하여 그림 8과 표 1에 나타내었다.

붉은색 계열의 색상이 나타내는 부분이 침식구간이고 녹색 계열 부분이 퇴적을 나타내는 구간이다. 산정결과 수치지도의 표고와 비교하여 침식은 수로형 토석류 발생구간인 그림 8의 ①번으로 표시된 지점에서 약 4m이며 ②번 지점인 사면형 토석류 발생구간에서 최고 약 8m의 심도로 나타났다. 퇴적은 위험사면 직상류의 만곡부인 ③번 지점에서 최고 4m 정도로 나타났다. 상류 수로를 따라 형성된 침식구간과 위험사면에서의 사면파괴가 잘 반영되었으며 만곡부 두 곳과 합류지점 한 곳에서의 퇴적도 비교적 잘 나타났다. 발생한 토석량은 총 침식량 24,150m<sup>3</sup>이고 총 퇴적량 14,296m<sup>3</sup>로

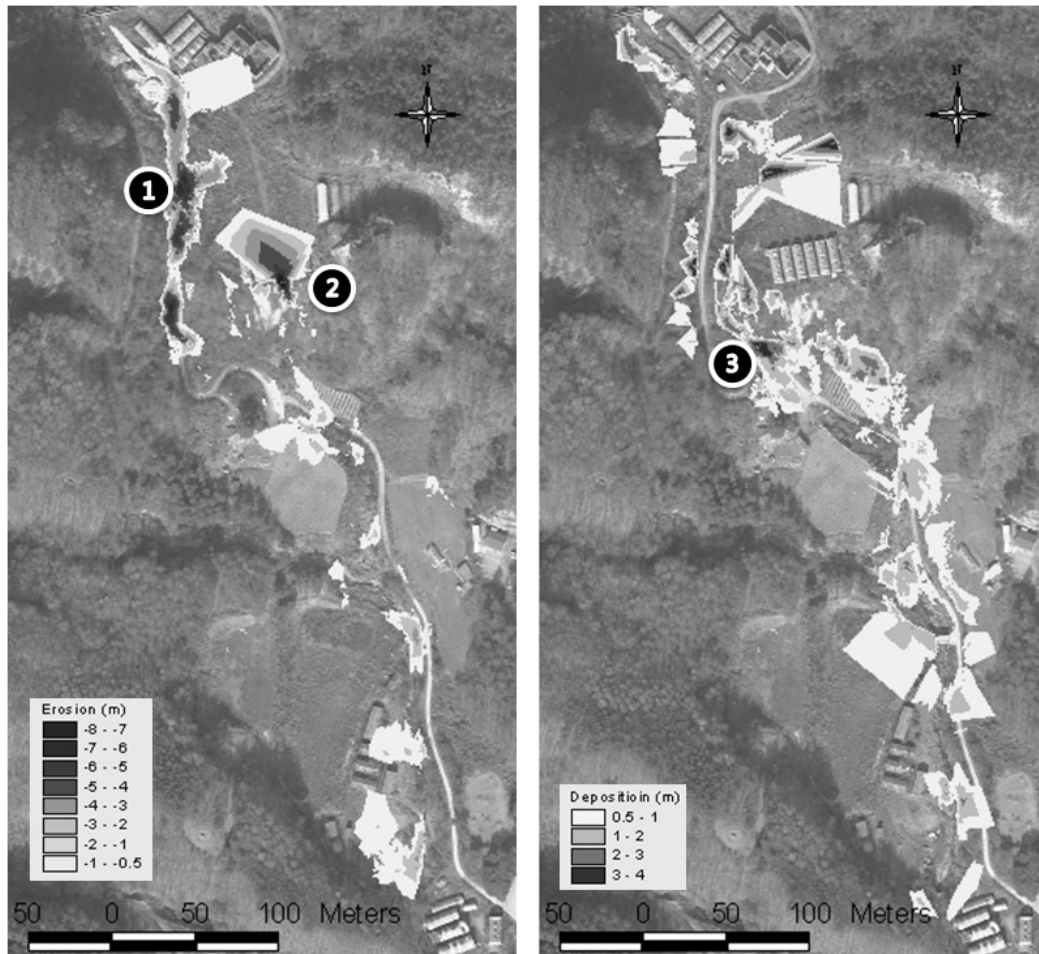


그림 8. 토석류 발생량 산정결과

표 1. 연구지역의 토석류 발생량 산정결과

구분	색 구분	총 면적	총 체적
침식	붉은색 계열	10,622m <sup>2</sup>	24,150m <sup>3</sup>
퇴적	녹색 계열	16,190m <sup>2</sup>	14,296m <sup>3</sup>

침식량과 퇴적량이 약 10,000m<sup>3</sup> 가량 차이를 보였다. 또한 침식면적은 10,622m<sup>2</sup>이고 퇴적면적은 16,190m<sup>2</sup>로 퇴적지형이 더 넓게 분포하였다. 현장답사 자료와 비교한 결과 퇴적면적이 침식면적보다 더 넓게 나타난 것은 경사가 급한 산지의 경우 토석류 발생 시 일부 침식구간에서는 급격한 침식이 이루어지고 퇴적 시는 완경사지, 만곡부 또는 합류부 등에서 넓게 퍼지는 토석류의 특성이 반영된 것으로 분석되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 토석류재해지도작성이나 피해복구대책 수립 등을 위해 선행되어야 하는 토석류 발생량 산정에 대한 연구를 수행하기 위해 최근 토석류 재해가 발생한 충북 제천지역을 대상으로 연구를 수행하였다. 연구는 현지조사와 더불어 최근 활용도가 높아지고 있는 지상 LiDAR를 이용하는 방법으로 진행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 연구지역의 토석류 발생은 수치지도와 현장조사를 통해 분석한 결과 하도의 인위적인 변화에 따른 집중호우 시 유량증가에 의해 우회 하천의 붕괴가 이루어졌고 붕괴된 흐름은 기존의 하도를 따라 흐름이 진행하면서 수로형태의 토석류가 발생한 것으로 분석되었다.

토석류의 형태는 수로형 토석류와 사면형 토석류가 동시에 확인되었으며 연구지역 내에서 침식과 이동 및 퇴적을 모두 확인 할 수 있었다.

토석류의 발생량을 산정한 결과 침식량은 24,150m<sup>3</sup>, 퇴적량은 14,296m<sup>3</sup>로 산정되었고 토석류에 의한 침식면적은 10,622m<sup>2</sup>, 퇴적면적은 16,190m<sup>2</sup>로 산정되었다. 산정된 결과에서 침식량과 퇴적량의 차이는 토석류 발생 초기에 하도를

통해 연구지역 경계 밖으로 유출된 부분과 퇴적된 토사 중 작은 입경의 토사가 흐름에 의해 서서히 빠져나간 부분의 결과라고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 지역 기술혁신사업인 수충부 및 토석류 방재기술 연구단의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 김기환, 이동혁, 김대회, 이승호 (2008), 토석류 흐름 상태 특성 파악을 위한 모형실험 연구, *한국지반환경공학회*, Vol. 9, No. 5, pp. 83~89.
2. 김용균, 안대영, 강대우, 한병원 (2008), 유비쿼터스 기반 토석류 산사태 모니터링 시스템 개발에 관한 연구, *한국지질공학회*, Vol. 18, No. 4, pp. 511~522.
3. 서용석, 김성권, 채병곤 (2008), 토석류 산사태 시뮬레이션 연구, *2008년도 가을학술발표회 논문집*, 한국지질공학회, pp. 209~215.
4. 유병옥, 송평현, 정찬규 (2006), 2006 강원 인제, 양양, 평창지역 토석류 발생사례분석, *2006년도 가을학술발표회 논문집*, 한국지질공학회, pp. 615~625.
5. 윤호중 (2008), 항공 LiDAR를 이용한 산지토사재해 붕괴토사량 추정, *산림과학정보*, No. 203, pp. 4~5.
6. 윤호중, 이창우, 우충식, 정용호, 이천용 (2009), *토석류 발생 특성과 피해규모 예측기법 개발*, 연구보고09-20, 국립산림과학원, pp. 92~107.
7. 이창우, 우충식 (2009), *항공사진 및 LiDAR 자료와 GIS기법을 이용한 산지토사재해 조사*, 월간산림, No. 522, pp. 92~95.
8. 이철주, 유남재 (2009), 2006년 강원도 인제지역의 토석류 산사태 수해 및 복구에 관한 연구, *한국방재학회*, Vol. 9, No. 1, pp. 99~105.
9. 정두영 (1999), 산사태나 토석류 등 재해에 대한 예측과 대책, *한국지반공학학회*, Vol. 15, No. 10, pp. 16~26.
10. 채병곤, 김원영, 조용찬, 김경수, 이춘우, 최영섭 (2004), 토석류 산사태 예측을 위한 로지스틱 회귀모형 개발, *대한지질공학회*, Vol. 14, No. 2, pp. 211~222.
11. 한국지질자원연구원 (2009), *산사태재해 예측 및 저감기술 개발*, NEMA-06NH-04, 한국지질자원연구원, pp. 165~178.

(접수일: 2010. 1. 20 심사일: 2010. 2. 2 심사완료일: 2010. 2. 11)