

유하부 지형 특성에 따른 토석류 퇴적 분석

Analysis of Debris Flow Deposition based on Topographic Characteristics of Debris Flow Path

김기홍¹⁾ · 윤준희²⁾

Kim, Gihong · Youn, Junhee

Abstract

Recently, the frequency of debris flow disaster has increased, which is one of the natural disasters during extremely heavy rainfall condition. This paper described the analysis method about deposition characteristics of debris flow using topographic characteristics of debris flow path. First, we observed topographic changes by differencing high-resolution LiDAR DEMs acquired before and after the occurrence of debris flow event. We assumed that deposition on outside of debris flow path was generated by movements due to the inertia of debris flows. Then, we analyzed three topographic characteristics of debris flow path: slope in flow direction, transition angle of flow path, and the net efficiency(L/H) of debris flows defined by the ratio of transport length(L) and elevation difference(H). We applied this method to Umyeon Mountain debris flow event in July 2011. The results showed that deposition on outside of debris flow path due to the inertia of debris flows was significantly related to the transition angle of debris flow path. Also, we figured out that there were more frequent such depositions in locations where the ratio of 'transition angle / (L/H)' is over 8.

Keywords : Debris flow, LiDAR DEM, Deposition, Transition angle, L/H

초 록

최근 우리나라에서는 극한 강우 조건에서 발생하게 되는 토석류의 발생 빈도가 증가하고 있다. 본 논문에서는 유하부의 지형 특성에 따른 토석류 퇴적의 발생 특성을 분석하는 방법을 기술하였다. 먼저 토석류 발생 전후 비교적 근시기의 고해상도 LiDAR DEM을 차분하여 지형변화를 관측하고, 유하부 외부로의 퇴적이 관측되는 지점을 토석류의 관성으로 인해 토석류 이동이 진행된 지점으로 가정하고, 이러한 퇴적이 발생하는 유하부의 지형 특성을 유로방향경사, 유하부의 이동 전환각도, 발생부로부터 해당 지점까지의 이동거리에 대한 표고차의 비율계수(L/H)로 표현되는 토석류의 순효율 계수 특성 항목을 이용하여 분석을 수행하였다. 이러한 방법을 2011년 7월 발생한 우면산 토석류 재해를 대상으로 하여 실험을 수행하였다. 실험결과 관성에 의한 토석류의 퇴적은 유하부의 전환각도와 큰 상관관계를 갖는 것으로 나타났으며, '전환각도/(L/H)'의 비율이 8 이상인 지점에서 관성에 의한 진행이 주로 발생함을 알 수 있었다.

핵심어 : 토석류, LiDAR DEM, 퇴적, 전환각도, L/H

1. 서론

토석류는 극한 강우 상태에서 발생하는 대표적인 자연재해로서 토사와 물의 혼합물이 섞여 이동하는 현상으로 빠른 속

도로 계곡부와 소하천을 따라 여러 입자들이 유역출구로 이동 및 퇴적하는 특징이 있다(Ko *et al.*, 2013). 최근의 잦은 기상이변 현상으로 인해 이와 같은 토석류로 인한 자연재해의 위험이 증가되고 있다. 토석류는 산사태 등과 같은 사면파괴

1) Regular Member, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National Univ., Korea (E-mail: ghkim@gnu.ac.kr)

2) Corresponding Author, Regular Member, ICT Convergence and Integration Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Korea (E-mail: younj@kict.re.kr)

로부터 유발되어 유하부를 따라 이동하며 지형의 침식을 발생시켜 퇴적부에 이르러서는 다량의 토사와 물이 유역출구부근에 피해를 야기한다. 일반적으로 토석류는 산악지형에서 발생하는 자연재해로 정의할 수 있으나, 우리나라의 경우 국토의 대부분이 산악지형의 특징을 갖고 있어 대부분의 지역이 토석류 재해로부터 안전하지 못하다. 또한 우리나라는 좁은 국토에 비해 인구밀집도가 높아 사회간접시설 및 주거시설, 농경지 등이 유역출구에 집중되어 있는 사회적 요인이 복합적으로 작용되어 도심지에서의 토석류 재해 위험도도 매우 높다고 할 수 있다. 2011년 7월 많은 인명피해와 재산피해를 야기한 서울 도심의 우면산 토석류 재해의 경우 극한 강우로 인한 도심지에서의 토석류 재해의 대표적 사례로 볼 수 있다.

토석류는 수리-수문학적 요인 및 지질학적 요인, 지형학적 요인 등이 복합적으로 작용하는 특징이 있다. 이로 인해 토석류와 관련한 연구는 이러한 요인들을 종합하여 수치해석적, 통계적 방법을 통해 토석류의 거동 특성을 파악하고자 하는 연구와 토석류의 피해 범위 평가를 통한 위험도 분석과 같은 주제들로 진행되고 있다. 이와 같은 연구들은 토석류가 발생하게 되는 물리학적 특성을 분석하는 방법(Miles and Ho, 1999; Ohlmacher and Davis, 2003)이나 다수의 불안정 인자들의 공간분포 관계를 분석하는 방법(Conoscenti *et al.*, 2008; Nandi and Shakoor, 2009)들을 통해 토석류를 유발하는 유의한 인자를 결정하거나 토석류가 발생할 수 있는 확률적 수치들을 찾아내는데 목적을 두고 있다. 다시 말해 대부분 토석류 재해 이후 현장조사 등의 방법을 통해 재해이력을 구축한 후, 이를 기초로 한 재해의 특성 및 거동에 대한 경험적 지식의 축적을 통한 위험도 예측과 관련한 연구라고 할 수 있다. 하지만 도심지에서 발생하는 토석류 재해의 경우 시민 안전의 이유와 도시 미관의 이유 등으로 인해 재해 발생 직후 복구 작업이 바로 진행되어 현장조사 자료 축적에 한계가 존재한다. 이 경우 토석류 재해 발생 전후의 지형자료 등과 같은 GIS 자료 기반으로 토석류 재해에 대한 간접적인 자료 축적이 가능하다(Chandler, 1999; Hooper *et al.*, 2003; Tsutsui *et al.*, 2007). 최근 LiDAR 기술의 발전으로 인해 지형을 보다 상세하게 표현할 수 있게 되었으며, 이로 인해 토석류로 인한 지형의 변화를 관측하는 방법에 대한 연구들이 다수 진행되고 있다(Jaboyedoff *et al.*, 2012). LiDAR는 특히 산림 지역에서의 수목의 높이 및 bare ground를 관측하는데 있어 기존 사진측량 기술에 비하여 이점이 있으므로 토석류 연구에 적용하여 활용되는 빈도가 점차 증가하고 있다(Clark *et al.*, 2004). Du and Teng(2007)은 3차원 laser scanning 기술과 GPS 기술을 융합하여 산사태의 규모 예측과 관련한 연구를 수행한 바

있으며, Bull *et al.*(2010)은 LiDAR를 이용하여 지형의 변화 관측을 통해 토석류를 평가하는 방법에 대한 연구를 수행한 바 있다. 또한 Bremer and Sass(2012)는 항공 LiDAR 자료와 지상 LiDAR 자료를 융합하여 토석류로 인해 발생한 침식량과 퇴적량을 산정하는 연구를 수행하였다. 국내에서도 Kim *et al.* 등(2012)이 LiDAR를 이용하여 토석류를 평가하는 방법에 대한 기초 연구를 진행하였으며, Woo *et al.* 등(2011)은 LiDAR를 이용하여 토석류 발생지역의 지형복원을 통해 토석류 발생 이전의 지형을 예측하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 이와 같은 토석류와 관련한 LiDAR 기술의 적용은 대부분 토석류의 발생규모를 예측하기 위한 연구들로 주로 수행되고 있으며, 아직까지 지형변화의 관측을 통한 토석류의 침식 및 퇴적과 관련한 지형특성을 파악하기 위한 연구들은 미진한 상태이다.

이에 본 논문에서는 토석류 발생 전후 비교적 근시기의 고해상도 LiDAR DEM을 이용하여 지형변화를 관측하는 연구 방법에 대하여 기술하였다. 이러한 방법을 토대로 2011년 7월 발생한 우면산 토석류 재해를 대상으로 하여 토석류의 퇴적이 발생하는 유하부의 지형특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 토석류에 대한 방재 측면에서 고려하면 토석류로 인해 발생하는 침식에 대한 예측은 토석류의 발생규모를 산정하여 피해 범위에 대한 예측할 수 있게 하며, 토석류로 인해 발생하는 퇴적에 대한 예측은 피해 저감을 위한 사방시설이나 배수 구조물의 설치, 사회간접시설이나 농경지, 문화재 보호 대책 등과 관련이 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 실험 결과를 토대로 방재대책 수립을 위한 토석류 유하부 지형 특성에 따른 토석류 퇴적 분석 결과에 대한 결론을 도출하였다.

2. 토석류 퇴적 지형 특성 분석 방법

본 연구에서는 다음과 같은 순서로 토석류 유하부의 퇴적 지점에 대한 지형 특성을 실험자료를 구축하였다. 먼저 항공 LiDAR 자료는 point cloud 데이터로 취득되므로 해당 자료로부터 TIN을 구성한 후 래스터 타입의 DEM으로 변환하여 실험을 수행하였다. 다음으로 변환된 DEM을 이용하여 경사 DEM 및 토석류 발생 전후의 차분 DEM을 생성하였다. 또한 변환된 DEM을 이용하여 흐름 방향(flow direction) 및 흐름 누적값(flow accumulation)을 추출하여 실험을 위한 수리학적 유역을 추출하였다. 마지막으로 토석류 발생 전후의 차분 DEM과 흐름 누적값을 기반으로 토석류 유하부의 지형 특성 파악을 위해 수리학적 유역 내에서의 토석류 이동 경로를 토석류의 발생예상지점으로부터 유역출구까지 추출하였다.

본 연구에서 적용한 토석류의 퇴적 지점에 대한 지형 특성을 분석하기 위한 방법은 다음과 같다. 추출된 유하부 라인을 일정간격으로 구분하여 각각의 지점별 경사, 전환각도, 발생부로부터의 이동수평거리(L)에 대한 발생부와 지점 간의 고저차(H)의 비율(L/H) 세 가지의 지형특성을 분석하는 방법을 적용하였다. Fig. 1은 본 연구에 적용된 지형 특성 분석 연구 흐름이다.

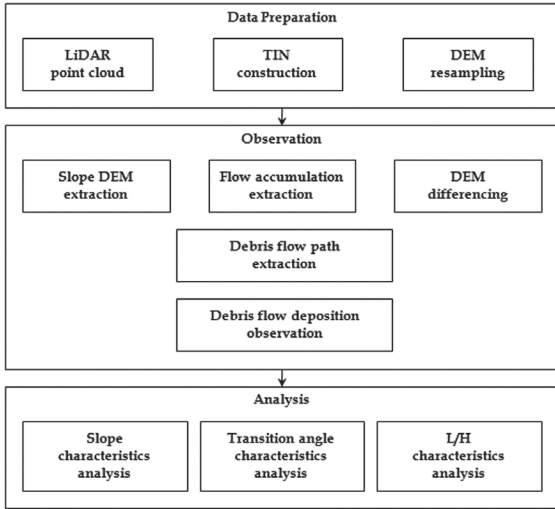


Fig 1. Topographic characteristics analysis flow

경사 특성의 경우 추출된 유하부들의 유로평균경사를 활용하였다. 유로평균경사는 각각의 지점별 유하부 방향으로의 경사를 산정하여 분석에 활용하였다. 전환각도는 토석류의 이동방향이 수평방향으로 전환되는 각도로 정의하였다. Fig 2는 토석류 이동방향의 전환이 이루어지는 모식도이다. Fig 2와 같이 토석류가 A로부터 B로 진행한다고 가정하면 전환각도는 이전 측점(P_{n-1}), 해당 측점(P_n) 및 다음 측점(P_{n+1}) 간의 기하관계를 이용하여 Eq. (1)과 같이 cosine 제2법칙에 의해 산정할 수 있다. 발생부로부터의 이동수평거리(L)에 대한 발생부와 지점 간의 표고차(H)의 비율(L/H)은 토석류의 퇴적이 이루어지는 에너지의 전환과 관련된 토석류의 순효율 계수이다(Choi and Paik, 2012). 토석류의 퇴적은 토석류가 가지고 있는 모든 에너지가 소진되었을 때 발생한다고 가정할 수 있으며, 이는 토석류를 유발한 초기 산사태 및 사면파괴로부터 발생한 위치에너지가 운동에너지로 전환되어 유하부를 따라 이동하며 유하부 내의 마찰로 인해 점차 소실되어 퇴적이 발생한다고 할 수 있다.

angle of transition

$$= 180^\circ - \cos^{-1} \left(\frac{S_{n,n-1}^2 + S_{n,n+1}^2 - S_{n-1,n+1}^2}{2 \times S_{n,n-1} \times S_{n,n+1}} \right) \quad (1)$$

Eq. (1)에서 $S_{n,n-1}$ 은 P_{n-1} 과 P_n 사이의 유클리드 거리 (euclidean distance)를 의미하며, $S_{n,n+1}$, $S_{n-1,n+1}$ 은 각각 P_n 과 P_{n+1} , P_{n-1} 과 P_{n+1} 의 거리를 의미한다.

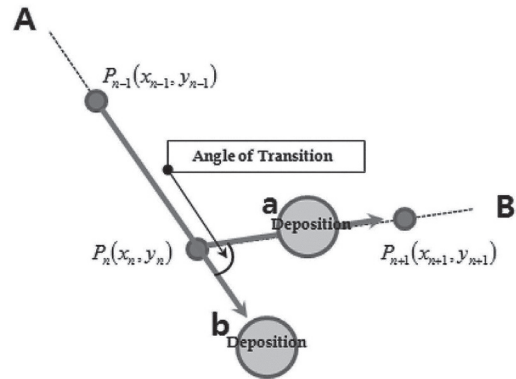


Fig 2. Transition of debris flow direction

토석류의 퇴적은 크게 유하부 내부의 퇴적과 유하부 외부의 퇴적으로 구분할 수 있다. 유하부 내부의 퇴적은 토석류가 이동하는 과정에서 유로 내에 퇴적이 발생하는 것을 의미하며, 유하부 외부의 퇴적은 진행방향 변화에 따른 관성작용으로 유로 내부가 아닌 유로의 외부로 토사가 진행하여 유하부를 벗어난 위치에 퇴적이 발생하는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서도 토석류의 퇴적을 유하부 내의 퇴적과 유하부 외의 퇴적으로 구분하여 지형 특성 분석을 수행하였다. Fig 2와 같이 토석류가 A로부터 B로 진행할 때, a지역에 퇴적이 발생하였을 경우 유하부 내의 퇴적으로 정의하였으며, b지역에 퇴적이 발생하였을 경우 유하부 외의 퇴적으로 정의하였다. 그 외의 경우에 대해서는 퇴적이 발생하지 않은 것으로 정의하였으며, 유하부 외부로의 퇴적이 발생하게 되는 지점에 대한 분석은 발생부로부터 유하부 내부에서 퇴적으로 전환되는 지점에 대해서만 분석을 수행하였다.

본 연구에서는 우면산 토석류의 퇴적 지형 특성을 파악하기 위하여 토석류 발생 전후의 항공 LiDAR로부터 취득된 DEM을 사용하였다. 연구에 사용된 토석류 발생 전의 항공 LiDAR 자료는 ALS60 장비를 사용하여 2009년 8월에 취득되었으며, 토석류 발생 후의 항공 LiDAR 자료는 마찬가지로 ALS60 장비를 사용하여 토석류 재해 발생 직후인 2011년 8월

초에 취득되었다. 두 데이터는 2년의 시간차가 존재하였으나 계절적 차이는 크게 존재하지 않았다. LiDAR point cloud 자료의 점밀도는 2009년과 2011년 자료 각각 7.6pts/m², 3.2pts/m²였으며, 두 자료 모두 1m 해상도의 DEM으로 변환하여 실험에 사용하였다.

3. 우면산 토석류 개요 및 실험 대상 구역

우면산은 서울 도심지의 한가운데 위치하고 있는 산으로 시민들의 건강과 편의를 위하여 다수의 산책로 및 약수터가 개발되어 있고 군부대 시설 또한 존재하는 등 인위적 개발이 일정부분 포함된 전형적인 도심지의 산지 특성을 가지고 있다. 우면산의 정상은 300m 내외이며, 50~80m 높이의 도심으로 둘러싸여 있다. 우면산의 수목은 30~40년 사이의 수목이 분포하고 있으며, 20~30cm의 흉고직경의 수목이 분포하고 있다. 우면산의 기반암은 전체적으로 호상흑운모편마암으로 구성되어 있으며, 형촌마을 인근의 일부 지역의 경우 화강암질 편마암으로 구성되어 있다. 2011년 7월 27일 오전 8시 전후로 집중강우로 우면산 전역에서 다수의 산사태 및 토석류로 인해 큰 피해가 발생하였다. 우면산 인근에 위치한 남현기상관측소의 경우 일강우량 281mm/day, 시간강우량 86.5mm/h였으

며, 서초기상관측소의 경우 일강우량 359mm/day, 시간강우량 62.5mm/h였다. 이는 서울의 강우빈도를 기준으로 각각 7년~60년 빈도의 강우로서 장마로 인한 선행강우가 이미 다수 존재하던 매우 극한 강우 상태였다(Yune *et al.*, 2013). 현장조사를 기반으로 살펴보면 우면산 전역에서 총 135개의 사면파괴 및 40개의 토석류가 발생한 것으로 조사되었다. 이로 인한 피해가 30가구의 매몰, 116가구의 침수 및 16명의 사망자가 발생한 매우 큰 토석류 재해였다.

우면산 토석류 발생으로 인해 차분 DEM의 결과로부터 관측되는 지형의 변화는 우면산의 대부분 구역에서 유하부 내의 침식과정을 거치며 유역출구로 토사가 유출되었다. 본 연구에서는 토석류의 이동 과정 중 유로 내에 비교적 많은 양의 퇴적이 발생한 형촌마을과 송동마을 두 개의 유역에 대하여 퇴적 지점의 지형 특성 분석 실험을 수행하였다. Fig 3은 실험 대상 유역인 형촌마을과 송동마을 유역의 형상(Fig 3(a)) 및 1m 해상도의 DEM(Fig 3(b)), 실험 대상 유역의 토양 특성 중 유효토심(Fig 3(c)), 실험 대상 유역의 차분 DEM 결과(Fig 3(d))이다.

형촌마을 유역은 우면산 정상 부근으로부터 형촌마을 방향으로 유역출구가 형성된 유역으로 Fig 3(a)와 같이 10개의 주요한 토석류가 발생하였다. 형촌마을 유역의 경우 10개의

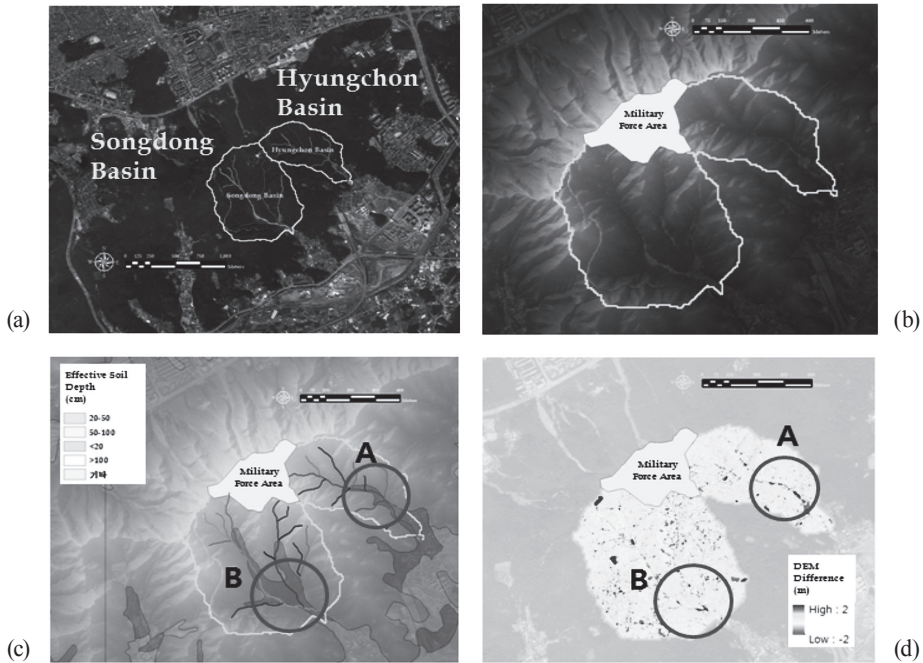


Fig 3. Overview of study area and data set (a) Aerial photograph, boundaries of basin and paths of debris flows (b) 1m resolution DEM derived from airborne LiDAR data (c) Digital soil map about effective soil depth (d) DEM difference result between before and after debris flow event. Songdong basin and Hyungchon basin are located at left and right polygon in the (a), respectively

토석류가 하나로 합류되어 유역출구방향으로 유출되는 특징이 있어 가장 길이가 긴 유하부를 주요 유하부로 정하여 나머지 토석류는 주요 유하부에 합류되는 것으로 분석을 수행하였다. 10곳의 토석류를 유발한 발생부는 110m~250m의 높이에 존재하였으며, 유역출구에서의 높이는 55m 내외였다. 각각의 유하부의 길이는 96m~993m였다. 형촌마을 유역의 유역면적은 326,413m²이며, 유역평균경사는 25°였다. 송동마을 유역은 우면산 정상 부근으로부터 송동마을 방향으로 유역출구가 형성된 유역으로 Fig 3(a)와 같이 11개의 주요한 토석류가 발생하였다. 송동마을 유역도 형촌마을과 유사하게 11개의 토석류가 하나로 합류되어 유역출구방향으로 유출되는 특징이 있었으므로 가장 길이가 긴 유하부를 주요 유하부로 정하여 나머지 토석류가 주요 유하부에 합류되는 것으로 분석을 수행하였다. 하지만 송동마을 유역의 경우 형촌마을 유역과는 다르게 주요 유하부에 3개의 각각 큰 토석류가 유역출구 부근에서 합류되는 특징이 있었으며, 이 위치에서 가장 큰 퇴적이 발생하였다. 송동마을 유역의 11곳의 토석류를 유발한 발생부는 130~250m의 높이에 존재하였으며, 유역출구의 높이는 형촌마을 유역출구와 유사한 55m 내외였다. 각각의 유하부의 길이는 83m~1005m였다. 송동마을 유역의 유역면적은 691,325m²이며, 유역평균경사는 22°였다. 우면산의 토양은 Fig 3(c)에서 볼 수 있는 것과 같이 대부분이 유효토심 50~100cm로 구성되어 있다. 실험대상으로 선정한 송동마을 유역과 형촌마을 유역의 경우 토석류를 유발한 산사태 및 사면파괴 발생부는 Fig 3(c)와 같이 우면산의 다른 유역들과 마찬가지로 유효토심 50~100cm인 지역에 위치하고 있으나 토석류의 유하부에서 유효토심이 20~50cm로 변화되었다. Fig 3(c)와 Fig 3(d)에 표시된 A, B 지역의 경우 해당 유역에서 토석류가 침식에서 퇴적으로 전환되어 퇴적이 발생한 지역으로 해당 지역의 유효토심은 20~50cm이다.

4. 토석류 퇴적 지점의 지형 특성 분석 결과

본 연구에서는 앞서 기술한 실험방법을 적용하여 송동마을 유역과 형촌마을 유역을 대상으로 차분 DEM으로부터 토석류의 유하부를 추출하였으며, 각각의 토석류의 유하부를 대상으로 퇴적이 발생하는 지역의 지형특성을 분석하였다. 각각의 유하부는 20m 간격으로 지점을 생성하여 분석을 수행하였다. 유하부 외부의 퇴적 지점의 지형 특성은 각각의 유하부에 대하여 토석류를 유발한 발생부로부터 유하부의 침식 과정을 거쳐 유하부 내부의 퇴적으로 전환된 지점까지만을 실험대상으로 분석하였다. 유로경사 및 전환각도는 각각 10°미만, 10°이상~15°미만, 15°이상~20°미만, 20°이상~25°미만, 25°이상~30°미만, 30°이상의 6단계로 구분하여 분석하였다. 발생부로부터의 수평이동거리(L)에 대한 표고차(H)의 비율(L/H)은 1.5미만, 1.5이상~2.0미만, 2.0이상~2.5미만, 2.5이상~3미만, 3이상의 5단계로 구분하여 분석하였다.

4.1 형촌마을 유역 퇴적 지점의 지형 특성

형촌마을 10개의 유하부를 유하부 내부의 퇴적이 발생하기 지점까지 각각 20m 간격의 지점으로 구분한 결과 총 97개의 지점이 생성되었다. 총 97개의 지점 중 유하부 외부로의 퇴적이 발생한 지점은 23개였으며, 퇴적이 발생하지 않은 지점은 74개로 유하부 외에서 퇴적이 발생한 비율은 23.7%였다. 형촌마을 유역 10개 유하부의 지점별 유로경사는 3°~34°의 범위였으며, 평균유로경사는 18°였다. 퇴적이 발생한 지점과 발생하지 않은 지점으로 구분하여 살펴보면 퇴적이 발생하지 않은 지점의 유로경사의 최대값은 34°, 최소값은 3°였으며 평균유로경사는 19°였다. 퇴적이 발생한 지점의 유로경사의 최대값은 26°, 최소값은 6°였으며 평균유로경사는 16°였다. Table 1은 형촌마을 유역의 유로경사 특성에 따른 퇴적 발생 결과이다. Table 1에서 보면 지점별 경사특성에 따른 유하부 외의 퇴적발생비율

Table 1. Deposition distribution based on slope in Hyungchon basin

Slope	non-deposition		deposition		deposition ratio (c/a+c)	accumulated deposition ratio (d/b+d)
	count (a)	accumulated count (b)	count (c)	accumulated count (d)		
Over 30°	5	5	0	0	0%	0%
25°~30°	8	13	1	1	11.1%	7.1%
20°~25°	19	32	7	8	26.9%	20.0%
15°~20°	18	50	5	13	21.7%	20.6%
10°~15°	19	69	7	20	26.9%	22.5%
Under 10°	5	74	3	23	37.5%	23.7%
Total	74		23			

이 30°이상인 지점에서는 퇴적이 발생하지 않았으며, 각각의 구간별로 11.1%~37.0%의 범위를 나타내었다. 누적 구간에 대한 퇴적 발생비율을 보면 25°이상 구간은 10%미만의 비율을 나타내었으나 나머지 누적 구간에 대해서는 20.0%~23.7%의 범위 내에서 구간별로 유사한 수준의 발생 비율이었다.

형촌마을 유역 10개 유하부의 지점별 전환각도는 0°~44°의 범위였으며, 평균전환각도는 12°였다. 퇴적이 발생한 지점과 발생하지 않은 지점으로 구분하여 살펴보면 퇴적이 발생하지 않은 지점의 전환각도는 0°~37°의 범위로 평균전환각도는 9°였다. 퇴적이 발생한 지점의 전환각도는 11°~44°의 범위로 평균전환각도는 23°였다. Table 2는 형촌마을 유역의 전환각도 특성에 따른 퇴적 발생 결과이다. Table 2에서 보면 지점별 전환각도 특성에 따른 유하부 외의 퇴적발생비율은 25°~30°사이의 구간에서 85.7%로 가장 크게 나타났으며, 10°미만의 전환각도에서는 퇴적이 발생하지 않았다. 누적 퇴적 발생 비율을 보면 전환각도가 15°이상인 경우 65.4%의 발생비율이 있었으며, 15°미만의 전환각도에서 토석류의 유하부 외 퇴적이 발생할 비율은 50%미만이었다.

형촌마을 유역 10개 유하부의 지점별 L/H는 1.51~3.48의 범위이고 평균 L/H는 2.42였으며, 이는 퇴적이 발생하지 않은 지점의 최대, 최소, 평균 L/H와 같았다. 퇴적이 발생한 지점의 L/H는 1.74~3.14였으며, 평균 L/H는 2.43이었다. Table 3은 형

촌마을 유역의 L/H 특성에 따른 퇴적 발생 결과이다. Table 3에서 보면 L/H의 비율이 1.5미만 지점은 존재하지 않았다. 퇴적 발생 비율이 가장 큰 구간은 2.5~3.0 사이로 31.4%였고, 3이상의 구간에서는 발생비율이 9.1%로 매우 적었다. 누적 구간의 퇴적 발생 비율을 보면 3이상의 구간에서는 9.1%였으며, 나머지구간에서는 23.7%~26.1%로 L/H의 값이 커짐에 따라 점차 증가하는 양상을 보였다.

4.2 송동마을 유역 퇴적 지점의 지형 특성

송동마을 11개의 유하부를 유하부 내부의 퇴적이 발생하기 지점까지 각각 20m 간격의 지점으로 구분한 결과 총 180개의 지점이 생성되었다. 총 180개의 지점 중 유하부 외부로의 퇴적이 발생한 지점은 22개였으며, 퇴적이 발생하지 않은 지점은 158개로 유하부 외부에서 퇴적이 발생한 비율은 12.2%였다. 송동마을 유역 11개 유하부의 지점별 유로경사는 2°~35°의 범위였으며, 평균유로경사는 15°였다. 퇴적이 발생한 지점과 발생하지 않은 지점으로 구분하여 살펴보면 퇴적이 발생하지 않은 지점의 유로경사의 최대값은 35°, 최소값은 2°였으며 평균유로경사는 15°였다. 퇴적이 발생한 지점의 유로경사의 최대값은 32°, 최소값은 4°였으며 평균유로경사는 15°였다. Table 4는 송동마을 유역의 유로경사 특성에 따른 퇴적 발생 결과이다. Table 4에서 보면 지점별 경사특성에 따른 유하부 외의 퇴

Table 2. Deposition distribution based on angle of transition in Hyungchon basin

angle of transition	non-deposition		deposition		deposition ratio (c/a+c)	accumulated deposition ratio (d/b+d)
	count (a)	accumulated count (b)	count (c)	accumulated count (d)		
Over 30°	2	2	4	4	66.7%	66.7%
25°~30°	1	3	6	10	85.7%	76.9%
20°~25°	2	5	2	12	50.0%	70.6%
15°~20°	4	9	5	17	55.6%	65.4%
10°~15°	17	26	6	23	26.1%	46.9%
Under 10°	48	74	0	23	0.0%	23.7%
Total	74		23			

Table 3. Deposition distribution based on L/H in Hyungchon basin

L/H	non-deposition		deposition		deposition ratio (c/a+c)	accumulated deposition ratio (d/b+d)
	count (a)	accumulated count (b)	count (c)	accumulated count (d)		
Over 3.0	10	10	1	1	9.1%	9.1%
2.5~3.0	24	34	11	12	31.4%	26.1%
2.0~2.5	23	57	6	18	20.7%	24.0%
1.5~2.0	17	74	5	23	22.7%	23.7%
Under 1.5	0	74	0	23	0.0%	23.7%
Total	74		23			

Table 4. Deposition distribution based on slope in Songdong basin

Slope	non-deposition		deposition		deposition ratio (c/a+c)	accumulated deposition ratio (d/b+d)
	count (a)	accumulated count (b)	count (c)	accumulated count (d)		
Over 30°	6	6	1	1	14.3%	14.3%
25°~30°	13	19	1	2	7.1%	9.5%
20°~25°	20	39	3	5	13.0%	11.4%
15°~20°	31	70	5	10	13.9%	12.5%
10°~15°	42	112	5	15	10.6%	11.8%
Under 10°	46	158	7	22	13.2%	12.2%
Total	158		22			

Table 5. Deposition distribution based on angle of transition in Songdong basin

angle of transition	non-deposition		deposition		deposition ratio (c/a+c)	accumulated deposition ratio (d/b+d)
	count (a)	accumulated count (b)	count (c)	accumulated count (d)		
Over 30°	3	3	6	6	66.7%	66.7%
25°~30°	4	7	2	8	33.3%	53.3%
20°~25°	8	15	3	11	27.3%	42.3%
15°~20°	13	28	3	14	18.8%	33.3%
10°~15°	33	61	7	21	17.5%	25.6%
Under 10°	97	158	1	22	1.0%	12.2%
Total	158		22			

Table 6. Deposition distribution based on L/H in Songdong basin

L/H	non-deposition		deposition		deposition ratio (c/a+c)	accumulated deposition ratio (d/b+d)
	count (a)	accumulated count (b)	count (c)	accumulated count (d)		
Over 3.0	67	67	9	9	11.8%	11.8%
2.5~3.0	37	104	7	16	15.9%	13.3%
2.0~2.5	34	138	2	18	5.6%	11.5%
1.5~2.0	20	158	4	22	16.7%	12.2%
Under 1.5	0	158	0	22	0.0%	12.2%
Total	158		22			

적발생비율은 각각의 구간별로 7.1%~14.3%의 범위를 나타내었다. 누적 구간에 대한 퇴적 발생비율 또한 9.5%~14.3%의 범위에서 구간별로 유사한 수준으로 나타났다.

송동마을 11개 유하부의 지점별 전환각도는 0°~50°의 범위였으며, 평균전환각도는 11°였다. 퇴적이 발생한 지점과 발생하지 않은 지점으로 구분하여 살펴보면 퇴적이 발생하지 않은 지점의 전환각도는 0°~38°의 범위로 평균전환각도는 11°였다. 퇴적이 발생한 지점의 전환각도는 7°~50°의 범위로 평균전환각도는 23°였다. Table 5는 송동마을 유역의 전환각도 특성에 따른 퇴적 발생 결과이다. Table 5에서 보면 지점별 전환각도 특성에 따른 유하부 외부의 퇴적발생비율은 30°이상의 구간에서 66.7%로 가장 크게 나타났으며, 10°미만의 전환각도

에서는 1%의 비율을 나타내었다. 누적 퇴적 발생 비율을 보면 전환각도가 25°이상인 경우 53.3%의 발생비율이 있었으며, 50%미만의 퇴적 비율을 나타내는 구간은 전환각도가 25°미만인 구간이었다.

송동마을 11개 유하부의 지점별 L/H는 1.63~5.69의 범위이고 평균 L/H는 2.93이었다. 유하부 외부의 퇴적이 발생하지 않은 지점의 L/H는 1.63~5.69의 범위에서 평균 2.95였다. 유하부 외부의 퇴적이 발생한 지점의 L/H는 1.80~4.31의 범위에서 평균 2.85였다. Table 6은 송동마을 유역의 L/H 특성에 따른 퇴적 발생 결과이다. Table 6에서 보면 L/H의 비율이 1.5미만 지점은 존재하지 않았다. 퇴적 발생 비율이 가장 큰 구간은 1.5~2.0 사이로 16.7%였고, 2.0~2.5 구간이 5.6%로 가

장 적은 발생비율을 보였다. 누적 구간의 퇴적 발생 비율을 보면 전 구간에서 퇴적 발생 비율이 11.5%~13.3%로 구간별로 유사한 수준이었다.

4.3 결과 분석

Figs 4 and 5는 각각 형촌마을유역과 송동마을유역에서의 지점별 퇴적 발생에 대한 분포도이다. 실험대상유역에 대하여 경사, 토석류 이동방향의 전환각도, 발생부로부터의 이동거리에 대한 높이차의 비율(L/H)에 대한 지형특성을 분석한 결과 유하부 외부로의 퇴적이 발생한 지점과 퇴적이 발생하지 않은 지점에서 유로방향으로의 경사와 각 분석지점에서의 L/H에 대해서는 모든 구간에서 비슷한 정도의 비율을 나타내었다. 토석류 이동방향의 전환각도에 대해서는 송동마을유역의 1개의 지점을 제외하고 두 개의 실험대상유역 모두 10°이상의 전환각도에서 토석류의 퇴적이 발생되었으며, 전환각도에 따른 퇴적 발생 비율을 살펴보면 형촌마을유역의 경우 15°이상

의 구간에서 50%이상의 비율을 나타내었고, 송동마을유역의 경우 25°이상의 구간에서 50%이상의 비율을 나타내었다.

유하부 외부로의 퇴적이 그 지점에서 토석류가 유하부의 진행방향이 아닌 원래의 진행방향에 따른 관성에 의해 발생한다고 가정할 때, 형촌마을유역에서 송동마을유역에 비해 비교적 전환각도가 작은 지점에서 많은 퇴적이 발생한 것은 토석류의 이동에 있어 형촌마을유역에서 발생한 토석류의 에너지가 송동마을유역에서 발생한 토석류보다 지점별로 관성 에너지를 많이 갖고 있었다고 분석할 수 있다. 앞서 chapter 2에서 언급한 바와 같이 토석류는 초기 위치에너지가 운동에너지로 변환되어 이동하므로, 이동 중 각 지점에서의 운동에너지의 크기는 L/H를 이용하여 표현할 수 있다. L/H를 토석류의 퇴적이 이루어지는 에너지의 전환과 관련 있는 토석류의 순효율 계수로 정의할 때, 각 지점에서의 L/H가 클수록 높이차이에 비하여 더 먼 거리를 이동하였으므로 마찰 등으로 인해 보다 많은 에너지가 소진되어 토석류가 잠재하고 있는

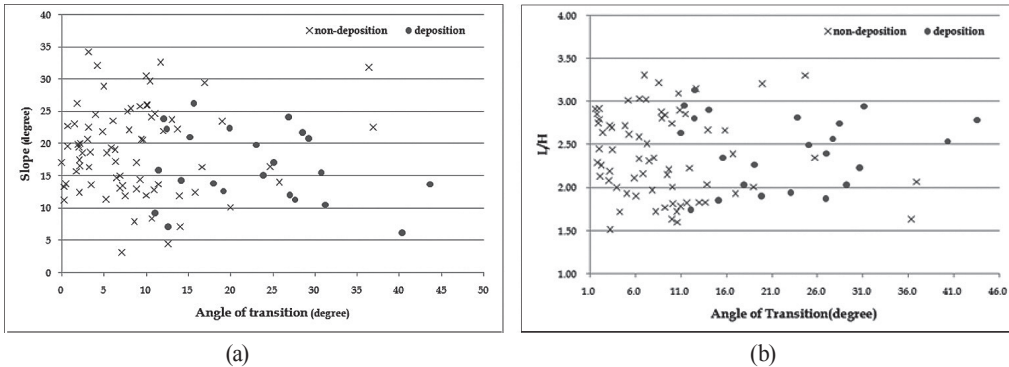


Fig 4. Deposition scattergram of Hyungchon basin (a) X-axis is an angle of transition in degree, and y-axis is a slope in degree (b) X-axis is the angle of transition in degree, and y-axis is the L/H

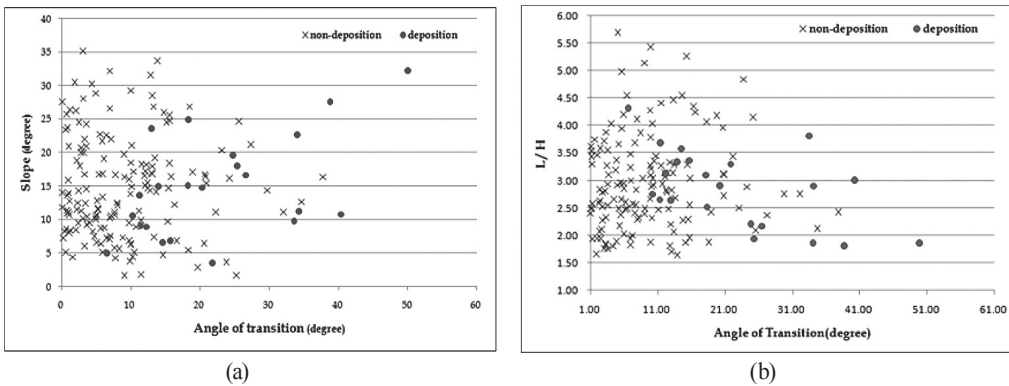


Fig 5. Deposition scattergram of Songdong basin (a) X-axis is an angle of transition in degree, and y-axis is a slope in degree (b) X-axis is the angle of transition in degree, and y-axis is the L/H

너지의 크기가 작다고 할 수 있다. Fig 6은 송동마을유역과 형촌마을유역의 L/H 변화를 보여준다. 형촌마을유역의 경우 10개 유하부의 97개 지점의 평균 L/H는 2.42였으며, 송동마을유역의 경우 11개 유하부의 180개 지점의 평균 L/H는 2.93이었다. 또한 형촌마을유역의 경우 유하부 내부의 퇴적이 발생하게 되는 지점에서의 L/H가 3내외였으며, 송동마을유역의 경우 유하부 내부의 퇴적이 발생하게 되는 지점에서의 L/H는 4내외였다. 이러한 결과는 송동마을유역에서 유하부 내부의

퇴적이 발생하기 까지 유역 내에서 발생한 토석류의 잠재된 에너지 크기가 형촌마을유역보다 적은 상태로 진행되었음을 의미하며, 따라서 이러한 이유로 퇴적을 발생시키는 이동방향의 전환각도가 형촌마을유역에 비해 더 컸음을 알 수 있다. 또한 Fig 6에서 보듯이 발생부로부터 40m이내의 지점에서의 송동마을유역의 평균적인 L/H 추세가 형촌마을유역에 비하여 더 큰 것을 확인할 수 있다. 이를 종합하면 초기 토석류 발생시에는 송동마을유역이 형촌마을유역에 비하여 더 큰 에너지로 발생하였으나 발생부 인근에서 많은 양의 에너지가 소모되어 적은 운동에너지 상태로 이동되었음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 분석된 실험결과를 토대로 L/H를 잠재되어 있는 토석류의 에너지로 정의하고 전환각도를 토석류 이동방향의 전환에 따른 유하부 외부로의 퇴적이 발생하게 되는 에너지의 크기로 정의하였다. 유하부 외부로의 퇴적은 이러한 정의를 기초로 하여 잠재된 에너지의 크기와 전환되는 에너지의 크기의 비율로 표현할 수 있다. 유하부 외부로의 퇴적이 발생하게 되는 전환각도에 대한 L/H의 비율계수를 10이상, 8~10, 6~8, 4~6, 2~4, 2미만으로 구분하여 살펴보면 형촌마을유역에서는 각 지점에서의 전환각도가 L/H에 비해 6배 이상인 구간에서 50%이상의 퇴적발생비율을 나타내었으며, 송동마을유역에서는 10배 이상인 구간에서 50%이상의 퇴적발생비율을 나타내었다. Tables 7 and 8은 각각 형촌마을유역

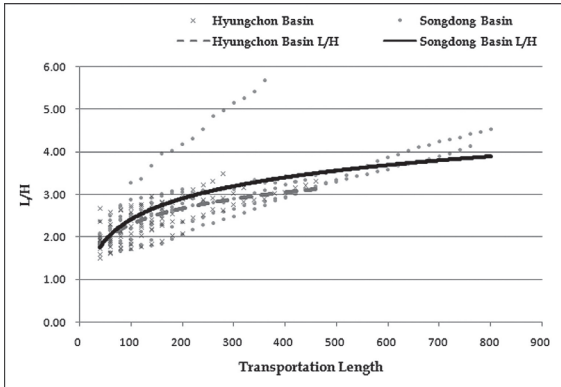


Fig 6. L/H variation according to transportation length. A solid line is the L/H variation of Songdong basin, and a dotted line is the L/H variation of Hyungchon basin

Table 7. Deposition distribution based on ratio of transition angle and L/H in Hyungchon basin

angle of transition / (L/H)	non-deposition		deposition		deposition ratio (c/a+c)	accumulated deposition ratio (d/b+d)
	count (a)	accumulated count (b)	count (c)	accumulated count (d)		
Over 10	3	3	12	12	80.0%	80.0%
8~10	2	5	4	16	66.7%	76.2%
6~8	11	16	2	18	15.4%	52.9%
4~6	11	27	4	22	26.7%	44.9%
2~4	24	51	1	23	4.0%	31.1%
Under 2	23	74	0	23	0.0%	23.7%
Total	74		23			

Table 8. Deposition distribution based on ratio of transition angle and L/H in Songdong basin

angle of transition / (L/H)	non-deposition		deposition		deposition ratio (c/a+c)	accumulated deposition ratio (d/b+d)
	count (a)	accumulated count (b)	count (c)	accumulated count (d)		
Over 10	6	6	8	8	57.1%	57.1%
8~10	6	12	1	9	14.3%	42.9%
6~8	12	24	3	12	20.0%	33.3%
4~6	17	41	6	18	26.1%	30.5%
2~4	54	95	3	21	5.3%	18.1%
Under 2	63	158	1	22	1.6%	12.2%
Total	158		22			

과 송동마을유역의 전환각도에 대한 L/H의 비율계수를 이용한 퇴적 발생 결과이다.

두 개의 실험대상유역을 종합하면 277개의 지점 중 45개 지점에서 유하부 외부로의 퇴적이 관측되었다. 전환각도가 20° 이상인 구간에서 50%이상의 비율을 갖는 것으로 분석되었으며, 실험대상유역 내에서 전환각도가 10°미만인 구간에서는 총 146개 지점 중 1개 지점에서만 퇴적이 발생하여 퇴적발생비율은 0.7%로 퇴적이 거의 발생하지 않는 것으로 분석되었다. 전환각도에 대한 L/H의 비율계수를 살펴보면 전환각도가 L/H에 비해 4배 미만인 구간에서는 각각 4.9%, 1.1%의 퇴적발생비율을 나타내었다. 전체적으로 8배 이상의 계수구간에서 유하부 외부로의 퇴적발생비율은 59.5% 이상이었으며, 8미만의 계수구간에서는 50%미만의 퇴적발생비율임을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 토석류 발생 전후 비교적 근시기의 고해상도 LiDAR DEM을 이용하여 지형변화를 관측하는 GIS기반의 분석기법을 활용하여 토석류의 이동 중 유로방향경사, 유하부의 이동 전환각도, 발생부로부터 해당 지점까지의 이동 거리에 대한 표고차의 비율계수(L/H) 세 가지의 유하부 지형 특성에 따른 유하부 외부로의 퇴적 특성을 분석하였다. 2011년 서울에서 발생하였던 우면산 토석류 재해 유역 중 형촌마을유역과 송동마을유역을 대상으로 제안된 방법을 적용하여 실험한 결과 토석류 발생 전후의 고해상도 LiDAR DEM에는 침식과 퇴적의 관측이 직관적으로 표현되므로 지형변화의 관측 및 지형적 특성추출이 용이한 것을 확인할 수 있으며, 이러한 특징을 토대로 토석류의 이동 중 발생한 유하부 내외의 지형변화결과를 이용하여 지형적 특성에 따른 토석류의 퇴적 분석이 가능하였다. 본 연구의 결과는 토석류 발생 위험지에 대한 방재대책 수립에 활용될 수 있을 것으로 사료되며, 이와 같이 고해상도의 LiDAR DEM을 활용한 연구는 정교한 정량적 분석결과들을 바탕으로 토석류 거동의 수치적 시뮬레이션 기법 수립 및 검증에 활용할 수 있을 것이다. 특히 RWM(Random Walk Model)과 같이 다양한 지형적 특성에 따른 매개변수들을 필요로 하는 시뮬레이션 연구들의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-

2013R1A1A2013060)

References

- Bremer, M. and Saas, O. (2012), Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow events, *Geomorphology*, Vol. 138, pp. 49-60.
- Bull, J.M., Miller, H., Gravley, D.M., Costello, D., Hikuroa, D.C.H., and Dix, J.K. (2010), Assessing debris flows using LiDAR differencing: 18 May 2005 Matata event, New Zealand, *Geomorphology*, Vol. 124, No. 1-2, pp. 75-84.
- Chandler J. (1999), Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 24, No. 1, pp. 51-63.
- Choi, D.Y. and Paik, J.C. (2012), Characteristics of runout distance of debris flows in Korea, *Journal of the KSCE*, Vol. 32, No. 3B, pp. 193-201. (in Korean with English abstract)
- Clark, M.L., Clark, D.B., and Roberts, D.A. (2004) Small-footprint LiDAR estimation of sub-canopy elevation and tree height in a tropical rain forest landscape, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 91, No. 1, pp. 68-89.
- Conoscenti, C., Maggio, C.D., and Rotigliano, E. (2008), GIS analysis to assess landslide susceptibility in a fluvial basin of NW Sicily (Italy), *Geomorphology*, Vol. 94, No. 3-4, pp. 325-339.
- Du, J.C. and Teng, H.C. (2007), 3D laser scanning and GPS technology for landslide earthwork volume estimation, *Automation in Construction*, Vol. 16, No. 5, pp. 657-663.
- Hooper, D.M., Bursik, M.I., and Webb, F.H. (2003), Application of high-resolution, interferometric DEMs to geomorphic studies of fault scarps, Fish Lake Valley, Nevada-California, USA, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84, No. 2, pp. 255-267.
- Jaboyedoff, M, Oppikofer, T., Abellan, A., Derron, M.H., Loye, A., Metzger, R., and Pedrazzini, A. (2012), Use of LiDAR in landslide investigations: a review, *Natural Hazard*, Vol. 61, No. 1, pp. 5-28.
- Kim, G.H., Kim, H.S., and Jeong, S. (2012), Debris flow

- assessment in Umyeon Mountain using LiDAR DEM, *2012 Conference on Geo-Spatial Information*, The Korean Society for GeoSpatial Information System, 12 October, Seoul, Korea, pp. 133-134. (in Korean)
- Ko, S.M., Lee, S.W., Yune, C.Y., and Kim, G.H. (2013), GIS-based analysis of debris-flow characteristics in Gangwondo, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 1, pp. 57-67. (in Korean with English abstract)
- Miles, S.B. and Ho, C.L. (1999), Rigorous landslide hazard zonation using newmark's method and stochastic ground motion simulation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 18, No. 4, pp. 305-323.
- Nandi, A. and Shakoor, A. (2009), A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses, *Engineering Geology*, Vol. 110, No. 1-2, pp. 11-20.
- Ohlmacher, G.C. and Davis, J.C. (2003), Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA, *Engineering Geology*, Vol. 69, No. 3-4, pp. 331-343.
- Tsutsui, K., Rokugawa, S., Nakagawa, H., Miyazaki, S., Cheng, C.T., Shiraishi, T., and Yang S.D. (2007), Detection and volume estimation of large-scale landslides based on elevation-change analysis using DEMs extracted from high-resolution satellite stereo imagery, *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 45, No. 6, pp. 1681-1696.
- Woo, C.S., Youn, H.J., Lee, C.W., and Lee, K.S. (2011), Development of the topography restoration method for debris flow area using airborne LiDAR data, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 14, No. 3, pp. 174-187. (in Korean with English abstract)
- Yune, C.Y., Chae, Y.K., Paik, J., Kim, G., and Lee, S.W. (2013), Debris Flow in Metropolitan Area - 2011 Seoul Debris Flow, *Journal of Mountain Science*, Vol. 10, No. 2, pp. 199-206

(Received 2013. 11. 18, Revised 2013. 12. 11, Accepted 2013. 12. 30)