

인제군 산사태 지역의 토석류 거동 예측기법 적용

The Estimation of Debris Flow Behaviors in Injae Landslide Area

김기홍¹⁾ · 황제선²⁾

Kim Gi Hong · Hwang Jae Seon

Abstract

A debris flow is caused by torrential rain in mountainous regions and carries mixture of fragmental matter from slope failure, deposit soils from a valley floor and a large amount of water. It seriously damages facilities, houses, and human lives in its path. We tried to apply debris flow behavior estimation model developed in foreign country to domestic case. The study area is Inje-county, Gangwon-do and aerial photos and GPS surveying were used to collect information of starting and end point of the landslide and debris flow. The analysis showed that L/H for forecasting the travel distances of debris flows has the mean of 4.93 and standard deviation of 0.98. This model tended to overestimate the scale and extent of debris flows. In Inje-county's case, a debris flow is caused by multiple simultaneous small-scale landslide. This is quite different from the foreign cases in which a large-scale landslide cause a large-scale debris flow. Thus, an empirical model suitable for domestic conditions needs to be developed.

Keywords : landslide, debris flow, aerial photo, GIS

초 록

토석류는 집중호우시 산악지형에서 발생한 사면과피 쇄설물 또는 계곡 내에 쌓여 있던 퇴적토가 많은 양의 물과 섞여 흐르는 현상으로서 이동경로나 퇴적지점에 있는 시설물, 가옥, 인명에 큰 피해를 유발한다. 본 연구에서는 해외에서 연구되었던 토석류 거동에 관련된 모형식을 국내 사례에 적용해 보았으며, 이를 위해 우리나라 강원도 인제군에서 발생한 산사태 및 토석류에 대해 항공사진과 GPS 현장 측량성고를 이용하여 발생부와 퇴적부 자료를 수집하였다. 분석한 결과 토석류 이동거리를 예측할 수 있는 L/H 는 평균 4.93, 표준편차 0.97을 나타내었다. 토석류의 규모와 면적을 예측하는 경우 과대 산정되는 문제가 있으며 이는 우리나라의 토석류가 상부의 대규모 산사태로 유발되는 것이 아니고 다발적으로 발생한 소규모 산사태로 인한 것이기 때문인 것으로 보인다. 따라서 국내 산지 환경에 적합한 경험식에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

핵심어 : 산사태, 토석류, 항공사진, GIS

1. 서 론

우리나라는 매년 집중호우에 의한 자연재해로 인하여 많은 사회기반시설물 및 인명 피해가 발생하고 있으며 최근 기후변화의 영향으로 그 규모와 빈도가 커지고 있다. 이에 따라 자연재해에 관련된 연구도 더욱 활발해지고 있다. 우리나라의 경우 산지가 매우 많기 때문에 산사태 및 이로 인해 유발되는 토석류 피해가 빈번히 발생되고 있으

며 최근 서울 우면산에서 발생한 피해는 인명피해와 함께 그 심각성으로 사회적으로 많은 관심이 집중되었다. 산사태 및 토석류는 강우가 집중되는 여름에 집중적으로 발생되고 있으며 그 형태도 다양하다. 우리나라의 경우 산사태는 대부분 기반암 상부의 미고결층이 붕괴되어 산의 사면을 타고 단시간에 하부로 이동하여 퇴적이 되는 형태가 많은데 국내 산사태의 90% 이상이 토석류의 피해를 동반한다(김원영 등, 2000; 채병곤 등, 2004).

1) 정희원 · 강릉원주대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail:ghkim@gwnu.ac.kr)

2) 교신저자 · 강릉원주대학교 공과대학 토목공학과 석사과정(E-mail:hjs1217@lycos.co.kr)

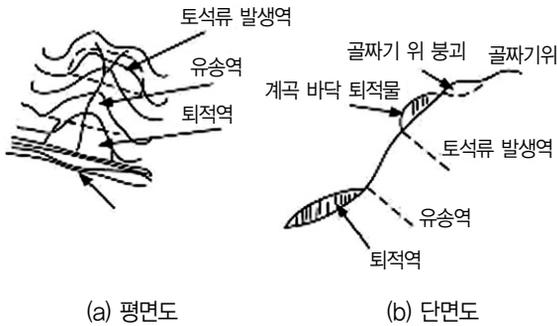


그림 1. 토석류 발생 영역

토석류 산사태가 발생하는 곳에서는 그림 1과 같이 가장 먼저 얇은 토양층의 붕괴가 일어나고, 사면 퇴적부에서는 이들 붕괴물질이 퇴적하게 된다. 산사태 발생지점에서 얇게 붕괴된 사태물질은 계곡을 따라 흘러 내려오면서 경사가 완만한 지점에서는 일부 쌓이고 급한 곳에서는 주위의 물질을 붕괴시키면서 흐른다. 사태물질의 하강속도는 산사면의 경사와 사태물질의 점성이 좌우하지만 세립질 물질들은 상당히 먼 곳 까지 이동시키므로 하상퇴적작용과 이에 따른 홍수의 원인이 되고 있다.

우리나라에서 발생하는 토석류 산사태 등 사면붕괴 관련 재해는 주로 장마철과 태풍이 발생하는 여름철에 일어난다. 그러나 최근의 기상이변으로 인한 국지성 집중호우는 계절과 무관하게 강우지역에서 사면붕괴를 일으키고 있다. 그림 2는 2002년 태풍 루사의 피해 사진으로 동시다발적으로 산사태가 발생하여 대규모 토석류의 형태로 피해를 주는 대표적인 경우이다. 그림 3은 2003년 태풍 매미의 피해 사진으로 산 정상부분에서 발생된 토석류가 유하부를 거쳐 도로사면에 피해를 입힌 경우이다. 그림 4는 본 연구의 대상지역인 인제군의 2006년 집중호우로 인한 피해사진이다.

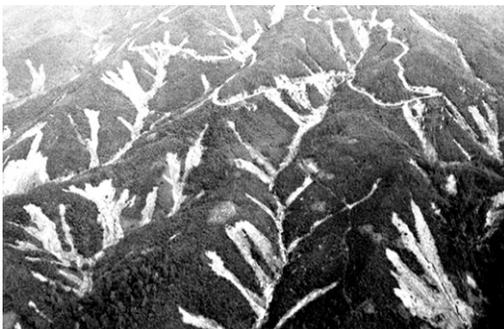


그림 2. 태풍 루사의 피해(2002)



그림 3. 태풍 매미의 피해(2003)



그림 4. 집중호우의 피해(2006)

일반적으로 토석류가 발생된 계곡부의 경사는 10~40°의 범위로 매우 다양하고 경사가 급할수록 이동 암석의 크기 및 양에 차이를 보이며 계곡부의 나무와 큰 규모의 암석이 같이 내려오는 유형을 나타내고 있다. 토석류 및 부유목 등의 발생 규모를 예측하기는 어려운 상태이다.

국내 연구사례로 김경석 등(2008)은 토석류로 인해 발생 가능한 재해의 규모를 가늠하고 대책구조물의 규모결정이나 설치위치 및 설치개수의 결정에 있어 매우 중요한 토석류 규모에 관한 연구를 수행하였다. 서용석 등(2005)은 산사태 현장조사 및 토질 실내시험자료를 토대로 인공신경망을 적용하여 이동거리 산정기법을 제안하였는데, 인공신경망에 이용된 자료는 조사지역 중 산사태 범위를 측정할 수 있었던 총 26개 지점 중 현장 자료 및 실내시험 분석 자료가 모두 획득된 24개 산사태 자료를 대상으로 하였다. 인공신경망 분석을 위한 입력 자료는 개개 사면의 경사변화율, 원지반 투수계수, 건조밀도, 간극율, 사태물질의 체적, 측정된 확산거리 등 6개 항목을 분석하여 토석류 산사태에 의한 사태물질의 이동거리를 산정 하였다. 신승봉 등(2010)은 토석류로 인하여 피해가 발생하는 확

산 범위 및 흐름속도를 실내 모형 시험을 통해 분석하여, 향후 토석류를 효과적으로 제어할 수 있는 제어시설 연구의 기초로 활용이 될 수 있도록 하는 연구를 수행하였다.

국내와는 달리 토석류에 의한 피해의 심각성과 토석류에 대한 연구 필요성을 느낀 여러 외국 국가들에서는 오랜 기간 동안 많은 연구가 진행되었다. Heim(1932)은 토석류가 이동하는 동안 변환되는 위치에너지와 토석류가 도달하는 거리까지 작용한 저항력에 의해 손실된 에너지의 관계식을 발표하였다. Moriwaki(1987)는 산사태 이동거리와 지형과의 관계에서 산사태 고도차는 수평이동거리 및 사면경사와 선형적 관계에 있음을 파악하고 이동범위 예측에 적용하였다. 그 후 Vallance 등(1997)에 의해 물이 다량 포함된 산사태나 하류 침식과 같은 대규모 토석류의 영향범위에 대한 연구가 진행되었다. Liu 등(2003)은 협곡 밀도, 연 평균강우량, 경사진 경작지형의 비율로부터 토석류 위험성 판단을 위하여 비선형 멱함수를 이용하여 토석류 위험정도를 계산하였다. Berti 등(2007)은 화산으로 발생된 협곡에서의 토석류에 대한 연구를 수행하였다. 토석류 선상지의 면적을 계산하기위해서 유역면적 측정과 과거 유역의 사진을 이용하였으며, 과거 27개의 토석류 사상을 이용하였다. Miller 등(2008)은 Oregon의 Coast Range를 대상으로 하도의 토석류확률모형을 이용하였다. 입력 자료로는 다양하게 이용 가능한 DEM을 이용하였으며, 위성이미지에서 제공하는 토지피복데이터를 이용하였다.

자연재해에서 산사태 및 토석류의 이동거리 및 규모를 예측한다는 것은 자연재해가 영향을 미치는 범위를 산정하고 사회기반 시설물의 안전성을 평가하는데 있어서 매우 중요하다. 본 논문에서는 가장 대표적 관측자료인 토석류 발생부, 퇴적부의 고도차와 이동거리 정보를 수집하고 이를 GIS 상에서 DB로 구축하여 토석류 거동에 관한 모델식을 적용하고 분석하고자 하였다.

2. 토석류 거동에 관한 모형식

토석류 전체 이동거리는 잠재적인 피해영역을 대략적으로 설정하는데 유용하게 이용될 수 있다. 산사태 및 토석류에 있어서 이동각도는 이동하는 물질의 체적 V 에 어느 정도 의존하게 된다. 이동각도(β)는 $\tan\beta=H/L$ 로 정의되는데 H 는 물질이 이동하는데 있어서 시작점과 퇴적부의 가장 낮은 점 사이의 고도차이며 L 은 이에 상응하는 수평거리이다.

Corominas(1996)는 204개의 사면파괴 중 71개의 토석류에 대해 식 (1)과 같은 경험적인 관계를 제시하였다.

$$\log(H/L) = -1.05\log V - 0.012 \quad (1)$$

여기서 H 와 L 은 m단위이며 V 는 $10^2 \sim 10^3 m^3$ 범위까지 변한다. 식(1)은 식(2)와 같이 변형시킬 수 있다.

$$L = 1.03 V^{0.105} H \quad (2)$$

주로 스위스 알프스지역에서 수집한 토석류 자료를 이용하여 회귀분석을 수행한 결과는 식 (3)과 같다.

$$L = 1.9V^{0.16} H^{0.83} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)에서 L 과 H 는 m, V 는 m^3 단위이며 식 (3)은 L 이 $300 \sim 12,600m$, V 가 $7 \times 10^2 \sim 10^6 m^3$, H 가 $110 \sim 1,820m$ 의 범위에 있다.

경험적이며 통계적인 라하르 모델을 이용하여 이동거리와 라하르에 의해 영향을 받는 영역을 예측할 수 있으며 이는 핵심적인 계수들에 대한 모형분석과 9개 화산지역에서의 27개 라하르 자료를 이용한 통계분석에 근거하고 있다. Iverson(1998)은 제한된 수의 비화산성 토석류에 대한 자료를 이용하였다. V 는 범람지역에 관련되어 있다. 간단한 관계는 식 (4)와 같다.

$$Area = cV^{2/3} \quad (4)$$

V 는 체적이고 c 는 통계-결정 계수이다. 라하르 모델에서 침수단면적에 대한 계수 c 는 0.005이다. 이탈리아 알프스지역에서 116개의 입상질 토석류 자료를 이용한 경우 식 (5)와 같은 유사한 결론을 얻을 수 있었다.

$$Area = 6.2V^{2/3} \quad (5)$$

Heim(1932)은 식 (6)과 같이 토석류의 움직임이 진행되는 동안 손실된 총 위치에너지와 토석류의 흐름이 정지하였을 때까지 손실된 총 저항 에너지의 관계식을 제안하였다.

$$MgH = MgRL \quad (6)$$

M 은 토석류의 질량, g 는 중력 가속도, R 은 무차원 저항

계수, H 는 토석류 발생부와 퇴적부의 고도차이, L 은 토석류의 이동거리이다. 위의 식(6)를 간략화하면 식(7)과 같다.

$$\frac{1}{R} = \frac{L}{H} \quad (7)$$

Heim(1932)에 의해 제시된 관계식에 포함되는 항목들을 토대로 하여 국외에서 다양한 현장 적용사례 연구가 발표되었다. Pierson (1980)은 Mount Tomas, NZ, Bullock Creek에서 발생한 산사태에 대해 조사하였고, 그 결과 L/H 는 6, 고도차는 600m, 이동거리는 3500m, 발생규모는 10^5m^3 이하였다. Morton 등(1974)은 Wrightwood, Calif., Heath Canyon에서 발생한 산사태를 조사하였고 그 결과 L/H 는 4, 고도차는 680m, 이동거리는 2700m, 발생규모는 10^6m^3 이하였다. Wiczorek 등(1988)은 Santa Cruz, Calif., Whitehouse Creek에서 발생한 산사태를 조사하였고 그 결과 L/H 는 3, 고도차는 200m, 이동거리는 600m, 발생규모는 10^5m^3 이하였다. 우리나라와 가장 유사한 국외모델의 형태는 규모가 $10\text{m}^3 \sim 10^5\text{m}^3$ 이며 토석류의 이동거리는 79m~3500m, 발단부와 퇴적부의 고도차는 41m~600m이다. 또한 토석류의 영향범위를 나타낸 L/H 의 경우 2~6에서 존재 하고 있었다. 식 (2)에서 (7)을 인제군 토석류 자료에 적용하여 $L/H, V, Area$ 등을 산정하였다.

3. 토석류 거동 분석

연구대상지는 강원도 인제군을 대상으로 2006년 7월 12~16일에 발생한 토석류 피해에 대해 2008년부터 2009년에 걸쳐 GPS를 이용하여 현장조사를 수행하였다. 현장조사는 토석류를 발생부, 유하부, 퇴적부로 구분하여 발생부에서 조사항목은 GPS 좌표, 파괴형태, 길이, 경사, 경사방향등을 조사하였다(황제선 등, 2011). 유하부의 경우 GPS 좌표, 전변호와의 거리는 측정시 굴곡이 없을 경우 대략적으로 20m 간격으로 측정하였고 경사 및 경사방향, 계곡의 폭, 계곡심도를 조사하였다. 퇴적부의 경우 GPS 좌표와 퇴적부의 길이, 경사, 경사방향 등을 조사하였다. 현장 조사를 하지 못한 지역은 산사태 발생 직후 촬영된 항공사진을 이용하여 자료를 구축하였다. 토석류 영향범위 산정을 위해서는 발생부와 퇴적부의 고도차와 수평거리가 필요하다. 발생부와 퇴적부의 고도차와 수평거리 정보를 수집하기 위해 DEM과 발생지점에 대한 현장조사 자료, 항공사진 판독자료를 GIS상에서 분석하여 고도차와 이동거리를 산정하였다. 항공사진 자료는 강원도 인제

군지역에 토석류가 발생한 해와 같은 2006년 12월에 촬영된 것으로 40매 정도의 영상을 정사보정한 후 모자이크 처리하였으며 영상의 해상도는 약 20cm이다. 사진 상에서 발생 지점은 항공사진에서 붕괴된 토층을 통해 육안으로 구분하였다. 그리고 퇴적 지점은 지형적 특징을 고려하여 지정하였다.

이전 연구결과에서 발표한 지형학적 분석결과에서 고도는 발생부 690m, 유하부 643m, 퇴적부 460m 이었고, 경사도는 발생부 36° , 유하부 26° , 퇴적부 21° 로 36° 정도의 경사에서 산사태가 발생하여 26° 경사도에서는 흐름을 진행하다가 21° 경사 아래에서는 더 이상 흐름으로 진행하지 못하고 퇴적하기 시작하였다. 암질은 모두 산성암 즉 화성암 계열이었다(김기홍 등, 2011).

그림 5와 그림 6은 인제군 지역의 항공사진과 DEM (Digital Elevation Model)을 중첩시킨 후 약 275개의 발생부와 25개의 퇴적부를 선정하여 영상지도 상에 표현한 것이다.

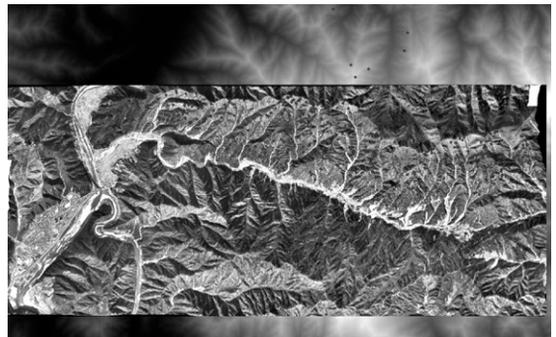


그림 5. 인제군 토석류 발생부

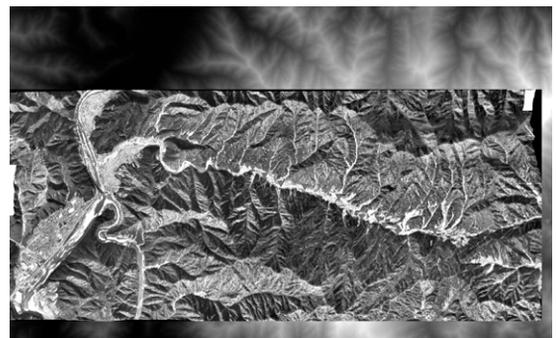


그림 6. 인제군 토석류 퇴적부

그림 7은 토석류의 이동거리를 조사하기 위하여 GIS상에서 토석류의 흐름을 발생부에서 퇴적부까지 디지털링하여 벡터자료로 구축한 것이다. 항공사진이 없는 부분

은 DEM자료와 위성영상을 참고하여 이동거리와 경로를 디지털타이징하였다.

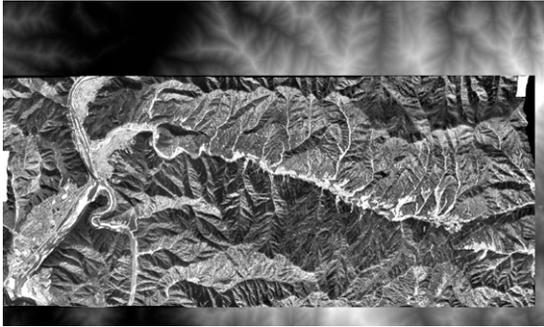


그림 7. 인제군 토석류 이동경로

표 1은 모형식에 적용한 결과를 구축한 DB의 일부이다. 좌표는 UTM 좌표이며 발생부와 퇴적부의 좌표, 고도, 고도차, 이동거리, 부피, 퇴적면적이다. 전체 자료에 대한 이동거리는 그림 8과 같이 약 75m~3000m에 분포하였다. 이동거리가 약 2000m~3000m로 비교적 길게 측정된 부분은 토석류가 발단부에서 유하부를 지나 하천까지 유입되어 퇴적부를 형성한 경우이다. 표 2에서 보이는 10개 자료의 경우는 하천까지 유입되지 않고 산지에서 멈춘 경우로 전체 자료 중 대부분이 하천까지 이동하였으며 산지에서 멈춘 경우는 얼마되지 않았다. 토석류의 체적은 Coromin가 제시한 경험식을 적용하여 그림 9와 같이 나타냈다. 실제 토석류에 의해 발생한 토사의 체적보다 외국의 경험식을 통해 구해진 값은 과대 산정되는 것으로

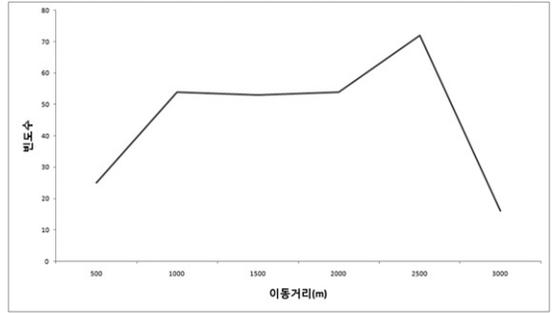


그림 8. 토석류 이동거리에 따른 빈도

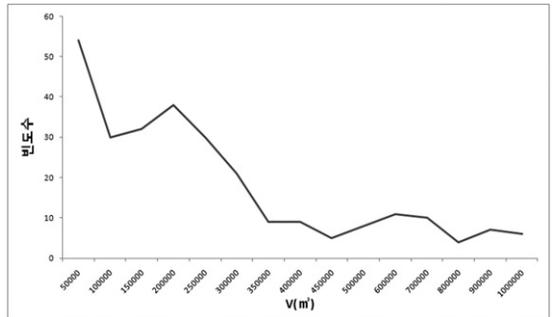


그림 9. 토석류 체적에 따른 빈도

판단된다. 이는 우리나라의 경우 외국의 연구사례처럼 대규모 발생부에 의한 큰 흐름에 의한 토석류가 아니고 산지 능선 부분에서 소규모의 발생부가 다발적으로 분포하고 이에 의한 소규모 개별적인 토석류가 합쳐지는 것이기 때문에 개개의 토석류 흐름 하나는 외국의 사례와는 달리

표 1. 인제군 토석류 발생지역 DB

	발생부			퇴적부			거동 특성				
	N(m)	E(m)	고도(m)	N(m)	E(m)	고도(m)	이동거리(m)	고도차(m)	LH	V(m³)	Area(m²)
1	4216174	430577	316	4216102	430570	290	75	26	2.9	452	340
2	4215020	436382	787	4214867	436310	722	180	65	2.7	900	1352
3	4215075	433953	535	4214835	433833	424	283	111	2.5	941	1476
4	4215087	436539	854	4214867	436310	722	337	132	2.5	1136	2151
5	4215031	436565	834	4214867	436310	722	318	112	2.8	1870	5829
6	4215729	432589	505	4215357	432375	340	458	165	2.7	2435	9886
7	4215421	433151	524	4215104	432807	360	483	164	2.9	3497	20384
8	4215656	432780	501	4215310	432509	350	454	151	3.0	3666	22410
9	4215632	432430	433	4215357	432375	340	322	93	3.4	5302	46860
10	4215188	433257	459	4214905	433218	380	298	79	3.7	7610	96534

작기 때문에 생각된다. 퇴적부의 면적은 라하르 모델식에 침수단면적에 대한 계수 0.005를 적용하여 계산하였고 그 결과값이 매우 크게 산정되는 경우가 발생해 국내 현장에는 맞지 않는 것으로 판단된다.

인제군 토석류 발생지역의 발단부 약 275개의 L/H 의 값은 그림 10과 같이 대부분 2.5에서 8 사이에 분포하였다. 하천으로 유입되지 않고 산지에 퇴적부가 확인된 대표적인 10개 자료의 경우 L/H 은 그림 11과 같이 2.5~5의 분포를 보였다.

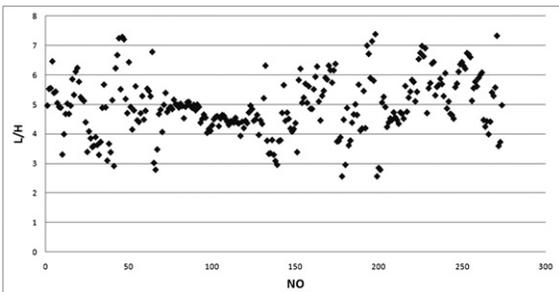


그림 10. 인제군 토석류 L/H 분포

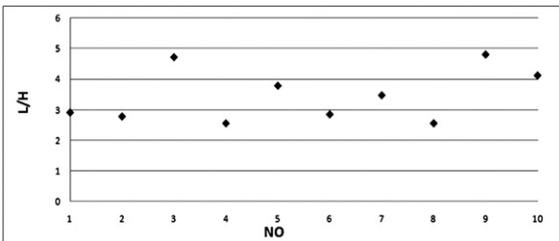


그림 11. 하천에 유입되지 않은 경우의 L/H

4. 결론

본 연구에서는 강원도 인제군 산사태 및 토석류 지역에 토석류 이동거리나 규모를 산정하기 위한 외국의 경험식들을 적용해 L/H , 토사체적 퇴적 면적을 산정하였다. 토석류의 영향범위를 예측할 수 있는 L/H 의 경우 대부분의 경우가 하천으로 유입되기 때문에 최대 이동거리를 산정하는데 어려움이 있었다. 하천유입으로 인한 영향을 제외하고 산지에 상에 발생부와 퇴적부가 존재하는 경우 L/H 는 2.5에서 5 사이에 값을 가진다. 특히 인제군의 경우 모든 경우에서 L/H 는 2.5 이상의 값을 보였기 때문에 산사태로 유발된 토사의 흐름이 최소한 고도차의 2.5배 이상은 이동하며 최대로는 고도차의 8배까지 이동할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

적용된 모형식 중 토석류 체적을 산정하는 식은 단순하여 비교적 적용이 용이하나 외국의 사례에 의해 개발된 경험식이기 때문에 한국의 특성에 맞지 않아 과대산정되는 문제점이 있는 것으로 판단된다. 향후 항공 라이다 자료나 지상 정밀 측량성과 등을 이용하여 토석류 발생 체적에 대한 데이터들이 수집된다면 우리나라 특성에 맞는 경험식이나 예측모형식을 개발할 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2010-0006844).

참고문헌

- 김경석, 장현익, 이상돈 (2008), 토석류 규모 분석 사례, 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 대한토목학회, pp. 3017-3020.
- 김기홍, 윤찬영, 이환길, 황계선 (2011), GIS를 이용한 인제 산사태발생지역의 토석류 분석, 한국측량학회지, 한국측량학회, 제29권 제1호, 한국측량학회, pp. 47-53.
- 김원영, 김경수, 채병곤, 조용찬 (2000), 우리나라 산사태의 형태분류에 따른 사례, 지질공학회지, 2000년 7월 세미나자료, 대한지질공학회, pp. 18-35.
- 서용석, 채병곤, 김원영, 송영석 (2005), 인공신경망을 이용한 사태물질 이동거리 산정, 지질공학회지, 대한지질공학회, 제15권 제2호, 대한지질공학회, pp. 145-154.
- 신승봉, 김기환, 최창림 (2010), 주문진 표준사를 이용한 토석류 환산에 관한 연구, 한국지반환경공학회 학술발표회 논문집, 한국지반환경공학회, pp. 281-287.
- 채병곤, 김원영, 조용찬, 김경수, 이훈오, 최영섭 (2004), 토석류 산사태 예측을 위한 로지스틱 회귀모형 개발, 지질공학회지, 대한지질공학회, 제 14권, 제 2호, pp. 211-222.
- 황계선, 박초롱, 윤찬영, 김기홍 (2011), 토석류 현장조사 기법의 표준화, 한국지형공간정보학회 춘계학술대회, 한국지형공간정보학회, pp. 215-216.
- Berti, M., Simoni, A. (2007), Prediction of debris flow inundation areas using empirical mobility relationships, *Geomorphology*, Vol. 90, pp. 144-161.
- Corominas, J. (1996), The angle of reach as a mobility index for

- small and large landslides, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, pp. 260-271.
- Heim, A. (1932), Bergsturz und Menschenleben. *Beiblatt zur Vierteljahresschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich*, Vol. 20, pp. 1-214.
- Iverson, R.M. (1997), The Physics of Debris Flows, *Review of Geophysics*, published by American Geophysical Union, Paper #97RG00426, pp. 245-296.
- Liu, X., and Lei, J. (2003), A method for assessing regional debris flow risk: an application in Zhaotong of Yunnan province (SW China), *Geomorphology*, Vol. 52, pp. 181-191.
- Miller, D.J., Burnett, K.M. (2008), A probabilistic model of debris flow delivery to stream channels, demonstrated for the Coast Range of Oregon, *Geomorphology*, Vol. 94, pp. 184-205.
- Moriwaki, H. (1987), Geomorphological prediction of the travel distance of a debris, *proc. China-Japan Field Workshop on Landslides*, Xian-Lanzhou, China, pp. 79-84.
- Morton, D. M., and R. H. Campbell (1974), Spring mudflows at Wrightwood, southern California, *Q. J. Eng. Geol.*, Vol. 7, pp. 377-384.
- Pierson, T. C. (1980), Erosion and deposition by debris flows at Mt. Thomas, North Canterbury, New Zealand, *Earth Surface Processes*, Vol. 5, pp. 227-247.
- Vallance, J.W., and Scott, K.M. (1997), The Osceola Mudflow from Mount Rainier; sedimentology and hazard implications of a huge clay-rich debris flow, *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 109, pp. 143-163.
- Wieczorek, G. F., E. L. Harp, R. K. Mark, and A. K. Bhattacharyya (1988), Debris flows and other landslides in San Mateo, Santa Cruz, Contra Costa, Alameda, Napa, Solano, Sonoma, Lake, and Yolo counties, and factors influencing debris-flow distribution, in *Landslides, Floods and Marine Effects of the Storm of January 3-5*, in the San Francisco Bay Region, California, edited by S. D. Ellen and G. F. Wieczorek, pp. 133-162.

(접수일 2011. 09. 30, 심사일 2011. 10. 17, 심사완료일 2011. 10. 21)