Korean Review of Crisis & Emergency Management 10(3) Mar. 2014 61-71
Available online at www.cemtp.re.kr

지상 LiDAR자료를 이용한 토석류 침식/퇴적 해석*

Analysis of the Erosion/Deposition in Debris Flow Using Terrestrial LiDAR Data

Byong Hee Jun**, Kye Won Jun***, Seung Cheol Lee****

**, ****School of Fire & Disaster Prevention, Kangwon National University,
346 Whangjo-gil, Samcheok, Korea

***Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University,
346 Jungang-ro, Samcheok, Korea

Abstract

This study was carried out to estimate the behavior of the debris flow, which was occurred at Umyensan-area in Seoul, Korea in 2011. In this study, we surveyed the topological change by debris flow using terrestrial LiDAR (Light Detection And Ranging) at Umyensan area. For the LiDAR measurement, the terrestrial laser scanning system consists of a highly accurate and fast 3D scanner associated GPS system and high-resolution digital camera were used. The bed slope of the most upstream has the range of 15-25° and kept high slope over 10° until run-off distance of 500m. however the slope decreased to the range of 0-10° at the midstream of debris track. The numerical simulation was performed by using the Finite Differential Element method (FDM) based on the equation for the mass conservation and momentum conservation and erosion/deposition velocity which was proposed by Takahashi. The erosion was increased steeply in high bed slope area within 500m and the deposition was dominant at the downstream of 1,000m. From the comparison with measured data and simulation result, this model was thought to be able to apply to the hazard map.

Key words: debris-flow, numerical simulation, bed slope, erosion/deposition velocity, hazard map

---

*이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2013R1A1A4A01010397).

** Tel. +82-33-540-3132. Fax. +82-33-540-3139. E-mail. bhjun@kangwon.ac.kr

**** Corresponding author. Tel. +82-51-890-4291. E-mail. sclee@kangwon.ac.kr

Submission & Publication Process

Received: Feb. 3, 2014 / Revised: Feb. 21, 2014 / Accepted: Mar. 13, 2014

1738-8368 © 2014 Crisis and Emergency Management: Theory and Praxis. All rights reserved.

www.kci.go.kr

국문초록

본 연구에서는 2011년 우면산 토석류 피해지역을 대상으로 지상 LiDAR (Light Detection And Ranging) 측량을 통해 토석류 발생 후의 지형의 변화를 관측하였다. LiDAR 측량을 위해서 고해상도 디지털 카메라와 GPS가 장착된 RIEGLE LMS-Z390i모델의 지상스캔닝시스템이 이용되었다. 최상류지점에서의 하상경사는 15-25°의 범위를 보이며 발생지점에서 500m정도까지의 거리에서는 경사도가 10°이상으로서 비교적 큰 경사를 보였다. 500m 이후에는 경사도가 감소하여 0-10°의 범위를 보이며 특히 1,000m이후에는 5°보다 낮게 유지되었다. 침식과 퇴적을 고려하는 수치해석 모의를 실시하였다. 수치모의는 Takahashi의 침식/퇴적속도식을 적용한 유한차분법을 이용하였다. 계산결과에서 500m이내 대부분의 지역에서는 1.5m깊이로 침식이 발생하며 500-1,000m구간에서 침식과 퇴적이 반복적으로 나타나고 있으며 1000m이후 구역에서는 퇴적이 우세하게 나타나는 것을 보였다. 수치모의 결과는 현장에서의 침식과 퇴적의 경향을 잘 표현하고 있다고 판단되며 이후 재해위험지도 등에 활용가능하다고 생각된다.

주제어: 토석류, 수치모의, 하상경사, 침식/퇴적속도, 재해위험지도

Ⅰ. 서론

토석류는 산사태 등으로 발생한 토사가 강우와 함께 혼합되어 유동하면서 하류로 흘러가면서 침식과 퇴적을 일으키는 현상이다. 2011년 서울 우면산 재해에서 볼 수 있듯이 최근에는 강원도와 같은 산지지역뿐만 아니라 도심지역에도 큰 피해가 발생함에 따라 이에 대한 대책이 시급히 요구되는 실정이다.

국내 산지에서 토석류의 발생특성에 관한 연구가 다수 이루어 졌다[1]. 토석류의 거동을 수치모의하기 위한 국내연구는 비교적 오래전부터 이루어졌으며[2] 최근까지도 수치모의에 대한 연구가 이루어지고 있으나[3][4][5], 실험을 통한 검증이 이루어지지 않거나 매우 제한된 조건에 대한 실험자료를 이용하고 있어서 현장 적용을 위해서는 추가적 연구가 필요하다고 판단된다. 또한 현장 자료를 이용한 토석류 거동 모의에 관한 연구도 이루어지고 있으나[6], 주로 퇴적현상만을 대상으로 하여 침식과 퇴적을 동시에 고려한 대책을 수립하는 것은 한계가 있었다. 따라서 본 연구에서는 침식과 퇴적을 고려하는 수치해석 모의를 실시하고 이 결과를 토석류 발생현장을 측량한 결과와 비교하여 현장에 적용가능한 수치모델을 제시하는 것을 목적으로 한다.

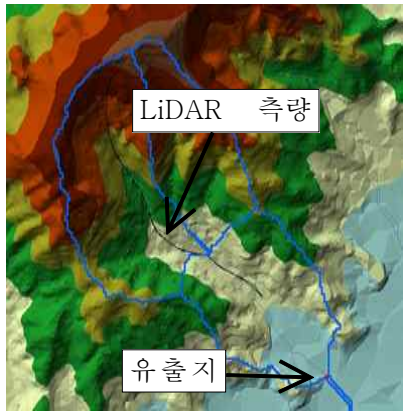
Ⅱ. 연구 방법

1. LiDAR 측량

현장의 스캔에 사용한 장비는 RIEGL사의 LMS-Z210ii를 이용하였다. 이 장치는 반사율 80% 기준에서 최대 측정거리 650m, 수직 0°~80°, 수평 0°~360° 범위로 15mm의 오차수준으로 포인트를 획득할 수 있다. 또한 카메라와 GPS를 장착하면 측정 포인트의 RGB값 및 절대좌표를 획

www.kci.go.kr

득할 수 있다. GPS는 HUACE사의 X90 2주파 RTK(Real Time Kinematic) 장비로 국토지리원에서 구축한 VRS(Virtual Reference System) RTK시스템을 이용하면 수평방향 ±10 mm+1ppm, 수직방향 ±20mm+1ppm의 정확도를 가진다. 이 장비에 대한 보다 구체적인 작동원리와 사양 그리고 성능에 대해서는 참고문헌을 참고하기 바란다[7]. 그림 1은 우면산 송동지역의 수치표고자료와 LiDAR 측량한 트랙을 나타내고 있다.



<Fig 1> LiDAR Track in Sondong Area of Umyeonsan

2. 토석류 모의

토석류의 1차원 흐름해석을 위한 지배방정식으로서 흐름의 연속방정식, 토사입자의 연속방정식, 운동량 보존의 법칙이 이용되었다.

흐름의 연속방정식

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = i \qquad (1)$$

토사입자의 연속방정식

$$\frac{\partial (Ch)}{\partial t} + \frac{\partial (CM)}{\partial x} = iC_* \qquad (2)$$

물과 토사 혼합물의 운동량 방정식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \beta \frac{\partial (uM)}{\partial x} = ghsin\Theta - ghcos\Theta \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_T} \qquad (3)$$

여기서, M(uh)는 x방향의 flux, u는 평균유속, h는 유동심, i는 침식(>0) 또는 퇴적(<0) 속도식, C는 토사농도, C*는 하상에서 최대 토사농도, β는 운동량 보정계수 (암석형 토석류에서는 1.25), g는 중력가속도, τb는 바닥의 전단응력, Θ는 하상경사, ρ는 물의 밀도, σ는 토사의 밀도, ρT 는 물과 토사 혼합체의 밀도 (ρT = Cσ + (1-C)ρ)를 나타낸다.

침식, 퇴적 속도식은 Takahashi, *et. al.*(1992)에 의해 아래와 같이 제안되었다[8].

$$\text{침식속도식 : } i = \delta \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \frac{M}{d_m} \quad (C < C\infty) \qquad (4)$$

www.kci.go.kr

퇴적속도식 : $i = \delta \frac{C_{\infty} - C}{C_{*}} \frac{M}{d_{m}}$ (C ≧ C∞) (5)

여기서, δ는 침식, 퇴적 계수, dm는 토사의 평균 입경, C∞는 균형유사농도를 나타낸다.

균형유사농도는 하상경사나 수면경사에 의해 영향을 받으며, 침식과 퇴적을 발생시키는 주된 인자로서 작용한다. 토석류 해석을 위한 모델 침식과 퇴적과정을 동시에 해석하는 것이 필요하며 이러한 모델 중에서 Takahashi의 모델은 많은 적용사례가 있어서 본 연구에서 채택하였다.

$$\overline{c} = \frac{\tan\Theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan\phi - \tan\Theta)} \quad (6)$$

보다 자세한 내용은 전병희(2013)을 참고하기 바란다[9].

<Table 1>은 시뮬레이션에 사용된 인자들의 값을 나타내고 있다.

<Table 1> Factors for Simulation

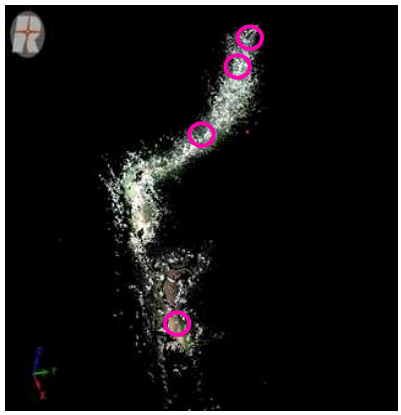
	Value	Unit
Calculation time	100	second
Time step	0.05	second
Mean diameter	0.01	meter
Soil density	2650	kg/m^3
Fluid density	1000	kg/m^3
Volumetric concentration of bed	0.65	m^3/m^3
Internal friction angle (tan)	0.7	
Gravity acceleration	9.81	m/s^2
Erosion coefficient	0.0007	
Deposition coefficient	0.0001	
Manning's roughness coefficient	0.03	$s/m^{1/3}$

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 토석류 흔적 조사

토석류 피해지역 분석을 위한 지상LiDAR 스캔자료는 상대좌표로 구성되어 있으므로 스캔지점 간의 연산을 통한 절대좌표로의 변환이 필요하다. 따라서 측정 시 측정지역의 중첩이 가능한 지점을 적절히 선정하여야 한다[7]. 본 연구지역에서는 충분한 중첩이 가능하도록 평균 60m간격으로 23개 지점에서 LiDAR측량을 실시하였다. 이렇게 중첩된 자료를 이용하여 절대좌표로 변환된 지형정보에는 아직 인공지형물이나 수목 등의 불필요한 정보가 존재하며 이를 제거하는 필터링 작업이 필요하다. 그림 2는 필터링과정을 거쳐 3차원 모형이 생성된 전체 영역의 클라우드 자료를 나타낸다. 그림 2의 적색원은 토석류의 발생, 상류, 이동, 하류(퇴적)지역으로 대표될 수 있는 지점을 나타낸다.

www.kci.go.kr



<Fig 2> Point Data on Debris Flow Track

모든 측정지점에서는 좌표정보를 가지는 포인트 자료와 그 지점의 RGB정보를 획득할 수 있다. 이러한 자료는 실제 지형을 잘 보여주고 자료로서 저장되어 이후의 연구에 활용될 수 있다. 본 논문에서는 그중 <Fig 2>에서 가장 위의 적색원인 발생부에 해당하는 지역의 스캔 결과의 일부만을 <Fig 3>에 나타내었으며, (A)는 RGB 자료와 좌표가 결합된 스캔결과를 나타내며 (B)는 동일지점에서 촬영한 파노라마 영상이다.

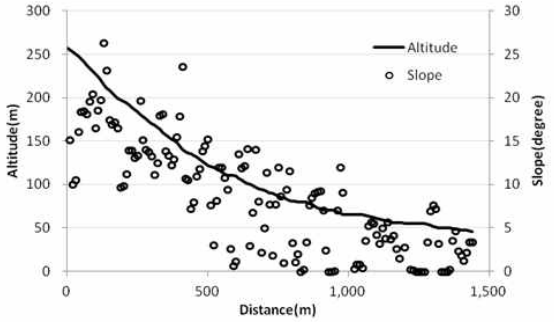
이렇게 구축된 3차원 지형정보로부터 필요한 정보를 얻을 수 있다. <Fig 3> (C)는 하도폭의 측정예를 나타낸다. 하도폭 뿐만 아니라 침식흔적을 이용하여 침식된 깊이를 측정할 수 있다.

<Fig 3> Scanning of Debris Flow Track, (A) RGB Data, (B) Panorama Image Data, (C) Measurement of Bed Width

<Fig 4>에 토석류 발생지점으로부터 토석류 트랙의 하상고와 경사도를 나타낸다. 하상고에서 얻어진 경사도를 보면 최상류지점에서의 하상경사는 15-25°의 범위를 보이며 발생지점에서

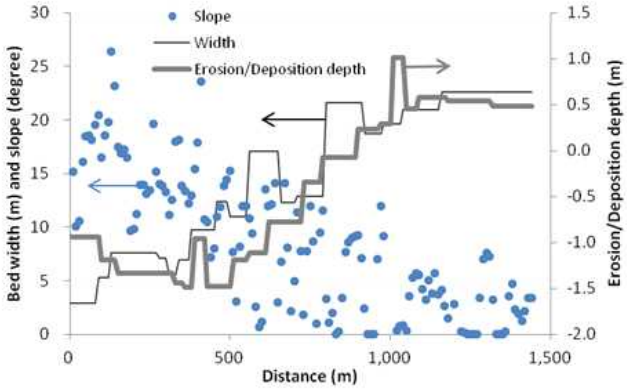
www.kci.go.kr

500m정도까지의 거리에서는 경사도가 10°이상으로서 비교적 큰 경사를 보인다. 500m이후에는 경사도가 감소하여 0-10°의 범위를 보이며 특히 1,000m이후에는 5°보다 낮거나 수평을 유지하는 구간도 다수 관찰되었다.



<Fig 4> Variation of Bed Slope

<Fig 5>에 토석류 발생지점으로부터 하상경사도와 LiDAR측량으로 얻어진 하상폭과 침식/퇴적고를 나타낸다. 경사도가 비교적 큰 경사 500m이내 구역에서는 하상폭이 10m이하로 비교적 좁은 상태를 유지하고 있으며 침식깊이는 1-1.5m정도로 큰 것을 확인 할 수 있었다. 이후 경사도가 완만해지는 500m 이하 구역에서는 수로폭이 넓어지는 반면 침식 깊이는 감소하다가 1,000m부근부터는 퇴적이 발생하는 것을 알 수 있다.



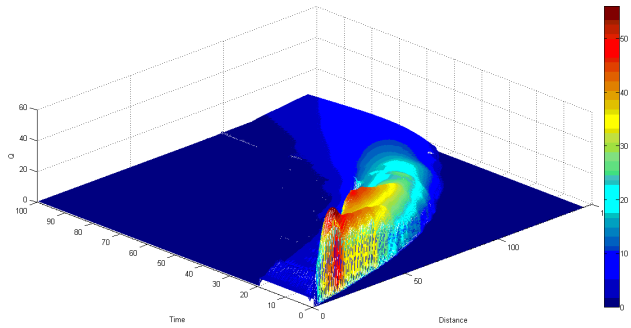
<Fig 5> Variation of Erosion/Deposition Depth on Distance

2. 토석류 모델링

<Fig 6>은 유하거리와 시간에 따른 유량의 변화를 나타내고 있다. 여기에서 유입유량은 50m3/sec이며 하폭은 10m로 설정되어 있으므로, 유입 단위폭당 유량은 5m3/sec이다. 유하거리는 격자폭이 10m로서 1450m에 대하여 145개의 격자로 이루어졌으며 x축은 총거리1450m를 나타내고 있다. 시간폭은 0.05초로서 100초 동안 계산되었다. 계산결과 토석류 유출초기에 피크유

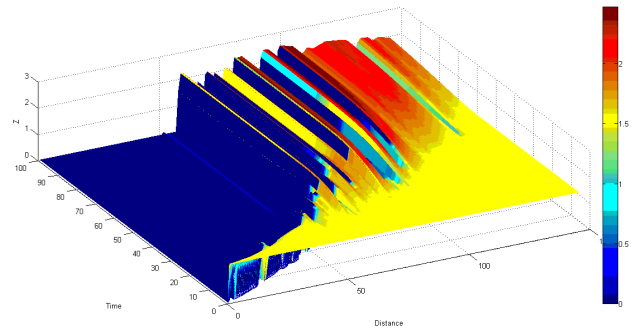
www.kci.go.kr

량이 발생하고 있으며 이 구간은 상류지역의 침식이 활발하게 발생하고 있는 구간과 일치한다.



<Fig 6> Variation of Discharge Flow on Distance and Time

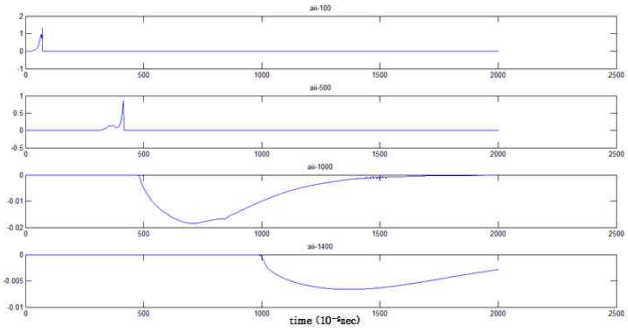
<Fig 7>은 유하거리와 시간에 따른 하상고의 변화를 나타내고 있다. 초기 하상고는 전 구간에 걸쳐 1.5m로 설정되었다. 토석류 발생에 따라 초기에 급격한 침식현상이 일어나며 30초 이후부터는 500m이상의 지점에서 침식과 퇴적이 혼재된 양상을 보이다가 약 1000m이상의 구간에서는 퇴적이 우세하게 일어나고 있다. 또한 50초 이후에는 하상고의 큰 변화는 없으며 일정하게 유지되고 있다.



<Fig 7> Variation of Deposit on Distance and Time

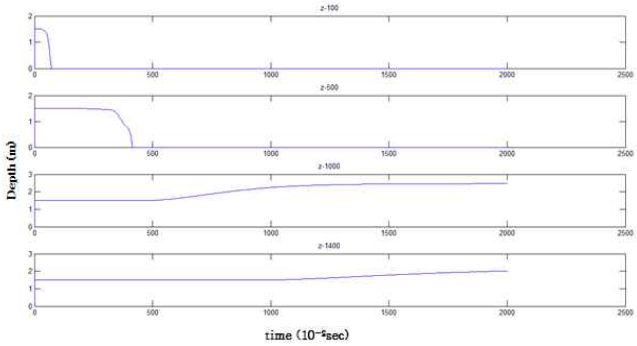
<Fig 8>은 유하거리 100m, 500m, 1000m, 1400m에서 시간에 따른 침식/퇴적속도의 변화를 나타내고 있다. 여기서 시간스텝은 0.05초이므로 2000스텝은 100초에 해당되는 시간이다. 여기서 y축의 값은 식 (4), (5)에서의 i에 대한 값이 되며 이 값이 양의 값을 가지는 경우는 식(4)와 같이 침식속도를 나타내며 음의 값을 가지는 경우는 식 (5)의 퇴적속도를 나타낸다. 토석류가 흘러감에 따라 상류 100m지점에서는 초기에 비교적 큰 침식속도를 보이며 500m지점에서도 침식속도가 나타난다. 이후 1000m지점에서는 퇴적속도로 전환되어 나타나며 1400m하류 지점에서도 낮은 수준의 퇴적속도를 보인다.

www.kci.go.kr



<Fig 8> Variation of Erosion/Deposition Rate on Distance

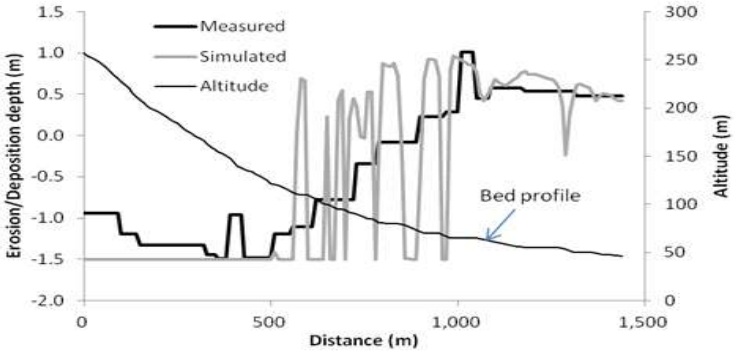
<Fig 9>는 유하거리 100m, 500m, 1000m, 1400m에서 시간에 따른 하상고의 변화를 나타내고 있다. 토석류가 흘러감에 따라 상류 100m지점에서는 초기에 비교적 큰 침식을 보이며 500m지점에서도 20초 정도에서 침식이 나타난다. 이후 1000m지점에서는 25초 이후 퇴적이 시작되어 0.5m 정도 퇴적되었으며 1400m하류 지점에서도 50초 이후 퇴적이 일어나 0.4m 정도 퇴적되었다.



<Fig 9> Variation of Deposit on Distance

<Fig 10>은 계산시간인 100초 후에 유하거리에 따른 계산된 침식/퇴적량과 LiDAR측량을 통해서 얻어진 실측값과의 비교 결과를 나타내고 있다. 이 그림에서 y축의 0은 초기 1.5m하상고를 나타내며 음의 값은 침식깊이를 나타내며 양의 값은 퇴적고를 나타낸다. 실측값을 보면 최상류부에서는 침식깊이가 1m정도로 측정되었으나 계산에서는 초기 하상고를 1.5m로 설정함에 따라 침식이 1.5m까지 진행되는 것으로 계산되었다. 이후 토석류가 흘러가면서 침식깊이는 더욱 깊어지며 500m이후 지역에서는 침식깊이가 점점 감소하다가 1000m지점부터는 퇴적현상이 나타나고 있다. 이에 대한 계산결과를 보면 침식에서 퇴적으로 전환되는 구간에서 계산결과는 침식과 퇴적이 반복적으로 나타나고 있으며 1000m이후 구역에서는 퇴적이 우세하게 나타나 전체적으로는 침식과 퇴적의 경향을 잘 나타내고 있다고 판단되었다.

www.kci.go.kr



<Fig 10> Comparion of Measured and Calculated Results of Erosion/Deposition Depth on Distance

Ⅳ. 결론

본 연구에서는 2011년 우면산 토석류 피해지역중 송동지역을 대상으로 지상 LiDAR측량을 통해 토석류 발생 후의 지형의 변화를 관측하였다. 구축된 3차원 지형정보로부터 하상폭과 침식/퇴적고 등 필요한 정보를 획득할 수 있었다. 최상류지점에서의 하상경사는 15-25°의 범위를 보이며 발생지점에서 500m정도까지의 거리에서는 경사도가 10°이상으로서 비교적 큰 경사를 보인다. 이 지역에서는 침식이 1-1.5m범위로 발생한 것을 확인 할 수 있었다. 500m이후에는 경사도가 감소하여 0-10°의 범위를 보이며 특히 1,000m이후에는 5°보다 낮게 유지되었다. 경사도가 비교적 큰 경사 500m이내 구역에서는 하상폭이 10m이하로 비교적 좁은 상태를 유지하고 있으며 이후 경사도가 완만해지는 500m 이하 구역에서는 수로폭이 넓어지는 반면 침식 깊이는 감소하다가 1,000m부근부터는 퇴적이 발생하는 것을 알 수 있다.

또한 침식과 퇴적을 고려하는 수치해석 모의를 실시하여 이 결과를 토석류 발생현장 측량결과와 비교하였다. 수치모의는 Takahashi의 침식/퇴적속도식을 적용한 유한차분법을 이용하였다. 계산결과를 보면 500m이내 대부분의 지역에서는 1.5m깊이로 침식이 발생하며 500-1,000m 구간에서 침식과 퇴적이 반복적으로 나타나고 있으며 1000m이후 구역에서는 퇴적이 우세하게 나타나는 것을 보였다. 전체적으로는 수치모의 결과는 현장에서의 침식과 퇴적의 경향을 잘 표현하고 있다고 판단되며 이후 재해위험지도 등에 활용가능하다고 생각된다.

References

[1] Ma, Ho Seop, *et. al.* 2010. Characteristics Analysis of Debris Flow Disaster in Korean National Parks. *Journal of the Korean Society for Environmental Restoration and Revegetation Technology.* 13(4): 52-64.

[2] Hwang, Hak and Gap Soo Ko. 1996. A New Kinetic Model for Debris Flow. *Journal of Korea Society of Civil Engineering.* 16(3): 287-294.

www.kci.go.kr

[3] Kim, Woon Hyung, *et. al.* 2009. Evaluation of Design Factor for Debris Flow Dam Design. *Journal of Korean Geo-environmental Society.* 10(2): 69-76.

[4] Jeong, Sueng Won. 2011. Rheological Model for Describing Fine-Laden Debris Flows:Grain-size Effect. *Journal of Korean Geo-environmental Society.* 27(6): 49-61.

[5] Kim, Sung Duk, *et. al.* 2012. Numerical Simulation for Behavior of Debris Flow according to the Variances of Slope Angel. *Journal of Korean Geo-environmental Society.* 13(6): 59-66.

[6] Chae, Byung Gon, *et. al.* 2010. A Case Study for Simulation of a Debris Flow with DEBRIS-2D at Inje, Korea. *Journal of Engineering Geology.* 20(3): 231-242.

[7] Jun, Kye Won, *et. al.* 2010. A Study on Estimation of Amount of Debris-Flow Using Terrestrial LiDAR. *Journal of Korean Geo-environmental Society.* 11(3): 63-68.

[8] Takahashi, T. *et. al.* 1992. Routing Debris Flows with Particle Segregation. *Journal of Hydraulic Engineering.* 118(11): 1490-1507.

[9] Jun, Byong Hee. 2013. Study on the Effects of the Bed Slope and Internal Friction Angle on Mean Soil Volumetric Concentration in Debris-Flow Model. *Korea Review of Crisis & Emergency Management.* 9(10): 183-192.

참고문헌 (References in Non-roman Script)

[1] 마호섭, 정원옥. 2010. 국립공원 지역에 있어서 토석류 재해의 특성 분석. 한국환경복원기술학회지. 13(4): 52-64.

[2] 황학, 고갑수. 1996. 토석류 거동을 위한 운동학적 모델. 대한토목학회논문집. 16(3): 287-294.

[3] 김운형,송병웅,이국현,김범석. 2009. 토석류·유목 대책에 관한 설계인자 분석. 한국지반환경공학회논문집. 10(2): 69-76.

[4] 정승원. 2011. 세립토 위주의 토석류에 관한 유변학적 모델: 입자크기 효과. 한국지반공학회논문집. 27(6): 49-61.

[5] 김성덕, 윤일로, 오세욱, 이호진, 배우석. 2012. 비탈면 경사 변화에 따른 토석류 거동의 수치모의. 한국지반환경공학회논문집. 13(6): 59-66.

[6] 채병곤, Ko-Fei Liu, 김만일. 2010. DEBRIS-2D를 이용한 인제지역 토석류 산사태 거동모사 사례 연구. 한국지질공학회논문집. 20(3): 231-242.

[7] 전계원, 전병희, 안광국, 장창덕, 김남균. 2010. 지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 산정에 관한 기초연구. 한국지반환경공학회지. 11(3): 63-68.

[9] 전병희. 2013. 토석류 모델에서 하상경사, 내부마찰각이 유사농도에 미치는 영향에 관한 연구. 한국위기관리논집. 9(10): 183-192.

www.kci.go.kr

전병희: 동경공업대학에서 “Study on Porous Carrier and Membrane Hybrid Process for Nitrogen Removal in Wastewater"로 공학박사학위를 취득하였으며 (2000.3), 현재는 강원대학교 삼척캠퍼스 소방방재학부 부교수로 재직중이다. 주 연구분야는 패턴분류와 산지재해 분야다(bhjun@kangwon.ac.kr).

전계원: 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 홍수유출과 수질예측을 위한 Web기반 시스템의 개발, 2004. 2), 현재 강원대학교 방재전문대학원에서 부교수로 재직중이다. 관심분야는 풍수해 방재, 산지재해 방재, 자연재해관리 등이며, 자연재해란 무엇인가?(공저, 2008) 등의 저서와 주요 논문으로 “산악지역돌발홍수 기준우량 결정에 관한 기초연구(2010)”, “지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 추정에 관한 기초연구(2010)” 등이 있다.(kwjun@kangwon.ac.kr)

이승철: 한양대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 유동관성을 고려한 복합덕트시스템의 유량분배특성, 2000. 2), 현재 강원대학교 소방방재공학전공에서 부교수로 재직중이다. 관심분야는 터널(지하 대공간) 및 초고층 건물의 환기 및 방재설비 분야다.(sclee@kangwon.ac.kr)

www.kci.go.kr