

RAMMS 모형을 이용한 토석류 모의*

Simulation of Debris Flow using RAMMS Model

Ho Jin Lee**, Won June Tak***, Kye Won Jun****

School of Civil Engineering, Chungbuk National University, 52 Naesudong-ro, Seowon-gu, Cheongju, Korea

Graduate School of Disaster Prevention, Kangwon National University, 346 Joogang-ro, Samcheok-si, Gangwon-do, Korea

Abstract

In mountainous areas in Korea, there is increasing damage caused by landslide disasters due to the effects of typhoons and heavy rainfall in summer, and there is an increase in the frequency not only in the forest but also in mountainous areas adjacent to downtown. In particular, because there has recently been a rapid increase in life and property damage caused by debris flow, the prevention and responses are required from the perspective of disaster prevention. Therefore, this study generated a high-resolution DEM and calculated the sediment yield using the measured data by terrestrial LiDAR for establishing topographic data in the areas affected by debris flow. It also understood the movement characteristics of the debris flow and calculated the extent of damage by applying the RAMMS model, a numerical analysis model, to the areas affected by debris flow. As a result, the extend of debris flow calculated by the RAMMS model was similarly simulated in the longitudinal and transverse directions in comparison with the actual measured data on the affected areas.

Key words: debris flow, RAMMS, diffusion range, terrestrial LiDAR

* 이 논문은 2013년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

** Tel. +82-43-261-2403. Fax. +82-43-261-2377. E-mail. hojinlee@chungbuk.ac.kr

*** Tel. +82-33-570-6447. Fax. +82-33-570-6501. E-mail. wjtak@kangwon.ac.kr

**** Corresponding author. Tel. +82-33-570-6816. E-mail. kwun@kangwon.ac.kr

Submission & Publication Process

Received: Jan. 9, 2015 / Revised: Jan. 16, 2015 / Accepted: Feb. 1, 2015

국문초록

산지가 많은 국내에서는 여름철 태풍과 집중호우에 의한 영향으로 토사재해의 피해가 증가하는 추세이며, 산림뿐만 아니라 도심과 인접한 산지지역에서도 발생 빈도가 증가하고 있다. 특히 최근에는 토석류에 의한 인명피해와 재산피해가 급증하고 있어 토석류에 대한 방재적인 측면에서의 예방과 대응이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 토석류 피해지역의 지형자료 구축을 위해 지상 LiDAR에 의한 측정자료를 이용하여 고정밀도 DEM을 생성하고 토사유출량을 산정하였고 토석류 피해지역에 수치해석 모형인 RAMMS 모형을 적용하여 토석류의 이동특성을 파악하고 확산범위를 산정하였다. 그 결과 RAMMS 모형에 의해 산정된 토석류 확산범위는 실제 피해가 발생한 지역에서 측정된 실측자료와 비교시 종·횡방향으로 모두 유사하게 모의되었다.

주제어: 토석류, RAMMS, 확산범위, 지상 LiDAR

1. 서론

토석류는 토사와 물의 혼합물이 중력장용을 받아서 일종의 연속유체처럼 유동하는 현상으로 산지가 국토의 대부분을 차지하는 우리나라의 경우 최근 기후변화에 의한 국지성 집중호우 증가, 태풍 및 장기 강우일수의 증가 등 토석류 발생 위험요인들이 증가하고 있는 것이 현실이다. 실제로 이러한 요인들이 반영되어 1997년부터 2006년까지의 자연재해에 의한 사망자 중 토석류 등의 지반재해에 의한 사망자는 전체의 27%에 달하고 있으며(박덕근 외, 2007) 2002년 태풍루사, 2003년 태풍 매미, 2006년 태풍 에위니아와 그에 따른 호우에 의해 강원도를 중심으로 많은 토석류 피해가 발생하였다. 또한 2011년에는 서울 우면산과 춘천 마적산에서 대규모 토석류가 발생하여 막대한 인명과 재산상 피해를 유발시켜 토석류 재해의 심각성을 인식시켰다(문인중, 2014). 이처럼 토석류가 많이 발생함에도 불구하고 과거에는 피해를 예방하는 노력보다는 복구에 치중해 왔다.

국내에서는 2006년 토석류 피해가 발생한 이후 본격적인 토석류 연구가 시작되었다. 강원지역을 중심으로 산지하천도로 호우피해방지를 위한 수층부 및 토석류 방재설계 선진화 기술개발(2008년~2013년) 연구가 진행되어 현장조사, 실험 및 모형해석 등 다양한 토석류 연구가 수행되었으며, 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리시스템 개발 기획 연구(2012년), 차세대 토사재해 선제대응 및 안전기술 개발 기획 연구(2013) 등 토석류에 대한 관심과 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 토석류 피해지에 대한 정밀한 현장조사, 토석류 모니터링과 연계한 모형해석에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

국외 연구의 경우 미국에서는 USGS(미국지질조사소)를 중심으로 재해정보 네트워크 구축 프로그램 개발, 실시간 산사태 모니터링 및 예측 체제 확립 연구, 산사태 및 토석류 피해저감 공법 연구 등이 다양하게 진행되고 있으며, 도시국가 형태이면서 토석류 등이 빈번하게 발생하는 홍콩의 경우 도시 전체의 산사태 위험등급지도를 작성하고 산사태 상시 감시 및 재해 발생지에 대한 사후 관리를 제도화 하고 있다. 또한 일본의 경우 국가 연구기관 및 대학 연구소 등에서 1950년대부터 종합 방재 및 토석류 및 산사태 관련 연구가 활발히 진행되고 있고 스위스 등 유럽에서는 토석류 방호시설 개발 및

성능평가 표준화 분야에 대한 수준 높은 연구가 진행되고 있다. Cesca, *et. al.*(2008)은 토석류 해석모형인 RAMMS 모형과 FLO-2D모형을 같은 매개변수를 사용하여 이탈리아 북부지역의 Dolomite 산맥에 적용하여 모의를 실시하였고 Hussin, *et. al.*(2012)는 RAMMS 모형을 Southern French에 적용하여 모형의 민감도 분석 및 유출량, 유동심, 유속 등을 해석하였다.

본 연구에서는 2009년 7월에 충청북도 제천시 일대에 발생한 토석류 피해지역을 중심으로 피해 복구전 지상 LiDAR를 활용해 측정하여 구축된 고정밀도 DEM자료를 토석류 수치해석모형인 RAMMS 모형에 적용하여 토석류의 이동특성을 파악하고 확산범위를 산정하는 연구를 수행하였다.

II. RAMMS 모형의 이론

본 연구에 사용된 모형은 RAMMS(RApid Mass Move Simulation)모형으로서 스위스 눈사태 기관인 SLF인 WSL팀에서 개발되었고 Dynamics modeling으로 토석류(debris flow), 낙석(rockfalls), 눈사태(avalanches)의 세 가지 모듈을 3차원 지형에서 시뮬레이션 할 수 있도록 구성되어 있다. 모형의 기본방정식은 Voellmy-Salm의 접근 방법에 기초하고 식 (1)과 같이 표현된다. RAMMS 모형의 구성식들은 유럽 여러 지역의 현장자료를 통하여 검·보정 되었다.

$$S = \mu N + (1 - \mu)C - (1 - \mu)C \exp\left(-\frac{N}{C}\right) + \frac{\rho g U^2}{\xi} \quad (1)$$

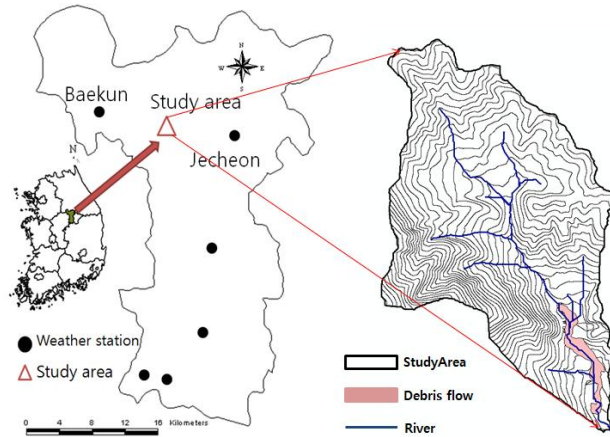
여기서 S는 마찰력, H는 유동심, C는 유동물질에 대한 응집력, μ 는 dry-Coulomb type friction coefficient, g는 중력가속도, ρ 는 밀도, U는 유속, N은 활동면에 대한 수직응력을 의미한다. C는 응집력을 가지고 있는 흐름 물질로, N=0, U=0의 조건일 때 마찰력 S는 0이 된다. C의 값이 증가하면 마찰력은 증가하게 되고 이에 전단응력이 증가하게 된다. 이에 토석류나 눈사태의 흐름이 약해지는 현상이 일어난다.

III. 모형의 적용 및 분석

1. 대상유역

본 연구의 대상지역은 충청북도 제천시 일원으로 지역으로 연평균 강수량은 1,295mm로서 전국평균 강수량보다 많다. 이는 장마철에 습윤한 기류가 차령·소백산맥의 서쪽 사면을 따라 유입될 때 지형성

강우로 인해 집중호우 현상이 나타나기 때문이다. 토석류 피해가 일어난 지역은 제천시 봉양읍 공전리 일대 공전저수지 상류 지점으로 2009년 7월 14일 제천시 일대를 지나간 시간우량 64mm/h(제천시 봉양읍)의 집중호우로 인해 토석류 피해가 발생한 지역이다(<그림 1>).

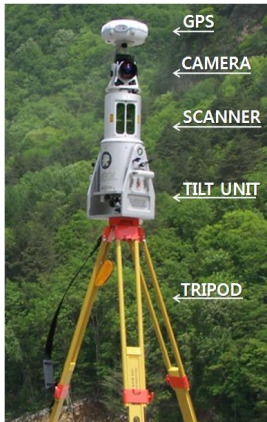


<그림 1> 연구 대상지역

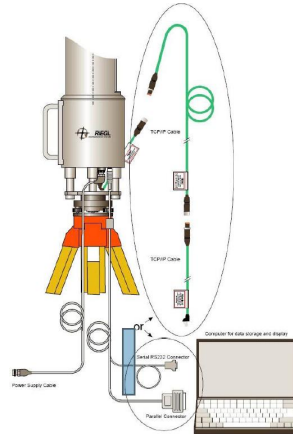
2. 지상 LiDAR를 이용한 고정밀 자료의 구축

1) 지상 LiDAR의 기본 구성

현장에서 지상 LiDAR 3D 스캐닝을 통해 정밀한 지형자료를 구축하기 위해 사용한 장비는 RIEGL사의 LMS-Z210ii로 반사율 80%기준에서 최대 측정거리 650m, 수직 0°~80°, 수평 0°~360° 범위로 15mm의 오차수준으로 포인트를 획득할 수 있으며 카메라와 GPS를 장착하면 측정 포인트의 RGB값 및 절대좌표를 획득할 수 있다(김남균, 2011).



<그림 2> LiDAR 장비의 기본 구성



<그림 3> Scanner의 장치 구성

2) 고정밀 자료의 구축

지상 LiDAR 장비를 이용하여 고정밀 자료를 구축하기 위해 토석류가 발생한 지역을 대상으로 토석류 발생이전의 지형은 수치지도를 이용하여 지형을 나타내는 등고선을 추출 후 연구영역에 대한 클립핑을 하여 지형을 생성하고 토석류 발생 이후의 지형은 토석류 발생영역에 대해 지역좌표보정을 실시한 후 지상 LiDAR를 이용하여 지형 3D스캐닝을 수행하고 촬영된 스캔데이터의 모든 스캔 포지션을 절대좌표화 하고 병합한다. 병합된 데이터를 이용하여 연구영역에 대하여 클립핑(Clipping)을 하고, 지형데이터 이외의 데이터를 삭제하기 위해 필터링(Filtering)작업을 실시한 후, 기존의 수치지도에 데이터를 중첩하여 토석류 발생이후의 지형데이터를 생성하였다. 생성된 DEM은 기본적인 연산을 통해 토석류 발생 전과 후의 지형적인 변화를 추정하는 것이 가능하다. <그림 4>는 현장에서 측정된 스캔데이터의 필터링 작업후를 표현하였고 <그림 5>와 <그림 6>는 기존 수치지도를 이용해 생성된 DEM자료와 지상 LiDAR로 측정되어 최종 완성된 고정밀도 DEM자료를 나타내고 있다.

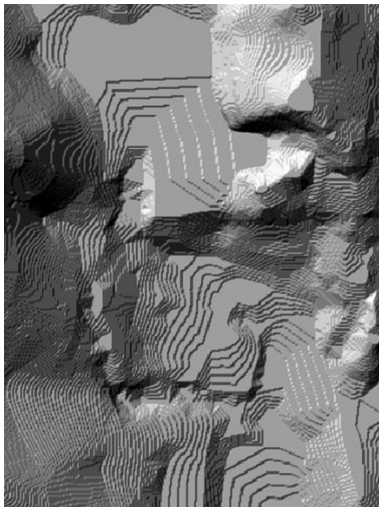


(a) 필터링 전

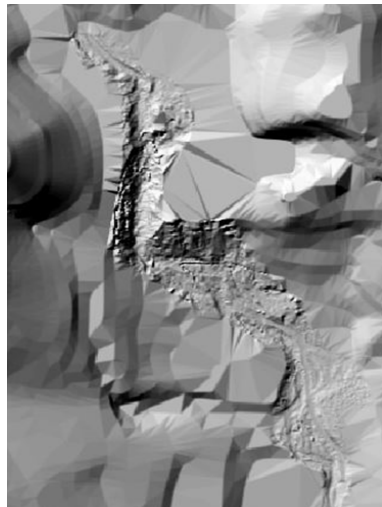


(b) 필터링 후

<그림 4> 스캔자료의 필터링 전후 비교



<그림 5> 수치지도를 이용해 생성된 DEM



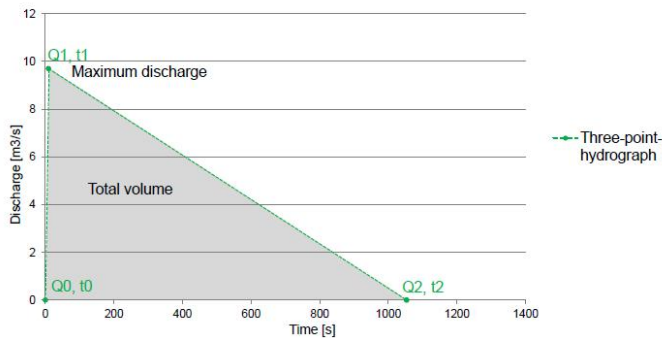
<그림 6> 지상 LIDAR를 이용해 생성된 고정밀도 DEM

4. RAMMS 모형을 적용한 토석류 모의

1) RAMMS 모형의 입력자료 구축

RAMMS 모형은 구축된 지형자료를 불러들여 흐름의 발생지점을 설정하고 모형이 모의될 수 있도록 매개변수 값을 결정해 줘야 한다. 입력자료는 토석류 유출 토사량, 토석류 피크 유량, 유속, 유량공

급을 위한 시간결정과 토석류의 흐름방향(inflow direction) 등으로 구분되어 진다. <그림 7>은 모형의 입력자료 중 토석류 피크유량을 고려한 유출수문곡선을 나타내고 있다. 기본적으로 유량이 처음 발생하는 시간, 첨두유량 발생 시간과 유량공급이 끝나는 시간을 지정하는 3점 유출수문곡선 해석방법이 적용된다.



<그림 7> 토석류 유출토사량과 수문곡선 구성

본 연구에서 사용된 토석류 유출 토사량은 현장에서 측정된 지상 LiDAR자료와 수치지도를 중복시켜 생성한 지형자료를 활용하여 산정한 10,000m³ 값을 사용하였고 토석류 피크유량은 대상지역에서 직접 계측하여 구할 수 없으므로 일본국토교통부에서 제시한 식 (2)와 식 (3)에 의해서 구한 150m³/s의 값을 적용하였으며 토석류의 유속은 Prochaska(2008)가 제안한 토석류 유하거리-유속관계에 근거해 유하거리는 620m로 유속 값은 14m/s를 적용하였다.

$$Q_{sp} = 0.01 \sum Q \quad (2)$$

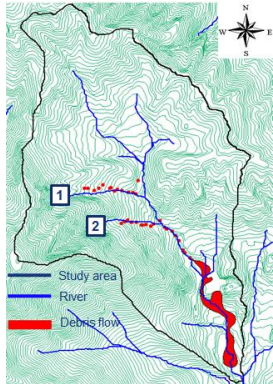
$$\sum Q = \frac{C_* \cdot V_{dap}}{C_d} \quad (3)$$

여기서, Q_{sp} 는 토석류 피크유량(m³/s), $\sum Q$ 는 토석류 총유량(m³), V_{dap} 은 1과 토석류에 의해 유출하는 것으로 생성된 토사량(공극포함; m³), C_d 토석류 농도(0.4), C_* 는 계상 퇴적토사의 용적농도(0.6정도)이다.

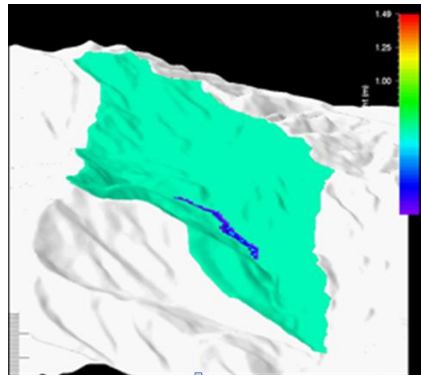
2) RAMMS 모형의 모의

RAMMS 모형의 모의를 위해 구축된 자료를 모형에 입력하고 실제 토석류 피해가 발생한 대상지역에 모형을 적용하여 토석류의 이동과 확산면적 변화에 대해 살펴보았다. RAMMS 모형의 경우 토석류가 발생한 지점을 지정하고 모의를 시작해야 됨으로 현장조사 및 관측을 통해 획득한 정보를 토

대로 발생지점을 2개 지점으로 가정하였다. 첫 번째 지점은 토석류가 발생한 1번 지류의 최상류 지점에서 토석류가 발생하였다고 가정한 경우(Case 1)이고 두 번째 지점은 1번 지점보다 아래에 위치한 2번 지류의 최 상류 지점에서 토석류가 발생하였다고 가정한 경우(Case 2)이다.



<그림 8> Case별 토석류 발생지점



<그림 9> 대상지역의 RAMMS 모형 시뮬레이션 화면

Case별로 모의를 수행하고 그 결과를 실제 지상 LiDAR로 측정된 토석류 피해범위와 비교하였다. <그림 10>는 실제 토석류 피해지역이고 <그림 11>과 <그림 12>는 RAMMS 모형을 이용하여 토석류 흐름을 모의하고 그 결과를 Case 1, Case 2 순으로 나타낸 것이다.



<그림 10> 토석류 피해지역



<그림 11> Case 1의 확산범위



<그림 12> Case 2의 확산범위

RAMMS 모형을 이용한 Case별 토석류 흐름해석 결과 지상 LiDAR로 측정된 실제 토석류의 확산 범위에 비해 Case 1, Case 2 모두 과다하게 산정되었다. 그 원인은 토석류 발생전 수치지도와 지상 LiDAR로 측정된 자료의 정밀도 차이 때문으로 판단되며 모형 모의시 토석류 흐름이 지상 LiDAR로 측정된 지역을 벗어나면 크게 확산되었다. 확산범위를 좀더 정확히 분석하기 위해 토석류의 흐름방향을 기준으로 확산거리를 비교하였다. 그 결과 Case 1이 Case 2에 비해 좀더 정확하게 토석류 피해발생 경향을 모의하였다.

<표 1> 토석류의 확산거리 비교

구분	종단거리(흐름방향)	오차
실제 측정(지상 LiDAR)	609m	-
Case 1	708m	16.2%
Case 2	740m	21.5%

퇴적심 분석에서는 <그림 11>과 <그림 12>에서 알 수 있듯이 하류부로 갈수록 진한 푸른색을 나타내며 퇴적심이 증가하였다. Case 1의 경우 퇴적심은 0.1~1.2m까지 증가하였고 Case 2는 0.1~1.4m까지 하류부로 갈수록 증가하였다. 특히 Case 2의 경우는 하류부의 퇴적심이 Case 1에 비해 크게 증가하는 경향을 나타냈다.

IV. 결론

본 연구에서는 RAMMS 모형을 모의하기 위해 지형자료를 구축하고 토석류 수치해석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

토석류 피해지역의 고정밀도 DEM을 구축하기 위해 지상 LiDAR를 통하여 측정된 자료를 필터링하고 보정하였으며 기존 수치지도와 중복시켜 토석류 유출 토사량을 산정한 결과 10,000m³로 분석되었다. RAMMS 모형 모의를 위한 입력자료인 토석류 피크유량은 150m³/s로 계산 되었으며, 토석류의 초기 유속값은 14m/s로 산정하여 RAMMS 모형에 적용하였다.

토석류 발생지점은 현장에서 조사된 자료를 토대로 제일 상류부 지류에서 발생했다고 가정한 Case 1과 그 직하류 지류에서 발생했다고 가정하는 Case 2에서 모형을 모의한 결과 Case 1과 Case 2 모두 확산범위가 과다 산정되었다. 흐름방향으로 토석류 확산거리를 비교한 결과는 Case 1이 Case 2에 비해 5.3% 정도 더 적은 오차를 나타내는 것으로 분석되어 본 연구 지역에서는 토석류 발생지점이 상류에 위치할 때가 하류에 위치할 때 보다 토석류 모의 결과가 좀더 정확하게 모의되는 것으로 확인되었다.

향후 연구에서는 토석류 발생위치와 RAMMS 모형의 매개변수 산정 부분을 보완하여 RAMMS 모

형의 국내 적용성을 향상시킬 수 있는 방안에 관해 추가 연구를 수행하고자 한다.

참고문헌

- 김남균. 2011. FLO-2D를 이용한 토석류의 이동과 확산에 관한 연구. 강원대학교 석사학위논문.
- 문인중. 2014. FLO-2D를 적용한 토석류 시뮬레이션과 재해위험도 평가. 충북대학교 석사학위논문.
- 박덕근, 오정립, 박정훈. 2007. 재해경감대책협의회 사면분야 활동보고. 방재연구. 9(2): 13-18.
- 상지대학교. 2012. 도시방재형 토사재해 회피기술 및 통합관리시스템 개발 기획 연구. 국토교통과학기술
술진흥원.
- 수충부 및 토석류 방재기술 연구단. 2011. 산지하천도로 호우피해방지를 위한 수충부 및 토석류 방재
설계 선진화 기술개발. 국토교통과학기술진흥원.
- 시설안전공단. 2013. 차세대 토사재해 선제대응 및 안전기술 개발 기획 연구. 국토교통과학기술진흥원.
- Casea M·A' Agostino V. 2008. *Comparision between Flo-2D and RAMMS in Debris Flow
Modeling: A Case Study in the Dolomites*, int. Coference on Monitoring, Simulation,
Prevention and Remediation of Dense and Debris. D. De Wrachien, C. A Brebbia
eM.A.Lenzi(eds).
- H. Y. Hussin, B. Quan Luna, C. J. van Westen, M. Christen. J. P. Male, W. J. Th. and van Asch.
2012. Parameterization of a Numerical 2-D Debris Flow Model with Entrainment: A Case
Study of the Faucon Catchment, Southern French Alps, *Nat. Hazards Earth Syst.* 12:
3075-3090.
- Prochaska, Adam B., Paul M. Santi, Jerry D. Higgins, and Susan H. Cannon. 2008. A Study of
Methods to Estimate Debris Flow Velocity. *Landslides*. 5(4): 1-14.
- WSL Institute for Snow and A valanche Research SLF. 2011. *RAMMS User Manual v1.4 Debris
Flow*. WSL Institute for Snow and A valanche Research SLF.

이호진: 충북대학교에서 공학박사학위를 취득하고, 현재 충북대학교 토목공학부 조교수로 재직 중이다. 주요 논문으로는 “창경궁의 홍수해 위험관리 시스템 개발(2013)”, “사면에서 토석류와 소단폭의 관계성에 관한 연구(2013)”, “비탈면에서 토사의 침식 및 퇴적 속도 특성에 관한 연구(2014)” 등이 있으며, 관심 분야는 자연재해, 유사현상, 수공구조물 설계 등이다(hojinlee@chungbuk.ac.kr).

탁원준: 강원대학교 방재전문대학원 방재관리전공 석사과정으로 재학중이다. 관심분야는 산지재해 방재, GIS, 수리·수문 모델링 이다(wjtak@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, 자

연재해관리 등이며, 자연재해란 무엇인가?(공저, 2008), 방재사전(공저, 2010) 등의 저서와 주요 논문으로 “산악지 역돌발홍수 기준우량 결정에 관한 기초연구(2010)”, “지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 추정에 관한 기초연구 (2010)” 등이 있다(kwjun@kangwon.ac.kr).