

# Kanako-1D를 이용한 토석류재해지역의 수치모의

장창덕\*, 윤영호, 전계원\*\*

최근 기후변화에 따른 집중호우로 토석류의 발생빈도가 증가하고 있으며 토석류의 발생은 하류지역에 인명과 재산피해를 가져오며 산지하천으로 유입되어 통수단면적의 감소와 같은 2차적인 피해를 가져온다. 토석류는 산지 지역의 이용을 위한 개발과정, 산악지도로의 안전성 및 하천으로 유입하는 토사의 유입을 고려하는 전문가들에게 관심의 대상이 되고 있다. 따라서 세계 각 국의 많은 토석류 연구자들은 토석류 위험지역의 분석과 피해의 저감을 위해 다양한 방법으로 연구를 진행하고 있지만 토석류의 복잡성과 다양성으로 인해 연구에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다. 본 연구에서는 토석류 수치해석프로그램 중에 침식과 퇴적작용의 반영이 가능하며 모의수행의 편리한 장점이 있는 Kanako-1D를 이용하여 제천의 토석류 발생지역에 적용하고 현장조사를 통한 토석류발생량과 비교하였다. 그 결과 Kanako-1D로 모의된 양은 LiDAR와 수치지도를 활용해 얻은 토석류유출량에 약 71%인 6,953m<sup>3</sup> 로 평가되었다.

**주제어:** 토석류, 1차원 수치모의, 집중호우, Kanako-1D

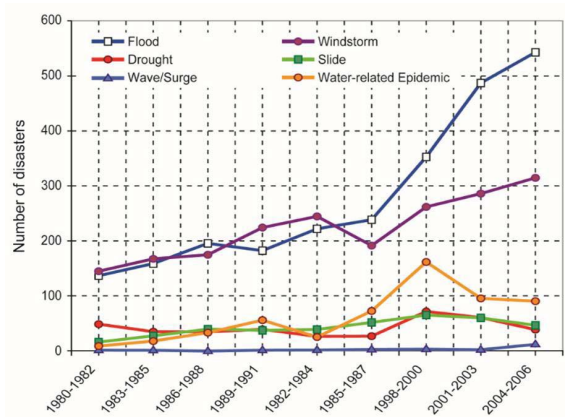
## 1. 서론

최근 토석류는(debris flow) 산지지역의 이용을 위한 개발과정, 산악지도로의 안전성 및 하천으로 유입하는 토사의 유입을 고려하는 전문가들에게 관심의 대상이 되고 있다. 그 이유는 토석류가 산지에서 가장 빈번하게 발생하며 모든 지형학적인 과정들을 파괴하고 기후형태적 환경의 범위 안에서 산지의 모든 영역에 영향을 줄 수 있기 때문이다. <그림 1>은 1986년부터 2006년 까지 세계의 물과 관련된 재해와 이에 의한 사망자 현황을 나타낸 것이고, <그림 2>는 1986년부터 2006년까지의 사면재해 발생건수를 지역별로 구분해 나타낸 것이다(EM-DAT; Emergency Disasters Data Base). 세계적으로는 홍수와 태풍에 의한 재해가 가장 큰 비중을 차지하면서 점차 증가하고 있으며, 특히 아시아 지역에서 사면재해의 발생량은 다른 지역에 비해 크게 높은 것으로 나타났는데 사면재해 부분만으로는 전 세계 사망자수의 64%에 달한다(Adikari and Yoshitani, 2009; Hoyois, *et. al.*, 2007). 2006년 소방방재청 자료에 따르면 <그림 3>과 같이 최근 10년간 자연재해에 대한 사면재해의 평균 사망자 수

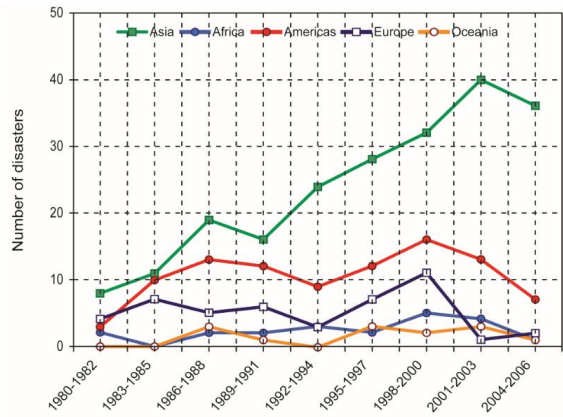
\* 제1저자, \*\* 교신저자.

가 27%에 달하고 있고 2006년 한국도로공사의 영동선 수해조사에 따르면 총 90건의 사면재해 중 토석류재해가 23% 퇴적물 발생량은 전체의 95%에 달해 토석류는 우리나라에서도 심각한 자연재해임을 나타낸다.

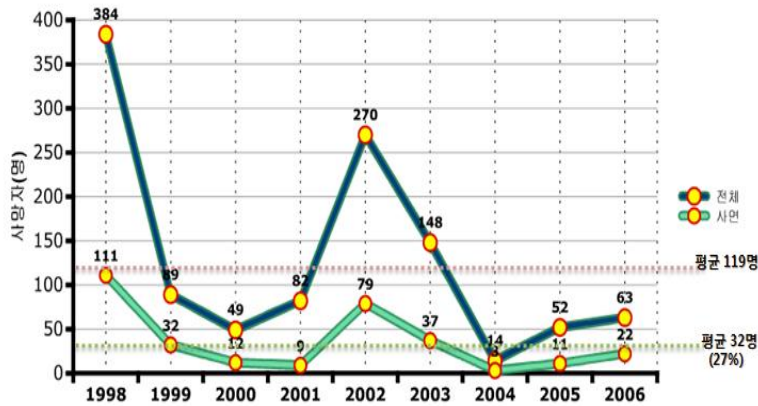
따라서 세계의 토석류 연구자들은 토석류 위험지역의 분석과 피해의 저감을 위해 다양한 방법의 연구로 접근하고 있지만 토석류의 복잡성과 다양성으로 인해 연구에 많은 어려움을 겪고 있는 실정이다.



<그림 1> 1986년부터 2006년까지 물과 관련된 재해현황



<그림 2> 1986년부터 2006년까지 사면 재해 현황



<그림 3> 최근 10년간 국내 자연재해에 대한 사면재해 사망자비교

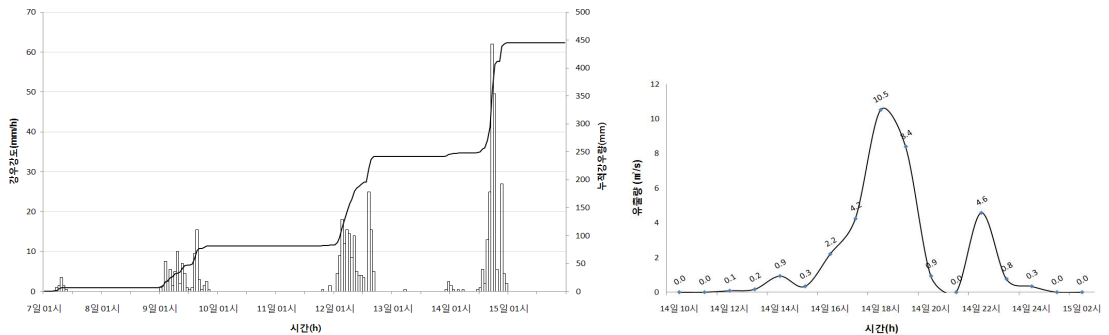
※ 자료: 소방방재청 (2006).

본 연구에서는 최근 충북 제천일대에서 강한 집중호우로 인해 발생한 토석류재해지역을 대상으로 토석류 저감대책 수립 시 기본이 되는 토석류 발생량을 분석하기 위해 토석류 해석 프로그램인 Kanako-1D를 이용하여 토석류발생을 모의하였다.

### 1. 강우현황

국내 토석류 발생지역의 경우 대부분 신속한 피해지 처리 및 복구가 이루어져 토석류 조사 및 모니터링 연구를 위한 대상지역을 선정하기 어려운 실정이다. 본 연구의 대상지역으로 선정된 제천시 인근 토석류 피해 발생지역은 2009년 7월 14일 최대시강우량 64mm/hr(제천시 봉양읍)의 집중호우로 인해 제천시 일대에 다수의 토석류 피해가 발생한 지역이다. 이 지역은 다수의 피해지 가운데 인명이나 재산상의 피해가 적어 피해복구가 늦추어진 현장으로 토석류 연구에 적합한 지역으로 판단되어 조사를 수행하였다.

<그림 4>는 2009년 7월 7일부터 15일 까지 있었던 강우사상에 대해 연구지역과 인접한 백운관측소에서 관측한 시강우와 누적강우 그리고 토석류가 발생한 14일의 강우사상에 대한 유출량을 나타낸 것이다. 제천지역의 연평균 강우량은 1,315mm로 7월에 약 25% 8월에 약 20%의 강우가 집중되어 7-8월에 연강우량의 절반가량이 집중된다. 백운관측소에서 관측한 7월 7일부터 15일 까지 약 일주일간의 누적강우량 456mm는 제천지역 연강우량의 약 34%에 해당하는 강우량으로 매우 강한 집중호우가 발생한 것으로 분석되었다. 재해발생지역은 사전에 발생한 9일(83mm), 12일(160mm)의 강우로 인해 토양이 포화상태에 도달하고 연이어 14일부터 발생한 최대 강우강도 64mm/h의 집중호우(204mm)로 인해 증가한 유량에 의해 계곡부의 하상과 좌우측면이 침식 및 붕괴하여 토석류가 발생하였다.



<그림 4> 연구지역(백운관측소) 시강우/누적강우 및 유출량

※ 자료: 김남균 (2001).

### 2. 현장조사

<그림 5>는 대상지역의 토석류 발생 전과(좌) 후의(우) 모습을 표현한 것이다. 봉양읍 일대의 토석류 발생지 현장조사 결과 수로형 침식<사진>(좌)과 사면형 침식<사진>(중)을 동반한 토석류로 판단되었으며 퇴적층 단면에서 확인한 하상재료의 구성으로 볼 때 입경이 큰 석력형 토석류임을 알 수 있다. 이 지역은 집중호우로 인해 늘어난 유량이 인위적으로 우회시킨 수로를 월류하여 임시 도로로 환

용하던 기존 하천을 따라 흐르면서 토석류로 발전하며 피해를 발생시켰다.



<그림 5> 제천 봉양읍 토석류 발생지 전·후 항공사진



<그림 6> 제천 봉양읍 토석류피해 현장사진

## II. Kanako-1D 모형

Nakatahi, *et al.*,(2007)는 GUI 기능이 탑재된 토석류 해석프로그램인 Kanako를 MS Visual Basic.NET 기반으로 개발하였다. 이 프로그램은 계곡에서의 토석류 흐름을 질량 및 운동량 보존식 그리고 침식/퇴적 속도식을 이용하여 1차원으로 해석하고 중력식 콘크리트 사방댐(closed type), 슬릿 사방댐(slit type), 스크린 사방댐(grid type)의 3가지 형태의 사방댐 설치에 따른 토석류의 거동을 모의할 수 있다.

### 1. 지배방정식

Kanakano-1D 프로그램은 식(1)의 운동량방정식을 지배방정식으로 하여 토석류를 해석한다.

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial vM}{\partial x} = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_b}{\rho_m} \quad (1)$$

토석류의 총 체적에 관한 연속식은 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = s_T \quad (2)$$

식(3)은 유사입자에 대한 연속식을 나타낸 것이다.

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial CM}{\partial x} = C_* s_T \quad (3)$$

Kanakano-1D는 큰 입경과 작은 입경 두 가지의 유사입자를 모의할 수 있는데 이는 슬릿형이나 스크린형 사방댐을 모의할 때 큰입경의 입자가 사방댐에 의해 차단되는 현상을 할 수 있게 한다. 또한 다음의 식(4)를 이용하여 하상의 침식과 퇴적에 의한 변화를 나타낼 수 있다.

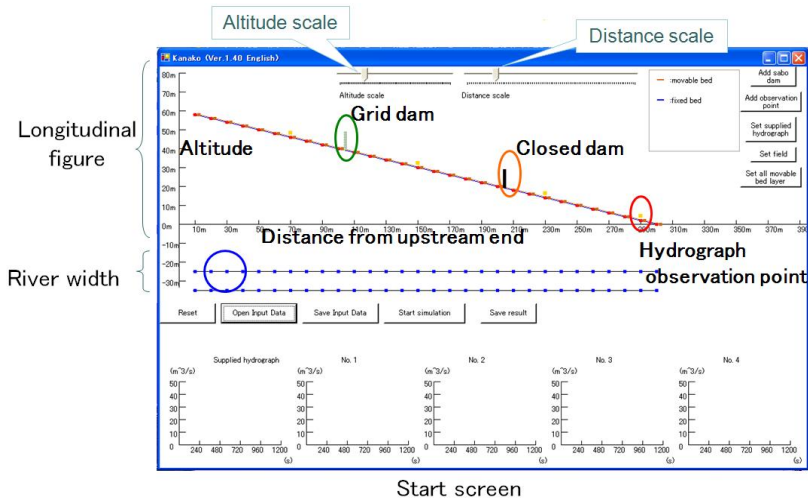
$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = -s_T \quad (4)$$

여기서,  $h$ 는 유동심,  $g$ 는 중력가속도,  $v$ 는 유속을 나타내며 토석류 혼합물질의 유량  $M$ 은  $M = vh$ 로 나타낼 수 있다. 토석류의 밀도는  $\rho_m = (\sigma - \rho)C + \rho$ 로 나타낼 수 있는데 여기서  $\rho$ 는 간극의 채우는 물의 밀도,  $\sigma$ 는 입자의 밀도를 나타낸다. 운동량방정식(1)에서의  $H$ 는 수면고를 나타내는데 이는 하상고  $z_b$ 와 유동심  $h$ 를 이용하여  $H = h + z_b$ 와 같이 나타낼 수 있다.  $s_t$ 는 침식/퇴적속도를 나타낸다.  $s_t$ 가 0보다 클 때 침식이 이뤄지며 0미만일 경우 퇴적의 형태를 가진다. 토석류의 농도는 토사입자의 체적을 총 체적으로 나눈 체적유사농도를 사용하였다. 토석류의 체적유사농도  $C$ 는 이동상에서

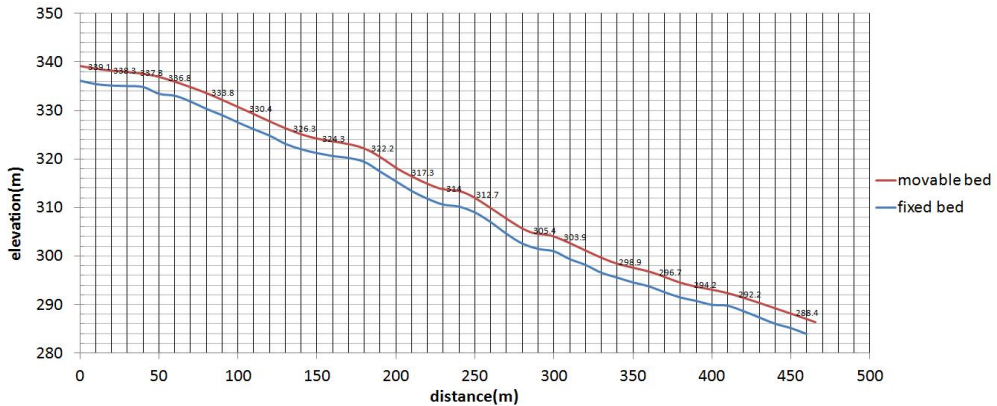
평형유사농도  $C_*$ 가 된다. 또한  $\tau_b$ 는 하상전단응력을  $t$ 는 시간이다.

## 2. 입출력자료

<그림 7>은 Kanako-1D의 입출력 환경을 나타낸 것이다. 이 프로그램은 화면상에서 하상의 표고, 하폭, 사방댐의 종류 및 위치, 모니터링 지점의 추가와 제거 등의 쉽게 제어할 수 있으며 지정된 형식의 텍스트문서로도 조절할 수 있다. 연구지역은 총 유역면적 1.22km<sup>2</sup>, 최고고도 680m, 평균고도 464m 및 평균경사 22도이며 산지를 제외한 토석류 발생지역의 평균경사는 약 12도로 완만한 경사를 가진다. 모의수행하천에 대한 하상고도를 <그림 8>에 나타내었다. 토석류 모의에 필요한 입력변수는 총 21개이며 본 연구에 사용한 대표적인 변수 13개에 대한 값을 <표 1>에 나타내었다.



<그림 7> Kanako-1D 사용자환경 구성



<그림 8> 토석류 발생구간의 하상고도 및 퇴적두께

토석류의 발생 시점은 강우강도가 최대에 도달하였을 때 발행하였다고 가정하였다. 최대 강우강도는 2009년 7월 14일 19시경 발생한 64mm/h이며 유역이 작고 비교적 단순하여 합리식을 이용한 유량을 산정하였다.

$$Q = 0.2778CIA \quad (5)$$

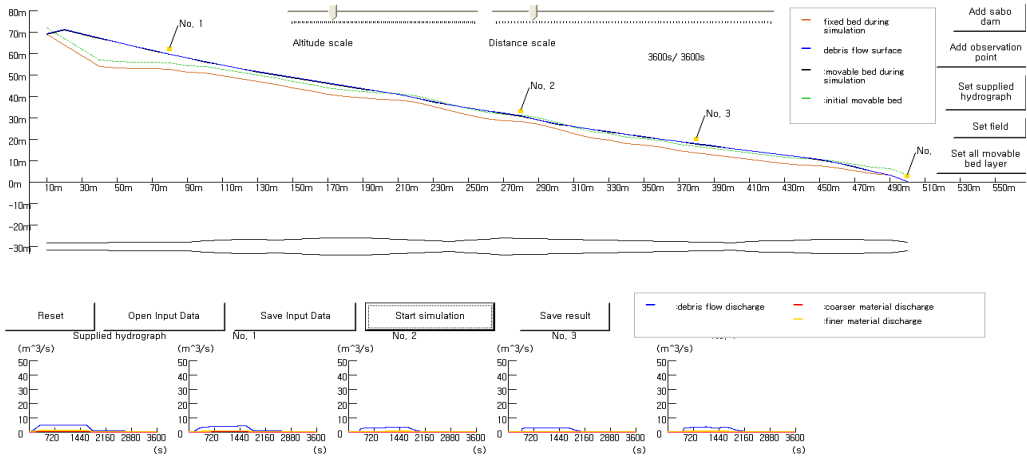
여기서,  $Q$ 는 유량,  $C$ 는 유출계수,  $I$ 는 강우강도,  $A$ 는 유역면적이다. 본 연구에서는 Schwab(1971)가 제시한 산지유역의 10-30%경사에서의 유출계수 0.5를 사용하였다. 계산된 최대유량은 10.8m<sup>3</sup>/s이며 모의 시 60분간 공급하였다.

<표 1> 토석류 발생 모의조건

변 수	값	단위
모의시간	3600	s
계산간격	0.01	s
재료의 평균입경	0.12	m
재료의 밀도 $\sigma$	2650	kg/m <sup>3</sup>
간극 유체의 밀도 $\rho$	1100	kg/m <sup>3</sup>
하상퇴적물의 체적유사농도 $C^*$	0.65	
내부마찰각 $\tan\phi$	0.7	
퇴적토사에서 굵은 입경의 체적비	0.3	
퇴적토사에서 가는 입경의 체적비	0.7	
중력가속도	9.8	m/s <sup>2</sup>
침식속도에 관한 계수 $\delta$	0.0007	
퇴적속도에 관한 계수 $\delta'$	0.05	
매닝 조도계수	0.03	s/m <sup>1/3</sup>

### III. 결과 및 분석

제천시의 연구대상지역에 대해 토석류 발생당시의 조건을 적용하여 토석류발생을 재현하였다. Kanako-1D 프로그램을 이용하여 총 60분 동안 최대유량을 유입하여 하류단에 토석의 유출량을 분석하였다. <그림 9>는 Kanako-1D를 이용하여 토석류를 모의한 결과를 나타낸 것이다.



〈그림 9〉 Kanako-1D를 이용한 토석류재해지역의 수치모의 결과

유량의 공급 시 상류지역의 침식으로 인해 유입유량에 체적농도 0.1의 일정 농도를 적용한 결과 상류지역에 많은 퇴적이 발생하였다. 이는 현장조사에서도 상류지역의 많은 퇴적이 조사되어 같은 경향을 보였다. 토석류는 하상의 경사가 15도 미만의 경사일 경우 부분 퇴적의 양상을 나타내며 10도 미만일 대부분 퇴적한다는 것이 일반적이다. 본 연구지역의 경사는 12도 미만으로 상류부의 경사가 완만하여 이에 따른 영향이 잘 반영되었다.

전계원 등(2010)은 수치지도에서 추출한 표고자료와 지상 LiDAR 계측을 통해 얻은 지형자료를 이용하여 동 연구지역에 대한 토석류 발생량을 추정한 바 있다. 침식량과 퇴적량을 〈그림 10〉에 나타내었다. 총 침식량은 24,150m<sup>3</sup>, 퇴적량은 14,296m<sup>3</sup>으로 연구지역에서 발생한 토석류량이 하류로 유출된 양을 9,854m<sup>3</sup>으로 추정할 수 있다. 〈그림 10〉에서 ① 지점은 수로형 토석류 발생지점 ② 지점은 사면형 토석류 발생지점이다.

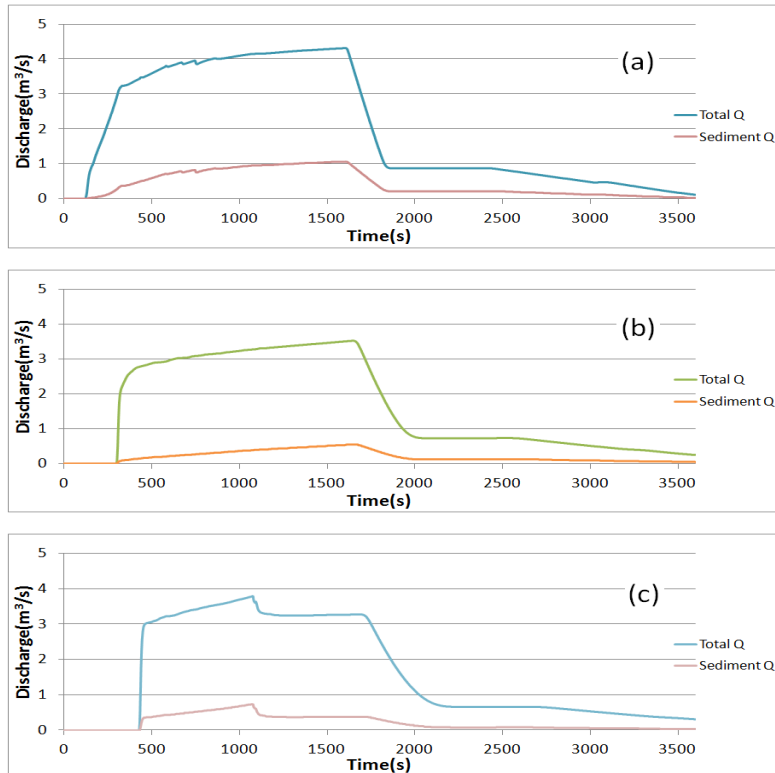
본 연구에서 동 지역의 토석류 유출량을 Kanako-1D를 이용하여 모의한 결과 6,953m<sup>3</sup>로 나타났다. 이는 LiDAR와 수치지도를 이용하여 산출한 토석의 유출량의 약 71%이다.



〈그림 10〉 토석류 발생량 추정량

※ 자료: 전계원 외 (2010).

<그림 11>은 3곳의 관측점에서 통과하는 총 유량과 토석유량을 시계열로 나타낸 것이다. <그림 11>의 (a)는 상류에서 280m 지점, <그림 11>의 (b)는 상류에서 380m 지점 그리고 <그림 11>의 (c) 지점은 마지막 유출부 지점이다. 경사가 갑자기 완만해 지기 시작하는 구간에서 <그림 11>의 (a)와 같이 유량과 토석유량의 변화가 가장 크게 나타난 것을 알 수 있다.



<그림 11> 관측점에서 시간에 따른 총유량과 토석류량의 변화

#### IV. 결론

본 연구에서는 토석류 발생지역을 조사하고 토석류 유출량을 모의하기 위해 침식과 퇴적의 영향을 반영할 수 있는 Kanako-1D를 이용하여 연구대상지역에서 발생한 토석류재해를 재현하였다. 그 결과 Kanako-1D는 시간변화에 따른 관측지점별 총유량과 토석류 유출량의 변화를 모의할 수 있었으며 Kanako-1D로 침식과 퇴적의 영향이 고려되어 모의된 양은 LiDAR와 수치지도를 활용해 얻은 토석류 유출량에 약 71%인 6,953m³로 평가되었다. 향후 토석류 피해지역의 지속적인 조사와 자료수집을 통해 모형의 정도를 높이고자 한다.

## 참고문헌

- 김남균. 2011. FLO-2D를 이용한 토석류의 이동과 확산에 관한 연구. 강원대학교 방재전문대학원. 석사학위논문.
- 소방방재청. 2006. 2006 재해연보.
- 유병욱·장범수·최승일·최우경. 2006. 2006년 고속도로변 토석류피해발생 및 대책. 한국지반공학회. 지반환경학술발표논문집: 115-127.
- 전계원·전병희·안광국·장창덕·김남균. 2010. 지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 산정에 관한 기초연구. 한국지반환경공학회 논문집. 11(3): 63-68.
- Adikari, Y., and Yoshitani, J. 2009. *Global trend in water-related disasters : an insight for policymakers*. UNESCO. 7 place de Fontenoy. 75352 Paris. France.
- Hoyois, P., Below, R., Scheuren, J. M., and Guha-Sapir, D. 2007. *Annual disaster statistical review. Numbers and trends 2006*. CRED. Louvain. Belgium.
- Nakatani, K., Satofuka, Y., Mizuyama, T. 2007. *Development of 'KANAKO' a wide use debris flow simulator equipped with GUI*. Proc. of 32nd Congress of IAHR, Venice. Italy. CD-ROM. 10 p: A2.c-182.
- Schwab, G. O., K. K. Barner, R. K. Frevert and T. W. Edminter. 1971. *Rainfall and Runoff. In Elementary Soil and Water Engineering*. John Wiley & Sons Inc.. New York: 63-81.

---

**張昌德**: 충북대학교에서 수공학석사 학위(논문: “충상 해안대수층에서 해수침투 특성에 대한 정성적 고찰”, 2008년 2월)를 취득하고 현재 강원대학교 방재전문대학원에서 박사과정을 수료하였다. 해안재해, 토석류재해, 재해 수치모형 분야에 관심을 두고 연구 중이다(cdjiang79@kangwon.ac.kr).

**尹永鎬**: 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고, 현재 강원도립대학 건설토목과에서 교수로 재직 중이다. 쇄과대 내에서의 연안류 및 해안재해방재분야에 관심을 가지고 있으며 수리학(2002), 기초수문학(2004)과 항만공학(공저, 2009) 등의 저서가 있다(yhyoon@gw.ac.kr).

**全桂元**: 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 홍수유출과 수질예측을 위한 Web기반 시스템의 개발, 2004. 2), 현재 강원대학교 방재전문대학원 부교수로 재직 중이다. 주요 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).

투 고 일: 2011년 10월 22일

수 정 일: 2011년 10월 31일

게재확정일: 2011년 11월 14일

## Numerical Simulation on Debris Flow Disaster Area using Kanako-1D

Chang Deok Jang, Yong Ho Yoon, Kye Won Jun

Recently because of severe rain storm arising from the climate change, frequency of debris flow is increasing. Occurrence of debris flow causes huge losses of life and property in downstream areas. Also sediment formed by occurrence of debris flow is supplied into mountainous river, which causes the secondary damage such as reduction of cross-sectional area or blocking access routes to the disaster areas. Debris flow is attracting much interest of specialists considering the development process for the use of mountainous area, safety of mountainous road and inflow of earth and sand flowing into the river channel. Therefore debris flow researchers in the world are conducting study in many ways for analysis of debris flow hazard areas and damage reduction. But they have a lot of difficulty studying because of complexity and diversity of debris flow. In this study, Kanako-1D was used among debris flow numerical analysis softwares. And Kanako-1D can reflect erosion and sedimentation and has advantage of convenience for simulation. By using Kanako-1D, the program was applied to the debris flow areas in Jecheon and was compared with debris flow production through field investigation. According to the result, the amount simulated by Kanako-1D was 6,953m<sup>3</sup>, 71% of debris flow discharge gained by using LiDAR and 1:5000 numerical map.

**Key words:** debris flow, 1 dimension numerical simulation, heavy rainfall, Kanako-1D