

## 침식 및 퇴적을 고려한 토석류 모의\*

### Simulation of Debris Flow Considering Erosion and Sedimentation

Sung Duk Kim<sup>\*\*</sup>, Ho Jin Lee<sup>\*\*\*</sup>

<sup>\*\*</sup>Civil Engineering, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, Korea

<sup>\*\*\*</sup>School of Civil Engineering, Chungbuk National University, 52 Naesudong-ro, Heungduk-gu, Cheongju, Korea

#### Abstract

The purpose of this study is to simulate the debris flow considering the erosion and the sedimentation. Currently, the effective method for studying and estimating the debris flow is to use numerical model. Most of numerical models in the published research do not consider the erosion and the sedimentation. In this study, the numerical simulation was performed by using Egashira's method(1997) which is considered the erosion and the sedimentation. The erosion at the channel was dominant until debris flow was reached at the downstream of the channel. As the inflow was increased, the amount of peak erosion was increased, and the occurring point of it more moved down to stream of channel. The fluctuation of debris flow was disappeared after passing through the 40% point of channel length from the upstream.

**Key words:** debris flow, erosion and sedimentation, Egashira's method, numerical simulation

#### 국문초록

이 연구의 목적은 침식 및 퇴적을 고려하여 토석류를 모의하는 것이다. 현재, 토석류를 연구하는 가장 효과적인 방법은 수치모형을 이용하는 것이다. 기존의 수치모형의 대부분은 침식 및 퇴적을 고려하지 못했다. 본 연구에서는 침식 및 퇴적을 고려할 수 있는 Egashira(1997)방법을 이용하여 수치모의를 수행하였다. 토석류가 하류에

---

\* 이 논문은 2013학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

\*\* Tel. +82-10-4235-9264. Fax. +82-43-275-2377. E-mail: soundoug@hanmail.net

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

Submission & Publication Process

Received: July. 9, 2014 / Revised: July. 24, 2014 / Accepted: July. 30, 2014

멈추어 설 때까지는 침식이 우세하게 나타났다. 유량이 증가함에 따라 최대침식 발생량은 증가하였고, 발생위치도 하류로 이동하였다. 토석류의 진동은 상류로부터 수로 길이 40% 지점을 통과한 이후로는 소멸하는 것으로 나타났다.

**주제어:** 토석류, 침식 및 퇴적, Egashira 방법, 수치모의

## 1. 서론

토석류는 흙이나 암석의 혼합물이 물로 포화되어 흘러내리는 현상으로, 일반적으로 집중호우가 자주 발생하는 여름철에 주로 나타난다. 토석류에 대한 국내의 관심은 2000년대 초반까지만 해도 거의 없었으나, 2011년 서울 우면산과 춘천 천전리에서 토석류에 의해 다수의 인명피해와 재산피해가 발생하게 됨에 따라 관심을 갖게 되었다.

토석류 현상에 관심을 갖는 여러 가지 이유 중 가장 중요한 것은 토석류 현상을 제대로 파악함으로써, 토석류에 의한 피해를 경감시키는 것이다. 토석류 흐름을 정확히 모의하기 위한 수많은 연구들이 시도되고 있지만, 토석류 현상 자체가 액체인 물과 고체인 흙과 암석의 혼합물 유동이기 때문에 아직까지 정확한 해석방법이 정립되어 있지 않다. 이와 같은 이유로, 토석류 현상을 이해하기 위한 연구방법은 크게 모형실험을 이용하는 방법, 현장조사를 통한 방법 및 수치모형을 이용하는 방법으로 구분된다.

Iverson, *et. al.*(2011)은 대규모 실험수로에서의 모형실험을 통하여 토석류 발달과정의 메커니즘을 분석하기 위해 다수의 실험을 수행하였고, 전계원 외(2013)는 국내 유일하게 설치된 강원도 평창의 실물실험지역의 현장 조사자료를 이용하여 수치모의를 수행하고, 사방댐 설치 유무에 따른 토석류의 저감효과를 분석하였다. 전병희 외(2014)는 지상 LiDAR 측정장비를 이용하여 우면산 토석류 발생지역을 실측하고, 수치모의결과와 비교분석하였다.

모형실험이나 현장관측에는 고가의 장비와 많은 비용이 소요되기 때문에 토석류 현상을 분석하기 위한 대부분의 연구는 수치모형을 이용한 연구가 주를 이루고 있다. 수치모형을 이용한 기존의 연구를 살펴보면, 현장관측이나 모형실험을 통해 모형의 검증이 이루어지지 않았거나(정승원, 2011; 김성덕 외, 2012) 토석류 흐름에서 반복적으로 발생되는 퇴적 및 침식 현상을 제대로 구현하지 못한 경우가 많았다(O'Brien, *et. al.*, 1993; 채병곤 외, 2010).

본 연구에서는 토석류에 의한 침식 및 퇴적현상을 통합하여 구현할 수 있는 Egashira, *et. al.*(1997)이 제안한 방법을 기초로 수치모형을 구성하였다. 일정경사를 갖는 직선수로에 대해 수치모의를 실시하여, 시간에 따른 침식 및 퇴적의 변화양상을 속도벡터를 이용하여 고찰하였다.

## II. 이론 분석

물과 토사입자의 혼합물인 토석류 흐름을 해석하기 위한 지배방정식은, 흐름의 연속식, 토사입자의 연속식, 물과 토사입자의 혼합물의 운동방정식으로 구성된다.

### • 흐름의 연속식

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla^2 \cdot (\phi h) = E_i \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 수심,  $\phi$ 는 속도포텐셜,  $E_i$ 는 침식 또는 퇴적속도를 나타낸다.

### • 토사입자의 연속식

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \nabla \cdot (c \cdot \nabla \phi h) = c^* E_i \quad (2)$$

여기서  $c$ 는 토사입자의 체적농도,  $c^*$ 는 하상에서 최대 토사입자농도를 나타낸다.

### • 혼합물의 운동방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \cdot \phi h) + \nabla \cdot (\nabla^2 \phi h) = gh(\sin\theta - \cos\theta \frac{\partial h}{\partial x}) - \frac{\tau_b}{\rho_m} \quad (3)$$

여기서,  $g$ 는 중력가속도,  $\theta$ 는 하상경사,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\rho_m$ 는 물과 토사입자 혼합물의 밀도,  $\sigma$ 는 토사입자의 밀도,  $\tau_b$ 는 저면 전단력이다.

물과 토사입자의 혼합물의 밀도는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho \quad (4)$$

토석류의 흐름의 침식 및 퇴적에 의하여 수로바닥의 퇴적토층 두께는 변화하게 되며, 그 관계는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial z_e}{\partial t} + E_i = 0 \quad (5)$$

여기서,  $z_e$ 는 기준수평면으로부터의 퇴적토층의 두께를 나타낸다.

침식 및 퇴적속도를 나타내는  $E_i$ 는 Egashira 등(1997) 제안한 방법으로 나타내면 다음과 같다.

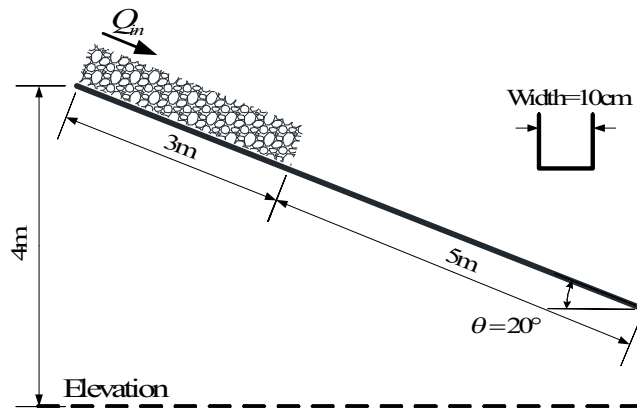
$$E_i = -\nabla \cdot \phi \cdot \tan(\theta_b - \tan\theta) \quad (6)$$

여기서,  $\theta_b$ 는 토사입자의 체적농도  $c$ 에 관한 평형구배를 나타낸다.

### III. 모의결과 및 분석

#### 1. 모의 조건

<그림 1>은 본 연구의 수치모의에서 사용된 수로의 모식도이다. 모의에 사용된 수로는 직선이고 수로의 폭은 10 cm, 경사  $\theta$ 를 갖으며 수로의 길이는 총 8m이고, 상류부 수로 3m에는 포화된 모래가 포설된 것으로 설정하였다. 기준면으로부터 상류부까지의 높이는 4 m로 하고, 상류부 3m 구간에는 평균입경 3.1. mm, 모래입자 밀도는  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , 최대토사입자농도  $c^*=0.65$ 이고, 내부마찰각  $\tan\psi = 0.7$ 인 포화된 모래가 10 cm 두께로 포설된 것으로 가정하였다.



<그림 1>토석류 흐름 수치모의 사용된 수로의 모식도

본 연구에서는 기존 연구의 수리모형 실험에서 적용한 공급유량을 기준으로  $Q_{inflow} = 600 \text{ cm}^3/\text{sec}$ , 와  $800 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 인 2가지 경우로 고려하였으며, 토석류 발생의 하한구배와 근접하도록 사면 경사각도는  $20^\circ$ 를 갖도록 설정하였다.

본 연구에서 모의에 사용된 입력변수들과 모의시간조건을 정리하여 <표 1>에 제시하였다.

<표 1> 모의에 사용된 입력변수 및 모의시간조건

| 입력변수 및 모의시간조건 | 값                      |
|---------------|------------------------|
| 평균입경          | 3.1mm                  |
| 모래입자 밀도       | $2.65 \text{ g/cm}^3$  |
| 최대토사입자농도      | 0.65                   |
| 내부마찰각         | $\tan\psi = 0.7$       |
| 중력가속도         | $9.81 \text{ m/sec}^2$ |
| 유량의 공급시간      | 20 sec                 |
| 모의시간          | 60 sec                 |
| 모의간격          | 0.2 sec                |

## 2. 결과분석

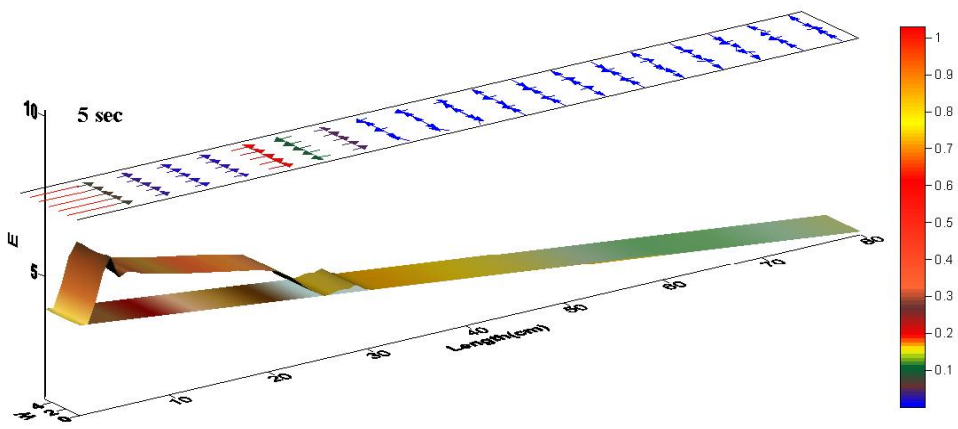
공급유량 변화에 따른 토석류의 침식 및 퇴적의 변화양상을 <그림 2>와 <그림 3>에 도시하였다. 그림에서 (a),(b),(c),(d)는 토석류가 발생할 때 수로 위에서 5초, 10초, 15초, 20초 일 때의 상황을 나타낸다. 그림에서  $x$ (가로) 축은 수로상에서 토석류의 이동거리(cm),  $y$ 축은 침식 및 퇴적을 입체적으로 나타내기 위해 중첩한 것으로 단위를 갖지 않는 무차원이다.  $z$ (세로) 축은 양(+)의 값을 갖는 경우가 침식을 나타내며, 음(-)의 값은 퇴적을 나타내고, 단위를 갖지 않는 무차원 양이다. 그림에서 화살표의 크기는 침식 및 퇴적속도의 크기를 나타내고, 화살표의 방향은 경사면 위에서 아래쪽 방향을 향하는 경우에는 침식을 반대의 방향을 나타내는 경우에는 퇴적을 나타내고 있다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 전체적인 결과가 양(+)의 값을 나타내고 있으므로, 토석류는 하류부에 도달하여 완전히 멈춰서기 전까지는 결과적으로는 침식되는 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만, 위의 화살표 방향을 분석해보면 경우에 따라서 침식과 퇴적이 반복되고 있는 것을 알 수 있고, 하류 쪽에서 화살표의 크기가 감소하므로, 하류로 갈수록 토석류의 속도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 즉, 침식의 속도가 약화될 때는 극히 일부분 퇴적의 양상인 음(-)의 값이 나타나기도 하지만, 그림에서도 잘 파악되지 않을 정도로 그 크기는 미미하다.

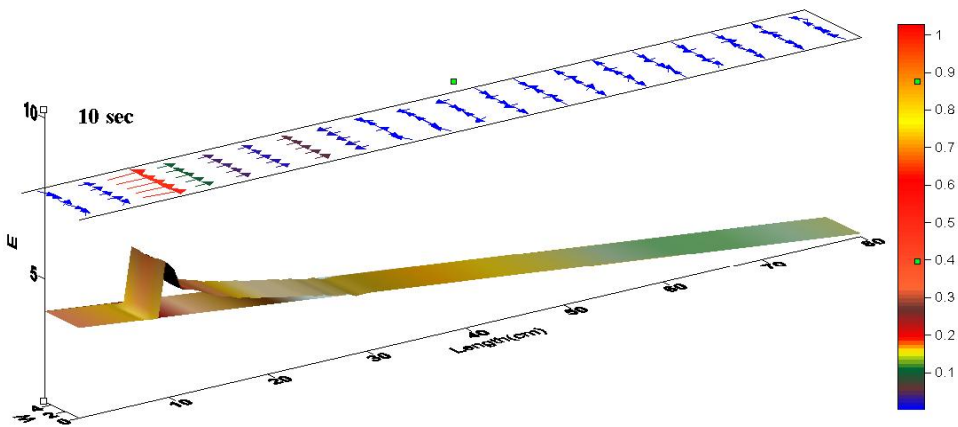
시간에 따른 침식 및 퇴적 양상을 비교해 보면, 토석류 발생초기에 상류에서 대규모의 침식이 발생하고, 시간이 경과함에 따라 대규모 침식 발생위치가 하류방향으로 이동해 감을 알 수 있다. 하지만, 시간이 경과함에 따라 발생규모가 점점 감소하고 있으며, 이것은 이미 상류부 침식이 진행되어 상류에서 공급되는 토사의 양이 감소하기 때문일 것으로 판단된다.

공급유량변화에 따른 침식 및 퇴적 양상을 살펴보면, 유량이 큰 경우가 작은 경우에 비해서 최대침식량이 크게 나타났으며, 침식 및 퇴적의 변화 양상이 상대적으로 뚜렷이 나타나는 경향을 보였다. 최대침식량 발생위치도 유량이 큰 경우가 유량이 작은 경우에 비해서 좀 더 빨리 하류쪽으로 이동해 가

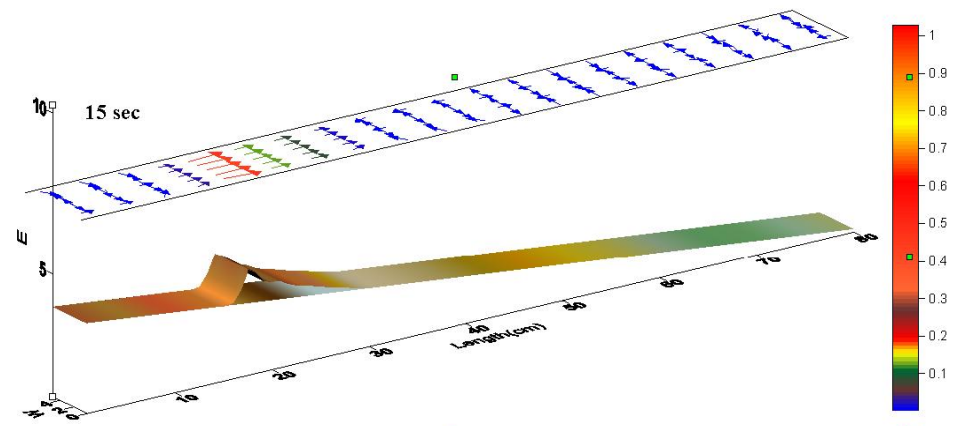
는 것으로 나타났다. 이것은 공급유량이 큰 경우에 토석류 발생량이 증가하여 중력의 영향을 더 크게 받아 더 빨리 이동해 가는 것으로 판단된다.



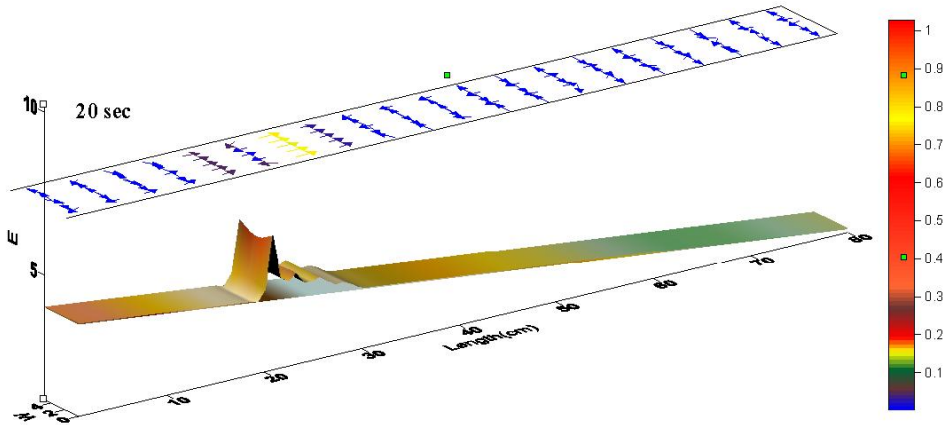
(a)



(b)

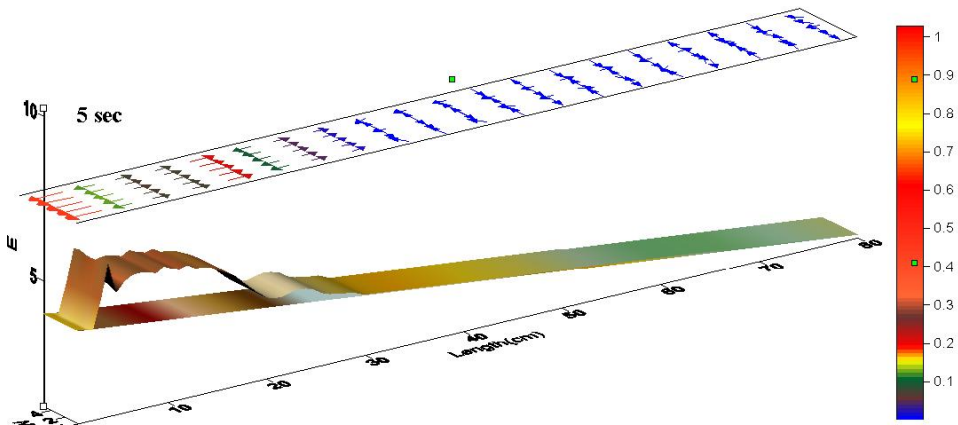


(c)

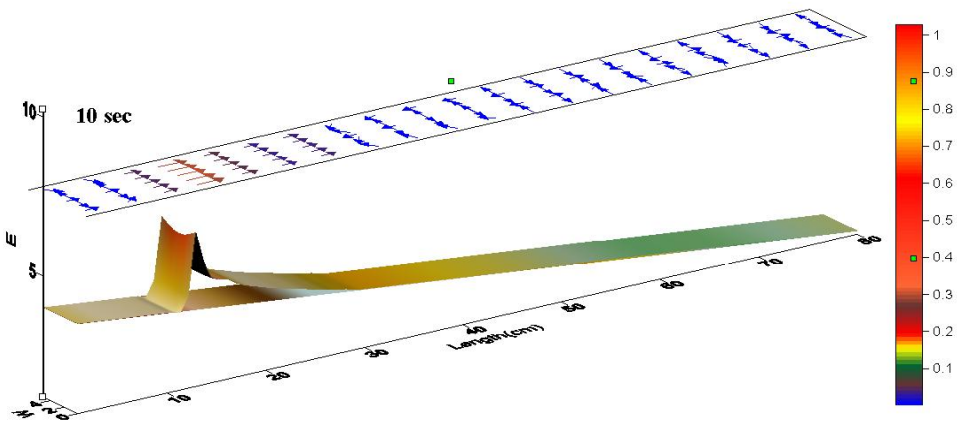


(d)

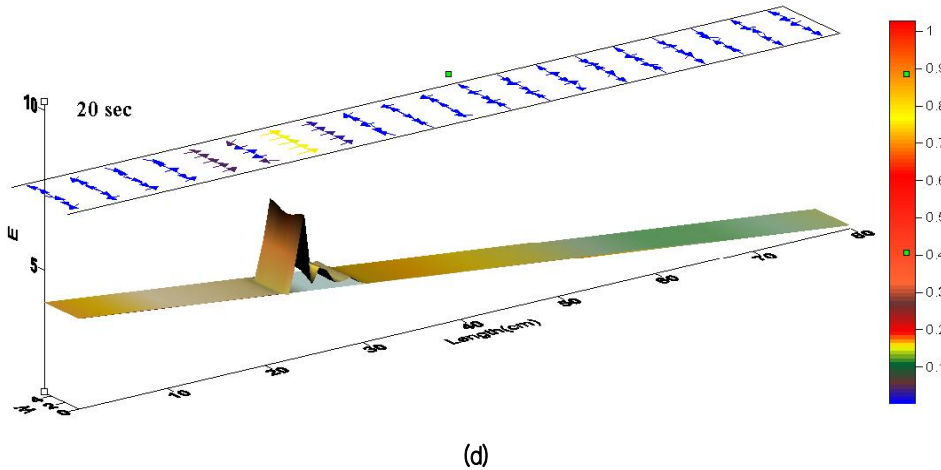
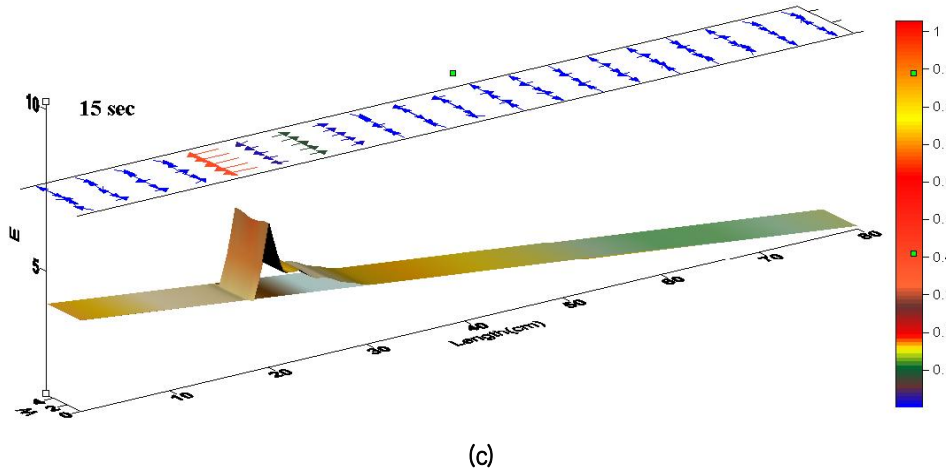
〈그림 2〉 공급유량  $Q_{inflow} = 600 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 인 경우에 시간에 따른 침식 및 퇴적 속도벡터



(a)



(b)

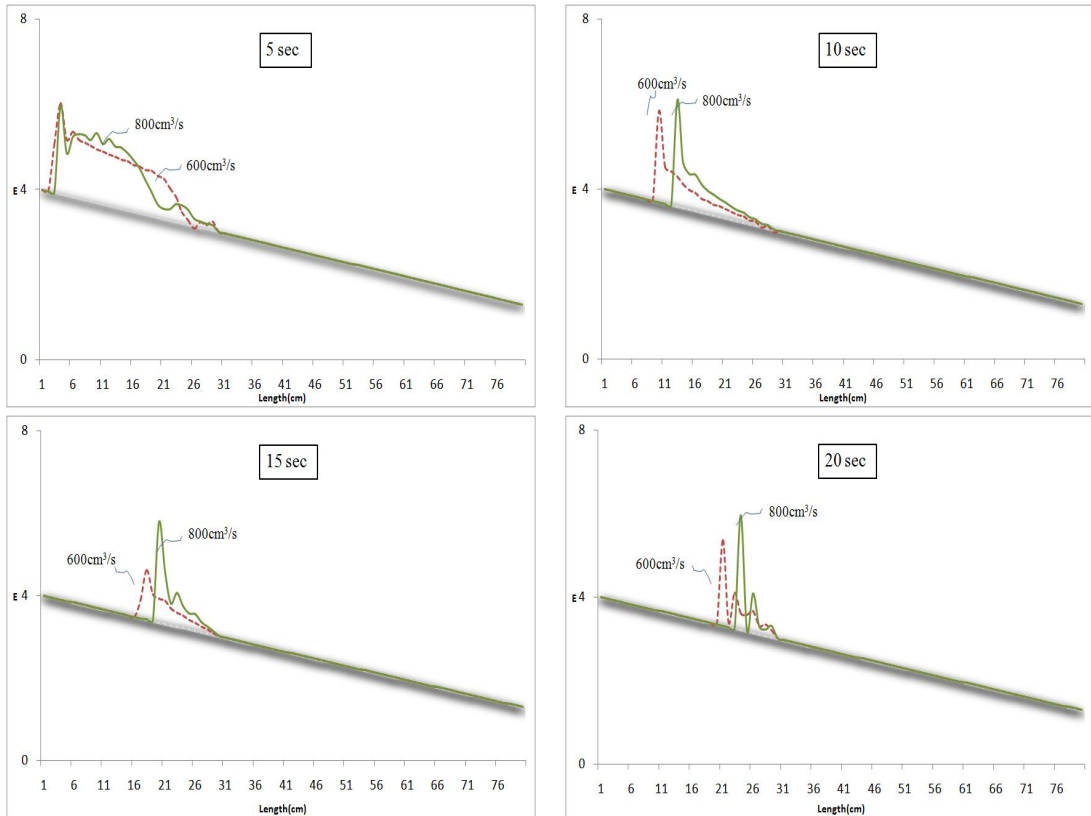


〈그림 3〉 공급유량  $Q_{inflow} = 800 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 인 경우에 시간에 따른 침식 및 퇴적 속도벡터

〈그림 4〉는 유량변화에 따른 토석류의 발생량과 침식 및 퇴적양상을 5초, 10초, 15초, 20초 간격으로 도시한 것이다. 그림에서 가로축은 수로상에서 토석류 이동거리(cm)를 세로축은 토석류의 침식 및 퇴적을 나타낸다. 결과에서 알 수 있는 바와 같이 유량에 따른 초기 토석류 발생량의 차이는 거의 없으나 유량이 큰 경우가 유량이 작은 경우에 비해서, 발생량의 진동이 많은 것으로 나타났다. 〈그림 2〉와 〈그림 3〉에서와 마찬가지로 토석류의 최대발생위치는 시간이 진행됨에 따라 유량이 큰 경우가 유량이 작은 경우에 비해서 하류로 빨리 이동하는 것으로 나타났다. 또한, 상류로부터 전체수로 길이의 약 40%를 지나는 지점부터는 토석류의 진동이 소멸되는 것으로 나타났다.

〈그림 2〉, 〈그림 3〉 및 〈그림 4〉에서 알 수 있는 바와 같이 토석류가 발생하면 침식 및 퇴적을 반복하지만, 상류부에서는 결과적으로는 침식이 되는 경향을 나타내고 있으며, 공급 유량이 클수록 즉, 토석류 발생규모가 클수록 최대토석류 발생지점이 하류로 이동해 감을 알 수 있다. 또한, 유량이 클수록 시간의 경과에도 토석류의 침식 속도 에너지가 줄어들지 않고 있음을 나타냈으며, 이는 많은 양의

토사가 상당한 에너지를 갖으면서 하류로 유하하여 많은 피해를 야기할 수 있음을 본 연구결과로 확인되었다. 즉, 강우강도가 큰 지역에서의 토석류 발생시 토석류가 하류로 유하하면서 계속하여 산지에서의 침식을 야기하고, 침식된 토사와 강력한 에너지의 유체-토사 혼합체가 빠른 운동성을 가지고 유하함으로써 그 피해를 증가시킨다고 사료된다.



〈그림 4〉 유량에 따른 침식 및 퇴적의 시간변화

#### IV. 결론

토석류의 거동특성을 분석하기 위해, 주로 사용되는 수치모의 방법은 토석류 발달과정에서 반복적으로 발생하는 침식 및 퇴적을 고려하지 못하는 경우가 많아 실제와는 다른 해석결과를 내놓은 경우가 있다. 본 연구에서는 토석류 발달과정에서 침식 및 퇴적을 고려하기 위해서 Egashira(1997)가 제시한 방법을 적용하여 토석류 흐름을 수치모의하여 토석류 발달과정에서 침식 및 퇴적 특성에 대해서 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

토석류는 발달과정에서 침식 및 퇴적을 반복하지만, 토석류가 하류부에 도달하여 완전히 멈춰서기 전에는 침식이 퇴적에 비해서 매우 우세하여 상류부에서는 결과적으로 침식이 되는 경향을 나타낸다. 시간이 경과함에 따라 최대침식 발생위치가 하류로 이동해 가며, 상류부 침식으로 인해 공급되는 토사량이 점점 감소하기 때문에 발생규모는 시간이 경과함에 따라 감소한다.

공급유량이 큰 경우가 공급유량이 작은 경우에 비해서 최대침식량이 크게 나타났고, 침식 및 퇴적의 변화양상이 상대적으로 뚜렷이 나타나는 경향을 보였다. 또한, 최대침식량 발생위치도 공급유량이 큰 경우가 시간이 경과함에 따라 더 빠르게 하류쪽으로 이동하는 것으로 나타났다. 따라서, 동일한 지역일 지라도 상류부에서 큰 규모의 토석류가 발생하면 하류부에서 기존의 규모보다 더 큰 규모의 침식이 발생할 수 있으므로, 토석류 방재시설 설치 시 최적설치위치를 결정하기 위한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 김성덕, 윤일로, 오세욱, 이호진, 배우석. 2012. 비탈면 경사 변화에 따른 토석류 거동의 수치모의. 한국지반환경공학회논문집. 13(6): 59-66.
- 전계원, 전병희, 장창덕. 2013. 저감시설의 설치 유무에 따른 토석류 유출량 해석. 한국위기관리논집. 9(3): 17-26.
- 전병희, 전계원, 이승철. 2014. 지상 LiDAR 자료를 이용한 토석류 침식/퇴적 해석. 한국위기관리논집. 10(3): 61-71.
- 정승원. 2011. 세립토 위주의 토석류에 관한 유변학적 모델: 입자크기의 효과. 한국지반공학회논문집. 27(6): 49-61.
- 채병곤, Ko-Fei Liu, 김만일. 2010. DEBRIS-2D를 이용한 인제지역 토석류 산사태 거동모사 사례연구. 한국지질공학회논문집. 20(3): 231-242.
- Egashira, S., K. Miyamoto, and T. Itoh. 1997. *Constitutive Equation of Debris Flow and Their Applicability*. 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation. 340-349.
- Iverson, R. M., M. E. Reid, M. Logan, R. G. LaHusen, J. W. Godt, and J. P. Griswold. 2011. Positive Feedback and Momentum Growth during Debris-Flow Entrainment of Wet Bed Sediments. *Nature Geoscience*. 4: 116-121.
- O'Brien, J. S., P. Y. Julien, and W. T. Fullerton. 1993. Two-Dimensional Water Flood and Mudflow Simulation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 119(2): 244-266.

김성덕: 중앙대학교에서 공학박사(하천 및 해안공학 전공) 학위를 취득하고, 현재 충북대학교 토목공학부에서 시

간강사로 재직 중이다. 주요 논문으로는 “Simulation of Seawater Intrusion Range in Coastal Aquifer using FEMWATER model for Disaster Information”, “사면에서 토석류와 소단폭의 관계성에 관한 연구(2013)” 등이 있으며, 관심 분야는 토석류, 하천 및 해안 방재 등이다(soungdoug@chungbuk.ac.kr).

**이호진:** 충북대학교에서 공학 박사학위를 취득하고, 현재 충북대학교 토목공학부 조교수로 재직 중이다. 주요 논문으로는 “창경궁의 홍수해 위험관리 시스템 개발(2013)”, “사면에서 토석류와 소단폭의 관계성에 관한 연구(2013)” 등이 있으며, 관심 분야는 자연재해, 유사현상, 수공구조물 설계 등이다(hojinlee@chungbuk.ac.kr).