

비탈면에서 토사의 침식 및 퇴적 속도 특성에 관한 연구

The Study for Characteristics of Velocity of Erosion and Deposition of Sediment at the Slope

Sung Duk Kim*, Ho Jin Lee**

Civil Engineering, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, Korea

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

Abstract

This study is to analyze the characteristics of the eroded or deposit sediment using Takahashi's method(1992) based on the Finite Difference Method(FDM), according to the variance of channel slope angle and suppling water discharge. For the case of low slope channel angle, erosion and deposition were occurred alternately at the upstream channel. For the case of high slope angle, erosion was dominant at the upstream channel. Particularly, if the slope angle exceeds 15 degree, which is low limit for the debris flow occurrences, erosion was more dominant than other cases. Whenever water discharge was more supplied into the upstream channel, there was equivalent at the upstream channel compared to low supplying water discharge. This is because the debris flow moves down rapidly to the downstream channel.

Key words: debris flow, erosion and sedimentation, Takahashi's method, Finite Difference Method

국문초록

본 연구에서는 유한차분법을 기초로 하여 Takahashi, *et. al.*(1992) 방법을 이용하여 수로경사 변화 및 공급유량 변화에 따른 토사의 침식 및 퇴적 특성에 대해서 분석하였다. 수로경사가 작은 경우에는 수로의 상류부에서 침식 및 퇴적이 번갈아 가면서 발생하였고, 수로경사가 큰 경우에는 수로의 상류부에서 침식이 우세하게 나타났

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

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

Submission & Publication Process

Received: Sep. 5, 2014 / Revised: Oct. 1, 2014 / Accepted: Oct. 4, 2014

다. 특히, 토석류 발생의 하한계 경사로 알려진 15° 를 초과하는 경우에는 수로경사가 15° 보다 커질수록 침식이 우세한 경향을 나타내고 있다. 수로경사가 급하고, 공급유량이 큰 경우에는 공급유량이 적은 경우에 비해 수로의 상류부분이 거의 평형상태를 이루고 있다. 이것은 공급유량이 크고 경사가 급한 경우에는 발생된 토석류가 빠르게 하류로 이동하기 때문인 것으로 판단된다.

주제어: 토석류, 침식 및 퇴적, Takahashi 방법, 유한차분법

I. 서론

국내에서 토석류에 대한 관심의 최근에 계속되고 있는 토사재해 때문에 고조되었다. 2000년대 이전까지 토석류에 대한 국내의 연구는 학문적인 호기심에 머물러 있었다. 그러나 2011년 우면산 산사태부터 시작된 산사태 및 토석류에 의한 재해는 현재 곳곳에서 발생하고 있으며, 집중호우 시 강우에 의한 침수피해와 더불어 큰 위협요소가 되고 있다.

토사재해를 막기 위해서는 토사재해의 특성을 파악하고, 그에 따른 방재대책을 수립하는 것이 가장 효과적이다. 토사재해를 방지하기 위한 가장효과적인 대책으로 사방댐 설치가 주목을 받고 있지만, 사방댐 설치효과를 극대화하기 위해서는 산사태 및 토석류의 발생량, 이동특성, 이동경로, 입자구성 특성 등 여러 가지 파라미터를 알고 있어야 한다. 이와 더불어, 사방댐 설치 외에 산지의 사면경사 조절 등을 통해서 토사재해의 발생가능성 및 발생량의 감소를 도모하여야 한다.

산사태 및 토석류 같은 토사재해는 눈사태와 같이 초기에 발생하는 규모는 작지만 이동하면서 그 규모가 급격히 증가하기 때문에 그 이동특성 즉, 침식과 퇴적특성을 알아야 정확한 규모와 운동특성을 파악할 수 있고, 그 결과를 분석하여 효과적인 사방댐 설계를 도모할 수 있다(이천용, 2014).

토사의 침식 및 퇴적작용은 그 현상이 매우 복잡하기 때문에 기존의 연구들은 침식 및 퇴적현상을 함께 고려하지 못하고 하나의 현상만 모의하는 문제점을 가지고 있다(김성덕 외, 2012). 침식 및 퇴적현상을 동시에 고려한 연구로서 전병희 외(2014)는 Takahashi, *et. al*(1992)의 방법을 이용하여 우면산 토석류 피해지역을 모의하고, LiDAR 관측자료와 비교하였으며, 김성덕·이호진(2014)는 Egashira 방법(1997)을 이용해서 경사 20° 인 사면에서의 침식 및 퇴적특성을 분석하였다.

본 연구에서는 토사의 퇴적 및 침식 속도 특성을 분석하기 위해서 Takahashi, *et. al*(1992)의 방법을 적용하여 수치모의를 수행하였다. 비탈면 경사를 14° , 16° , 18° , 20° 로 변화시켜가며 비탈면 경사변화에 따른 침식 및 퇴적 특성을 분석하였다.

II. 지배방정식

토사의 침식 및 퇴적 현상은 물과 함께 이동하기 때문에 물 흐름에 관계된 식과 토사의 이동에 관계된 식을 함께 고려하여 모의하여야 한다. 식(1)은 물 흐름의 연속식을 나타낸다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\nabla\phi h) = \delta_i \quad (1)$$

여기서, h 는 수심, ϕ 는 속도포텐셜, δ_i 는 침식 및 퇴적속도를 나타낸다.

토사입자의 연속식은 식(2)와 같다.

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \nabla(c\nabla\phi h) = c_*\delta_i \quad (2)$$

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

물과 토사의 혼합물의 유동특성을 이해하기 위해서는 운동량 방정식을 적용해야 한다. 식(3)은 혼합물의 운동량 보존식을 나타낸다.

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

여기서, g 는 중력가속도, θ 는 하상경사, ρ_m 은 물과 토사 혼합물의 밀도($\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$), σ 는 토사의 밀도, ρ 는 물의 밀도, τ_b 는 저면전단력을 나타낸다. 식(3)에서 λ 의 값으로 Takahashi 등(1992)은 1.25를 제안하였다.

수로 바닥에서 토사의 침식 또는 퇴적에 의한 토사층의 두께 변화를 나타내는 식은 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \delta_i = 0 \quad (4)$$

여기서, z_b 는 기준수평면으로부터의 토사층의 두께이다.

Takahashi 등(1992)은 침식속도식(식(5))와 퇴적속도식(식(6))을 다음과 같이 제안하였다.

$$\delta_i = \epsilon \frac{c_\infty - c}{c_* - c_\infty} \frac{q}{d_m} \quad (c < c_\infty, \text{ 침식}) \quad (5)$$

$$\delta_i = \epsilon \frac{c_\infty - c}{c} \frac{q}{d_m} \quad (c \geq c_\infty, \text{ 퇴적}) \quad (6)$$

여기서, ϵ 는 수치적인 상수, c_∞ 는 평형유사농도, q 는 단위폭당 유량, d_m 은 토사층의 대표입경을 나타낸다. 평형유사농도는 침식과 퇴적을 발생시키는 주요 인자로 작용하며, 수면경사와 하상경사에 영향을 받는다.

토석류 상태의 토사입자 이동에 대해서는 평형유사농도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_\infty = \frac{\rho_m \tan \theta_A}{(\sigma - \rho_m)(\tan \psi - \tan \theta_h)} \quad (7)$$

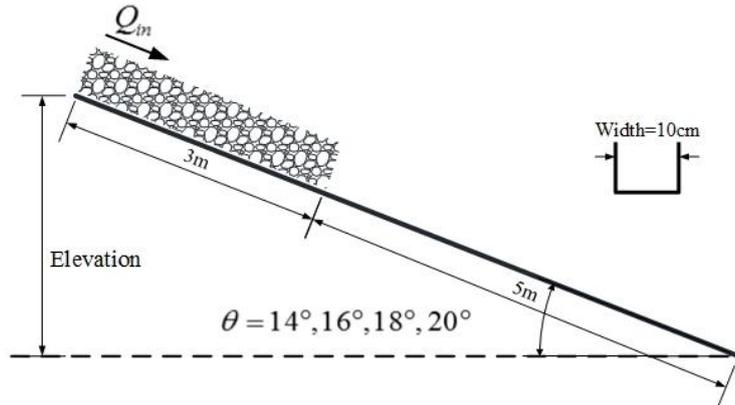
여기서, θ_h 는 수면경사, ψ 는 토사의 내부마찰각을 나타낸다.

III. 모의결과 및 분석

1. 모의조건

토사의 침식 및 퇴적 특성을 연구하기 위해서 <그림 1>과 같은 형태를 갖는 수로를 가정하고 하상 경사를 14°, 16°, 18°, 20°로 변화시켜가며 모의를 수행하였다. 수로의 총 길이는 8 m, 수로의 폭은 10cm 이고, 수로의 상류부 3m 구간에는 모래 10cm 두께로 포설한 것으로 가정하였다. 이 때 모래의 평균입경은 3.1 mm, 모래입자의 밀도는 2.65 g/cm³, 최대토사입자농도 $c_* = 0.65$, 내부마찰각 $\tan \psi = 0.7$ 인 것으로 설정하였다. 또한, 유량의 변화에 따른 특성을 분석하기 위해서 기존의 수리모형실험을 이용한 연구에서 공급유량으로 사용된 $Q_{inflow} = 600 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 와 $Q_{inflow} = 800 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 인 2가지 경우로 가정하였다.

모의를 위해서 유한차분법을 적용하였고, 계산영역은 직교격자계를 기본으로 구성하였다. 또, 시간에 따른 변화를 모의하기 위해서 유량의 공급시간은 20 sec, 계산수행시간은 60 sec, 토석류가 수로의 하류단의 위치에 도달한 이후의 계산시간은 30 sec, 계산간격은 0.2 sec로 설정하였다(Kim, *et. al.* 2013).



<그림 1> 모의에 사용된 수로의 모식도

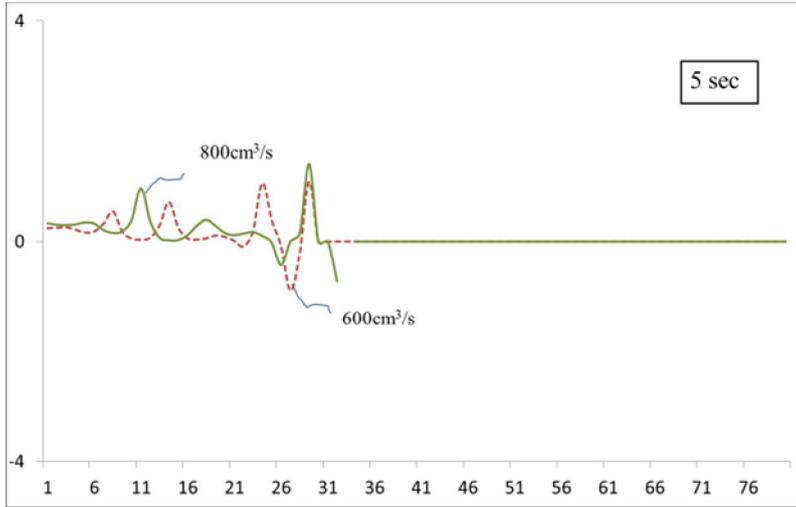
2. 결과분석

<그림 2>와 <그림 3>은 공급유량에 따른 침식 및 퇴적 크기를 도시한 것이다. <그림 2>는 비탈면 경사가 14°인 경우의 침식 및 퇴적 크기를 시간변화에 따라 도시한 것이고, <그림 3>은 비탈면 경사가 20° 경우의 침식 및 퇴적 크기를 시간변화에 따라 도시한 것이다. 그림에서 가로축은 침식 및 퇴적량을 나타낸 것으로 침식은 양(+)의 값을 갖고, 퇴적은 음(-)의 값을 갖는다. 세로축은 수로상의 이동거리를 나타낸다. 침식과 퇴적의 양은 무차원을 사용한다. 또한 그림에서 녹색선은 공급유량이 $Q_{inflow} = 800cm^3/sec$ 일 때 이고, 적색선은 $Q_{inflow} = 600cm^3/sec$ 일 때를 나타낸다.

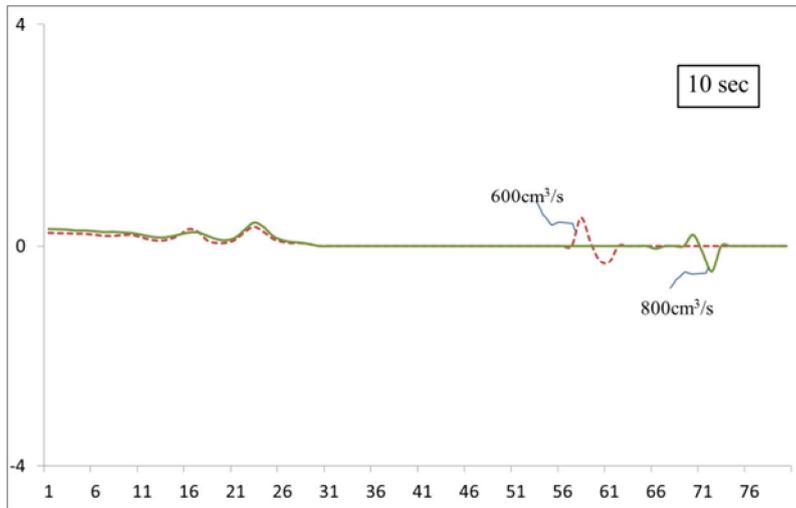
<그림 2>에서 알 수 있는 바와 같이 토석류에 의한 토사의 이동이 발생한 초기에는 큰 규모의 침식 및 퇴적이 번갈아가면서 나타나지만, 발생 후 약 15초 후에는 침식 및 퇴적의 발생규모가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 공급유량에 의한 차이 또한 거의 존재하지 않으며, 시간이 진행함에 따라 수로구간 대부분에 걸쳐서 안정된 상태를 유지하고 있다. 이는 토석류가 하류단에 도달해서 진행할 때, 짧은 시간에 이미 많은 양의 토사를 포함하여 흘러가기 때문에 시간 경과 후에는 토사량의 줄어 들게 되는 것이다.

<그림 3>은 20°인 경우의 수로상의 침식 및 퇴적양상을 도시한 것으로 14°인 경우에 비해 전 시간에 걸쳐 침식이 퇴적보다 우세한 양상을 보이는 것을 알 수 있다. 芦田, et. al.(1976)에서 실험한 것과 같이 토석류 발생 위험도를 15°로 설정하였고, 이것이 일반적으로 토석류 발생의 하한계 경사를 15°로 설정하는 것으로서, 20°인 경우가 14°인 경우보다 토석류가 더 크게 발생하기 때문에 침식이 우세하게 나타나는 것으로 판단된다. 14°인 경우에는 시간이 15sec 이상에서 수로의 상류부분에서는 침식 및 퇴적은 거의 발생하지 않았으나, 20°인 경우에는 15sec 이상에서 수로의 상류부에서 침식 퇴적이 발생하고 있다. 이것은 14°인 경우에는 토석류가 발생한다고 해도 경사가 완만하기 때문에 쉽게 소멸되지만, 20°인 경우에는 경사가 토석류 발생한의 하한계 경사를 넘어서기 때문에 일정기간 토석류 발생이 지

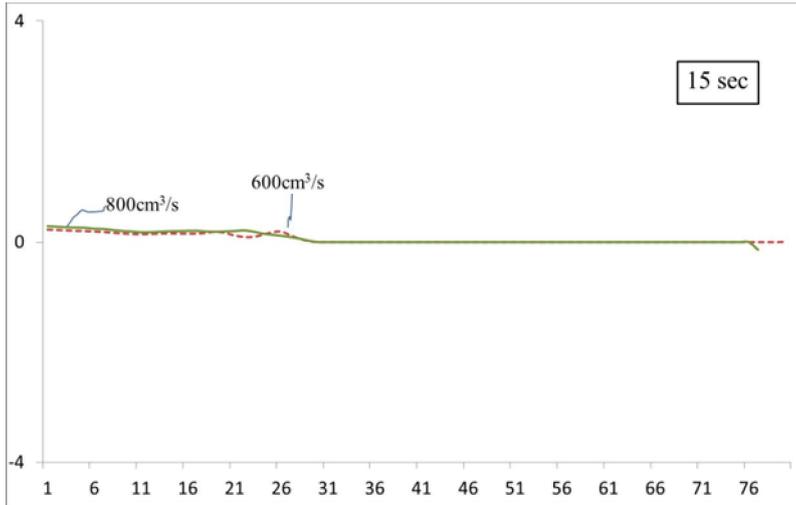
속되기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.



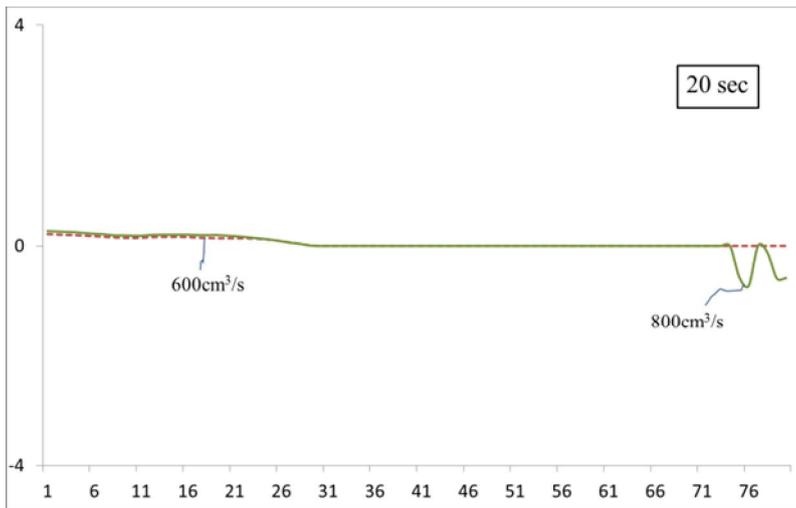
(a)



(b)

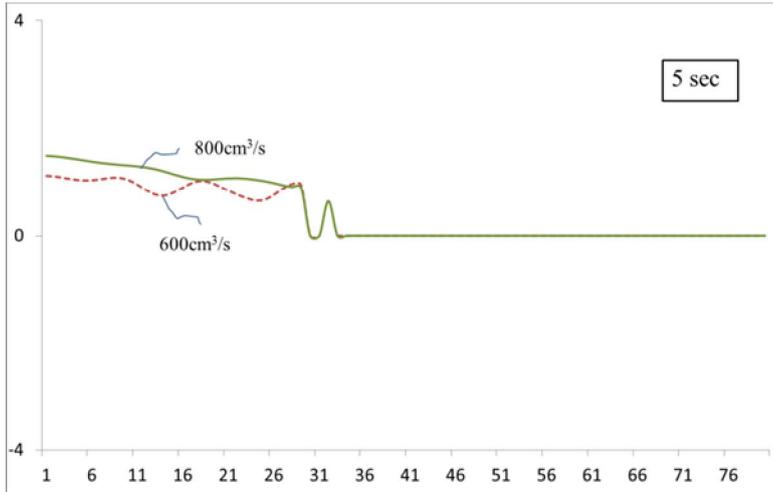


(c)

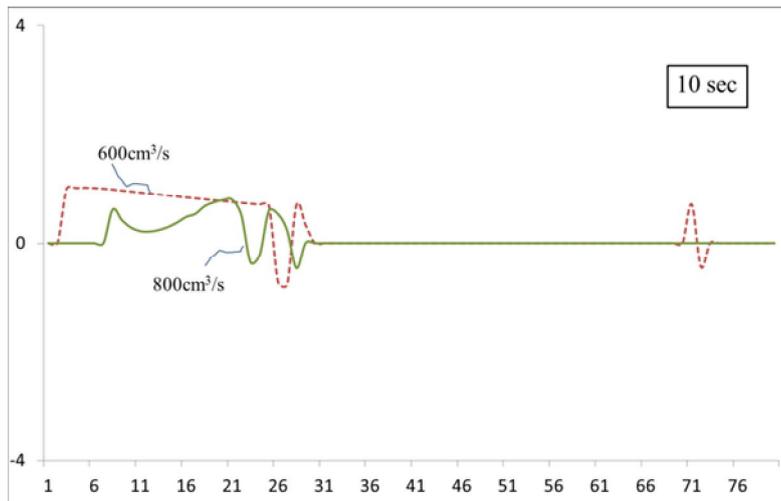


(d)

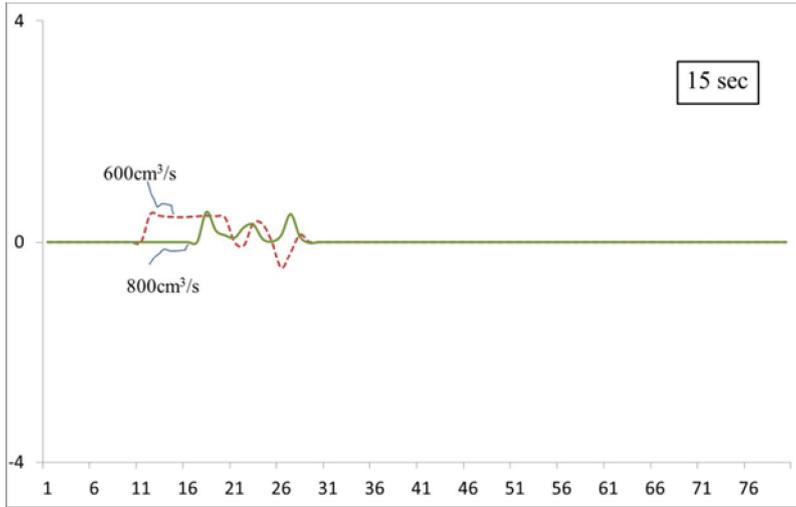
<그림 2> 경사14°인 경우에 유량에 따른 침식 및 퇴적 크기의 변화



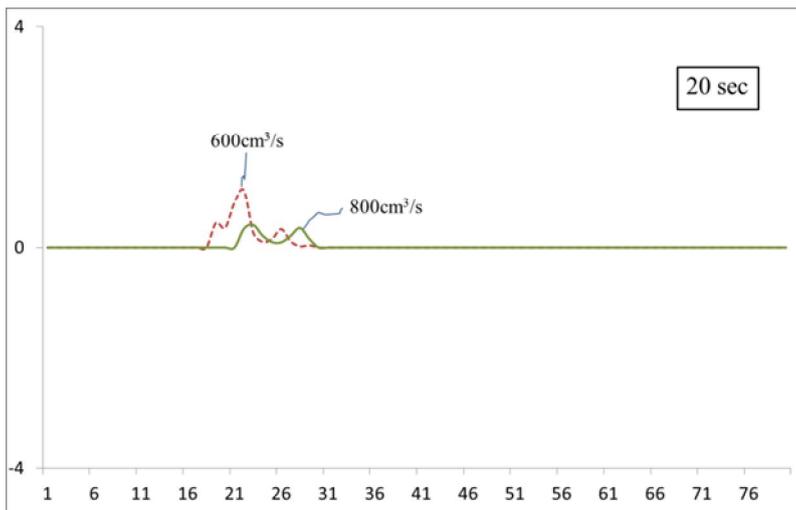
(a)



(b)



(c)

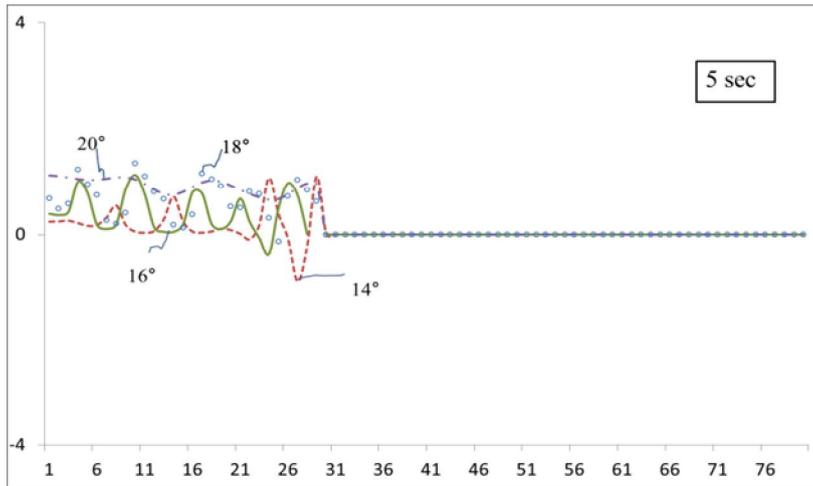


(d)

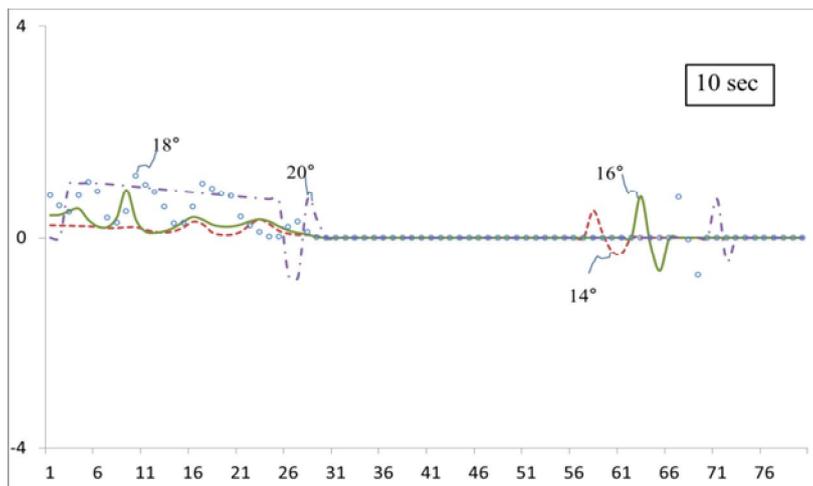
<그림 3> 경사20°인 경우에 유량에 따른 침식 및 퇴적 크기의 변화

<그림 4>와 <그림 5>는 수로의 경사변화에 따른 침식 및 퇴적 크기를 시간에 따라 도시한 것이다. <그림 4>는 공급유량이 $Q_{inflow} = 600\text{cm}^3/\text{sec}$ 인 경우를 도시한 것이고, <그림 5>는 공급유량이 $Q_{inflow} = 800\text{cm}^3/\text{sec}$ 인 경우를 도시한 것이다. 그림에서 각 축은 <그림 2>와 <그림 3>의 경우와 동일한 값을 나타낸다. <그림 4>와 <그림 5>에서 알 수 있는 바와 같이 수로경사가 작은 경우에는 수로의 초반구간에서 침식과 퇴적이 반복되어 발생하지만, 수로경사가 큰 경우에는 침식이 우세하게 나타난다. 또한 시간이 경과함에 따라 15sec 이상인 경우에는 침식 및 퇴적의 크기가 감소함을 알 수

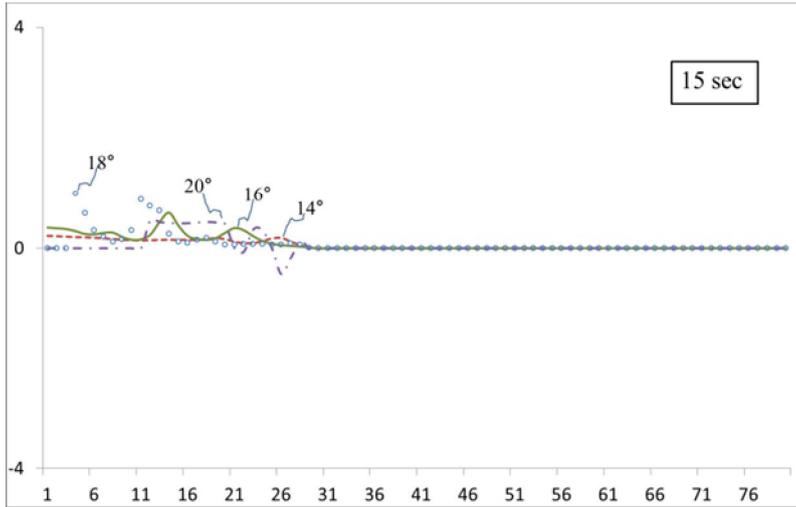
있다. 유량의 변화에 따른 특성을 살펴보면 공급유량이 $600\text{ cm}^3/\text{sec}$ 인 경우에는 시간이 경과해도 경사에 상관없이 상류부 수로에서 침식 및 퇴적이 발생하였지만, 공급유량이 $800\text{ cm}^3/\text{sec}$ 인 경우에는 경사가 20° 인 경우에 거의 평형상태로 접어들고 있다. 이것은 공급유량이 크고 경사가 급한 경우에 발생된 토석류가 빠르게 하류로 이동하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 급경사지에서 대규모의 토석류가 발생하면 토사가 하류로 빠른 속도로 이동하여 하류부에 큰 피해를 발생시킬 가능성이 높아지는 것으로 판단된다.



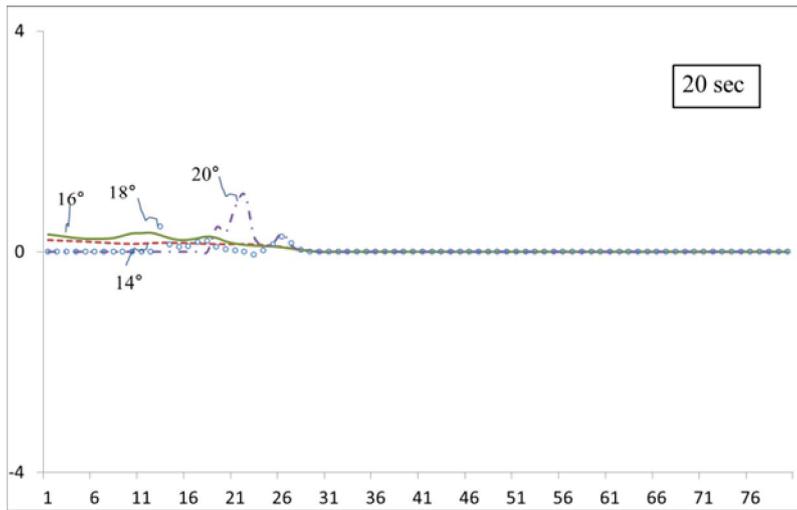
(a)



(b)

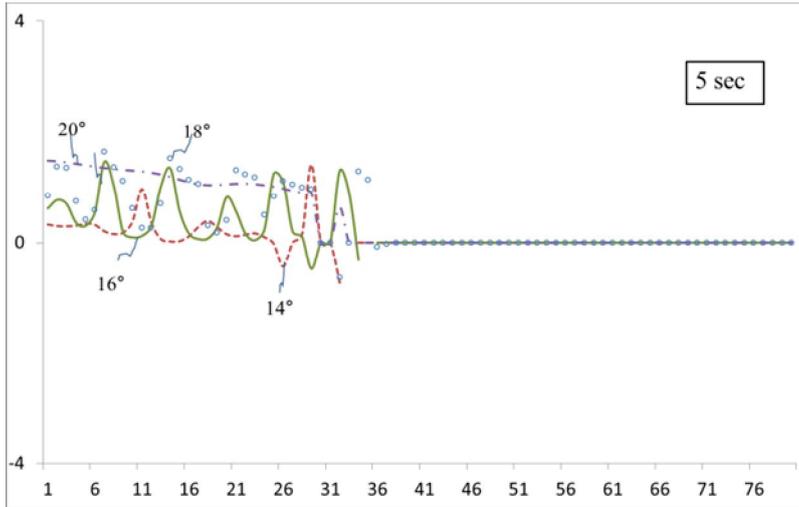


(c)

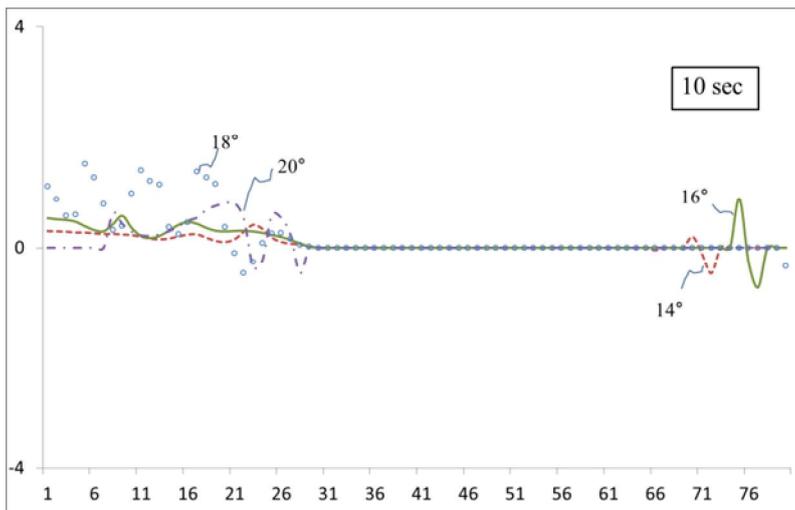


(d)

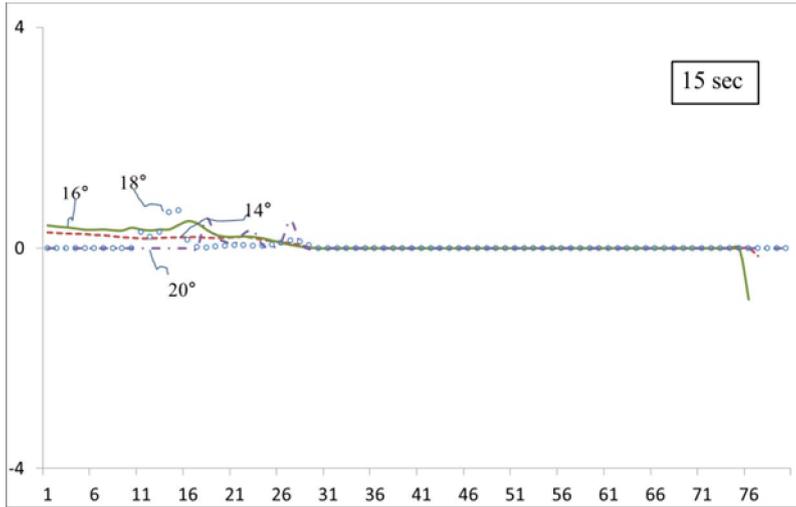
<그림 4> 공급유량 $Q_{inflow} = 600cm^3/sec$ 인 경우에 수로경사에 따른 침식 및 퇴적 크기의 변화



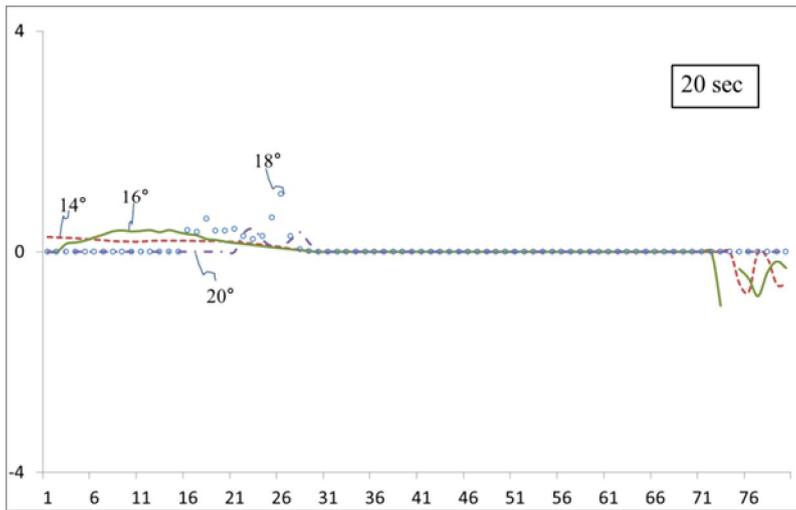
(a)



(b)



(c)



(d)

<그림 5> 공급유량 $Q_{inflow} = 800cm^3/sec$ 인 경우에 수로경사에 따른 침식 및 퇴적 크기의 변화

IV. 결론

본 연구에서는 토석류 발생시 토사의 침식 및 퇴적의 특성을 분석하기 위해서 공급유량과 수로경사를 변화시켜가며 수치모의를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

수로경사가 작은 경우에는 토석류 발생 초기에는 비교적 큰 규모의 침식 및 퇴적이 번갈아 발생하

지만, 수로 경사가 큰 경우에는 침식이 퇴적보다 우세한 양상을 나타내고 있다. 특히, 토석류 발생의 하한계 경사로 알려진 15°를 초과하는 경우에는 경사각도 15°보다 커질수록 침식이 우세한 경향이 더 크게 나타나고 있다. 동일한 수로경사를 갖는 경우, 공급 유량변화에 따른 침식 및 퇴적 크기의 변화가 크게 나타나지 않았다.

전반적으로 시간이 경과함에 따라 15sec 이상인 경우에는 침식 및 퇴적의 크기 변화가 감소하는 경향을 나타냈다. 시간이 15sec 이상 경과했을 때 수로경사가 14°인 경우에는 수로의 상류부분에서는 침식 및 퇴적은 거의 발생하지 않았으나, 20°인 경우에는 15sec 이상인 경우에도 수로의 상류부분에서 침식 및 퇴적이 발생하고 있다. 수로경사가 토석류 발생한의 하한계 경사를 넘어서는 경우 경사가 커질수록 토석류 발생이 지속되기 때문에 일어나는 현상으로 판단된다.

수로경사가 20°인 경우에서 공급유량이 클 때 공급유량이 적을 때보다 수로의 상류부분이 거의 평형상태를 이루고 있다. 이것은 공급유량이 크고 경사가 급한 경우에 발생된 토석류가 빠르게 하류로 이동하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 급경사지에서 대규모의 토석류가 발생하면 토사가 하류로 빠른 속도로 이동하여 하류부에 큰 피해를 발생시킬 가능성이 높아지는 것을 본 연구 결과로 확인할 수 있다.

참고문헌

- 김성덕, 오세욱, 이호진. 2013. 사면에서 토석류와 소단폭의 관계성에 관한 연구. 한국지반환경공학회 논문집. 14(11): 5-12.
- 김성덕, 윤일로, 오세욱, 이호진, 배우석. 2012. 비탈면 경사 변화에 따른 토석류 거동의 수치모의. 한국지반환경공학회논문집. 13(6): 59-66.
- 김성덕, 이호진. 2014. 침식 및 퇴적을 고려한 토석류 모의. 한국위기관리논집. 10(7): 149-159.
- 이천용. 2014. 산지토사재해론. 서울: 구민사.
- 전병희, 전계원, 이승철. 2014. 지상 LiDAR 자료를 이용한 토석류 침식/퇴적 해석. 한국위기관리논집. 10(3): 61-71.
- 芦田和男, 高橋 保, 澤井建二. 1978, 土石流危険度の評価法に關する研究. 京大防災年報. 21(B-2): 423-439.
- Egashira, S., K. Miyamoto, and T. Itoh. 1997. *Constitutive Equation of Debris Flow and Their Applicability*. 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation.
- Takahashi, T., H. Nakagawa, T. Harada, and Y. Yamashiki. 1992. Routing Debris Flows with Particle Segregation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(11): 1490-1507.

김성덕: 중앙대학교에서 공학박사(하천 및 해안공학 전공) 학위를 취득하고, 현재 충북대학교 토목공학부에서 시간강사로 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@hamail.net).

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)” 등이 있으며, 관심 분야는 자연재해, 유사현상, 수공구조물 설계 등이다(hojinlee@chungbuk.ac.kr).