

토석류의 침식 및 퇴적을 고려한 유동층의 거동 분석

Analysis of Liquefied Layer Activities Considering Erosion and Sedimentation of Debris Flow

김 성 덕¹⁾ · 이 호 진[†]
Sungduk Kim · Hojin Lee

Received: February 28th, 2019; Revised: March 14th, 2019; Accepted: March 22nd, 2019

ABSTRACT : Heavy rainfall is in causing debris flow by recent climate change and causes much damage in the downstream. The debris flow from the mountainous area runs to the downstream, repeating sedimentation and erosion, and appears as a fluidized soil-water mixture. Continuity equation and momentum equation were applied to analyze the debris flow with strong mobility, and the sedimentation and erosion velocity with fine particle fractions were also applied. This study is to analyze the behavior of debris flow at the downstream end for the variation of the amount of sediments can occur in the upstream of the mountain. Analysis of sediment volume concentration at the downstream end of the channel due to the variance of the length of pavement of the granulated soils resulted in the higher the supply flow discharge and the longer the length of pavement, the greater the difference in the level of sediment concentration and the earlier the point of occurrence of the inflection point. The results of this study will provide good information for determining the erosion-sedimentation velocity rate which can detect erosion and sedimentation on steep slopes.

Keywords : Debris flow, Erosion, Sedimentation, Sediment volume concentration

요 지 : 최근의 기후변화는 산지가 많은 우리나라에서 토석류를 발생시켜 하류에 많은 재난을 야기하였다. 산지에서 발생한 토석류는 퇴적과 침식을 반복하며 하류로 이동하고, 유동화된 토사-물 혼합물 형태로 나타난다. 이처럼 강한 운동성의 토석류를 해석하기 위하여 연속방정식 및 운동량 방정식을 적용하였고, 퇴적 및 침식에 관한 속도식은 세립사가 포함된 수정형을 적용하였다. 본 연구는 산지 상류부에서 발생 가능한 퇴적토사량의 변화에 대한 하류부에서의 토석류 거동을 분석한 것이다. 조립토사의 포설 길이 변화에 따른 수로 하류단에서 토사체적농도를 분석해 보면, 공급유량이 많고 포설길이가 길수록 토사농도의 고저차가 크게 나타났고, 변곡점 발생 시점도 빨라진 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과는 급경사의 비탈사면에서의 침식 및 퇴적 가능 여부를 알 수 있는 침식-퇴적 속도를 판단하여 토석류 재해에 대한 대책을 세우는 데 좋은 정보를 제공할 것이다.

주요어 : 토석류, 침식, 퇴적, 토사체적농도

1. 서 론

토석류는 기후변화에 의한 집중호우로 인해 주로 산악지형에서 많이 발생하며, 집중호우뿐만 아니라 태풍, 지진, 산사태, 화산폭발, 방하의 빠른 붕괴 등에 의해서도 발생한다(Armanini et al., 2009; Nakagawa et al., 2002). 토석류 현상은 주로 산악지형의 수로에서 발생하여 그 수로의 형태를 따라서 하류로 이동하거나 또는 팬(Fan) 형태로서 지면과 수중을 빠른 속도로 덮어버리는 토렌트의 양상을 갖는다(DeGraff, 1994; Gori & Burton, 1996).

토석류 퇴적에 대한 역학적 모델은 대부분이 퇴적의 현장 관측과 소규모 실험에 의해 수행되었으나 역학적으로 모호

한 부분이 많이 있다. 토석류의 유동성을 해석하는 Rheology Model은 토석류가 일정한 고유 전단강도를 갖는 Bingham 점탄성의 재질로서 운동한다는 것이 제안되었다(Schwab et al., 1996; Blair & McPherson, 1994; Choi & Jun, 2015). 또한, 과잉 간극 수압을 이용한 토석류의 침식 및 퇴적 모델인 Two Phase Model은 입자에 대한 Calibration 없이 사용할 수 있고 토석류가 유하할 때 침식과 퇴적을 반복하는 입자 충돌 형태의 Two Phase Model이 적용되기도 한다(Kim et al., 2012; Kim et al., 2013). 우리나라와 같이 산지가 많고 급경사지가 많은 곳에서는 토석류의 리올로지 형태보다는 입자 충돌에 의한 응력해석 즉, 입자 충돌 응력에 기인한 저항이 중력 작용에 의한 이동 응력을 넘어서는지 아니면

1) Instructor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

† Associate Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : hojinlee@chungbuk.ac.kr)

그 이하로 되는지를 퇴적 또는 침식의 범주로 놓고 해석할 필요가 있다. 토석류 현상을 해석하기 위한 다양한 방법들이 있지만, 우리나라 산악 지형에 맞는 방법을 선택할 필요가 있으며, 본 연구는 유동화된 토사-물 혼합물 형태의 토석류를 라그랑지적으로 고려하여 연속체 성질의 유동체를 레이놀즈 수송이론을 적용하여 연속방정식 및 운동량 방정식을 사용하였고, 급경사지 산악지형에서 침식 또는 퇴적 속도의 반복성을 고려할 수 있고, 입자충돌에 의한 응력을 해석하도록 설계하였다. 본 연구의 퇴적 및 침식 속도식은 Egashira et al.(1997)이 제한한 식에 세립사 항을 추가하여 수정형 침식 및 퇴적 속도식을 적용하였고, 토석류 해석을 위한 수치모의는 시간변화에 대한 토석류 현상을 잘 모의할 수 있는 유한차분법을 사용하였다. 이러한 이론적 배경을 가지고, 수로 상에 포설된 조립토사의 길이변화에 따른 하류단에서의 퇴적토사 농도를 분석하였고, 각각 수로경사변화도 고려하였다. 또한, 공급유량 변화에 따라서 수로 상에서의 퇴적토사 농도를 분석하였고, 침식 및 퇴적의 크기를 시간변화에 따라서 분석하였다.

본 연구의 결과는 다양한 지형 조건에서 토석류 재해를 예측하는 데 좋은 정보를 제공하고, 토석류 방재 구조물 설치를 위한 구조물 제원 설정에도 중요한 정보를 제공할 것이다.

2. 기본이론

토석류는 물과 토사입자의 혼합물이 서로 섞이면서 강한 운동성을 발휘하며 하류로 유하한다. 다양한 외부요인에 의해 발달된 토석류의 입자군은 유체 흐름의 특성에 의존하기 때문에 유체의 검사체적 접근법을 적용할 수 있다. 또한 검사체적 시스템의 시간변화에 대한 특성을 얻기 위해서는 레이놀즈 수송이론이 적용되어 검사체적 접근법의 기본식이 유도된다. 이것은 오일러적 특성과 라그랑지적 특성을 내포하며, 이 검사체적 접근법의 기본식을 통해 연속방정식과 운동량방정식이 유도된다. 토석류 흐름을 해석하기 위해서는 질량보존법칙을 만족하는 흐름의 연속식, 운동량보존법칙을 만족하는 흐름의 운동량방정식 및 정지퇴적층의 질량보존법칙의 연속식을 적용해야 하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

<흐름의 연속식>

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(uh) = E \quad (1)$$

<토사입자의 연속식>

$$\frac{\partial(ch)}{\partial t} + \nabla(cuh) = c_*E \quad (2)$$

$$\frac{\partial\{(1-ch)c_F h\}}{\partial t} + \nabla\{(1-c)c_F uh\} = (1-c_*)c_{F*}E \quad (3)$$

<유체 흐름의 운동량 보존식>

$$\frac{\partial}{\partial t}(uh) + \beta \nabla(\nabla uh) = gh(\sin\theta - \cos\theta \frac{\partial h}{\partial x}) - \frac{\tau_b}{\rho_s} \quad (4)$$

여기서, h 는 수심, u 는 흐름의 단면 평균 유속이며, 수심과 유속의 곱으로 단위폭당 유량을 구할 수 있다. 또한, E 는 침식 또는 퇴적속도, g 는 중력가속도, θ 는 하상경사, c 는 토석류에 있는 토립토사의 체적농도, c_* 는 정지하상에서 조립토사의 최대토사농도, c_F 는 토석류에 있는 세립토사의 체적농도, c_{F*} 는 정지하상에서 세립토사의 최대농도, $\beta=1.25$ (Takahashi et al., 1992), ρ 는 물의 밀도, ρ_s 는 유체와 토사 혼합물 밀도($\rho_s = (\sigma - \rho)c + \rho$), σ 는 퇴적물 입자의 밀도, τ_b 는 저면 전단력이다.

토석류 흐름에서 유체 토사 혼합물에는 조립토와 세립토가 뒤섞여서 하류로 유하하며, 이때 조립토사는 내부 입자충돌로써 에너지를 유지하고, 세립토사는 침입형태의 난류에 의해 유지된다.

퇴적토층의 두께는 수로 바닥에서부터 변화하며 토석류에 의한 영향을 많이 받는다. 퇴적토층의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + E = 0 \quad (5)$$

여기서, z_b 는 기준수평면으로부터의 퇴적토층 두께이다.

토석류는 침식과 퇴적이 반복되면서 하류로 유하한다는 이론은 Takahashi et al.(1992) 및 Egashira et al.(1997)이 제안하였으며, Takahashi et al.(1992)이 제안한 침식과 퇴적 속도식은 각각 Eq. (6)~(9)이며, Egashira et al.(1997)이 제안한 식은 Eq. (10)과 (11)로 나타낼 수 있다. 이때, 침식과 퇴적 속도식은 E 의 값에 따라 결정되는 값으로 만일 E 값이 0보다 크면 침식이 되고, 0보다 작으면 퇴적을 의미한다.

Eq. (6)과 (7)의 침식속도식은 퇴적층의 포화 및 불포화에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다(Kim et al., 2016).

<퇴적층이 불포화인 경우>

$$\frac{E}{\sqrt{(gh)}} = K \sin^{3/2} \theta \left\{ 1 - \frac{\sigma - \rho_s}{\rho_s} c \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta} - 1 \right) \right\}^{1/2} \left(\frac{\tan \phi}{\tan \theta} - 1 \right) (C_{t\infty} - c) \frac{h}{d} \quad (6)$$

<퇴적층이 포화인 경우>

$$E = K' \frac{C_{t\infty}}{c_* - C_{t\infty}} \left\{ 1 - \frac{c}{c_\infty} \frac{\rho_s}{\rho} \frac{\tan \phi - (c_i/C_{t\infty})(c_\infty/c)(\rho/\rho_s)\tan \theta}{\tan \phi - \tan \theta} \right\} \frac{q}{d} \quad (7)$$

여기서, K 와 K' 는 각각 수치적 계수, ϕ 는 토사의 내부마찰각, c_i 는 토석류 중의 전 개체의 용적농도, c_∞ 는 퇴사입자의 평형농도, $C_{t\infty}$ 는 토석류 중의 전 개체의 평형용적농도, d 는 토사층의 대표입경, q 는 토석류의 단위폭당유량이다.

Eq. (8)과 (9)는 퇴적 속도식을 나타내며 다음과 같다.

$$E = a_d \left\{ 1 - \frac{\sqrt{u^2}}{p v_e} \frac{c_* - C_{t\infty}}{C_{t\infty}} \sqrt{u^2} \right\} \quad (8)$$

$$v_e = \frac{2}{5a_L} \left[\frac{g \sin \theta_e}{e \sin \alpha} \left\{ c + (1-c) \frac{\rho_s}{\sigma} \right\}^{1/2} \right] \left\{ \left(\frac{c_{*DL}}{c} \right)^{1/3} - 1 \right\} h^{3/2} \quad (9)$$

여기서, a_d 와 p 는 상수이며, c_{*DL} 은 토석류의 퇴적으로 만들어진 정지하상에서 조립토사의 체적농도, θ_e 는 임계 경사각, α 는 동적 내부 마찰각이며, $\tan \alpha = 0.6$ 이고, e 는 상수로서 Bagnold(1954)가 제안하였다.

본 연구의 토석류 토사농도에 관한 침식 및 퇴적속도식은 Egashira et al.(1997)이 제안한 식을 사용하였으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E = -u \cdot \tan(\theta_b - \tan \theta) \quad (10)$$

여기서, θ_b 는 각 지점에 있는 토석류에서의 토사농도 c 에 관한 평형구배이며, 다음식으로 주어진다.

$$\theta_b = \arctan \left(\frac{(\sigma/\rho - 1)c}{(\sigma/\rho - 1) + 1} \right) \tan \phi \quad (11)$$

전 개체의 평형용적농도와 퇴사입자의 평형농도는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$c_{t\infty} = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (12)$$

$$c_\infty = \frac{\rho_s \tan \theta}{(\sigma - \rho_s)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (13)$$

여기서, ϕ 는 토사의 내부마찰각이다. 만일 토석류의 유동형태가 침류상 집합유동(Kim et al., 2012)이 발생하는 경우에는 평형농도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_\infty = 6.7 c_{t\infty}^2 \quad (14)$$

3. 수치해석 결과 및 분석

3.1 수치 모의

산지에서 발생한 토석류는 침식과 퇴적을 반복하면서 하류로 이동한다. 본 연구는 산지 상류부에서 발생 가능한 퇴적토사량의 변화에 대한 하류부에서의 토석류 거동을 분석한 것이다. 이때 조립토사로 포설된 수로 위로 세립사가 포함된 물을 계속해서 공급하였을 때 수로 위 및 수로 하류단에서의 토석류의 거동을 분석한다. 공급유량은 600cm³/sec과 1,000cm³/sec으로 변화시키고, Fig. 1은 수로상에서의 토사 체적 농도에 대한 본 연구의 수치실험 및 수로상에서의 격

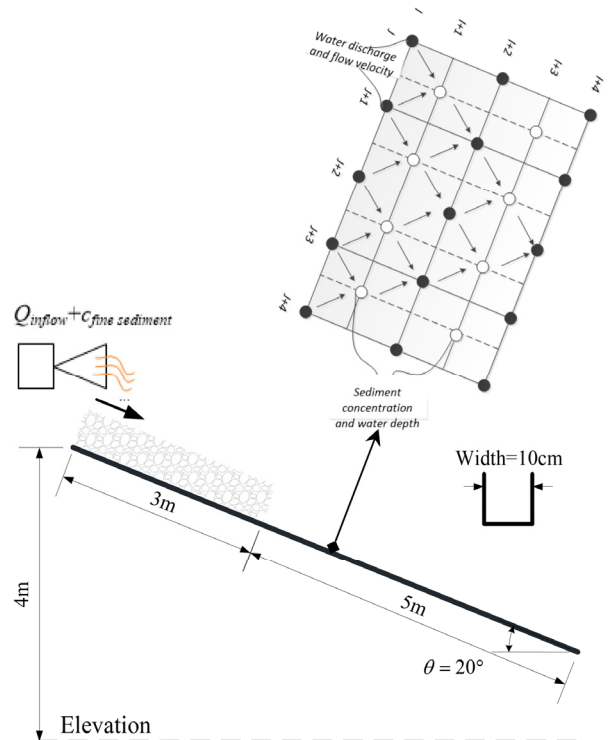


Fig. 1. Schematic design for numerical experiment of debris flow

자를 나타낸다. 수치모의를 하기 위한 수로는 폭이 10cm, 하상 경사각도 θ 는 16°와 20°로 설정하였고, 상류부에 포설된 모래는 포화된 상태이며, 포설 길이는 3m, 4m로 변화시키면서 수치모의를 수행한다. 기준면으로부터 모래가 포설된 상류부까지의 높이는 4m이고, 입자들의 특성에서 조립토사의 평균입경 d 는 3.08mm, 세립토사의 평균입경 d_f 는 0.0084mm, 모래입자 밀도는 2.65g/cm³, 정지하상에서의 조립토사의 농도 c_* 는 65%, 정지하상에서의 세립토사의 농도 c_{f*} 는 35%, 내부마찰각 $\tan\phi$ 는 0.7이다.

최근 기후변화에 의한 집중호우는 예측하기 매우 어려우며, 시간 변화에 대한 변화 폭이 상당히 심하기 때문에 시간 변화에 따른 토석류의 예측은 중요한 이슈가 되고 있다. 따라서 본 연구는 시간변화에 따른 토석류의 변화를 효율적으로 분석하기 위하여 유한차분법(Finite Difference Method(FDM))을 적용하였다. 본 연구의 수치모의는 산지 비탈면 상에서의 위치 레벨과 시간에 대한 시간 레벨을 격자로 나타낼 수 있다. 시간 변화에 따른 하류단 또는 산지 비탈면 상에서의 토석류의 거동은 4가지 형태의 시간 레벨에 따라 분석할 수 있다. 이때 시간에 대한 4가지 형태의 레벨은 시간 간격, 유량의 공급시간, 수치시물레이션 계산 수행 시간, 토석류가 하류단 또는 특정 위치에 도달한 이후의 계산 시간으로 설정할 수 있다(Kim & Lee, 2015).

수치계산을 수행하기 위해서는 상류부 및 하류부 수로상의 계산지점에서 수면경사를 이해해야 한다. Fig. 1에 수로상 수치계산 지점에서의 수면격자를 나타낸다. 이때 수로상에서의 위치 격자의 간격 $dx=10\text{cm}$ 으로 일정간격이고, 수로 상에서의 각 지점은 $I, I+1, \dots, N$ 이다. 상류부 수로에서 모래가 포설된 지점수는 20~40이며, 3m로 포설된 경우의 지점수는 $\sum_{\theta}^{P_{\text{sed sand}}} I=30$ 이고, 이후 하류부까지의 지점수는 $\sum_{\theta}^{\text{stream}} I=50$ 으로서 총 지점수는 $\sum_{\theta}^{\text{total}} I=80$ 이 된다. 이때, 경계면에서는 입력조건이 유리하기 때문에 입력변수인 유량 q 와 유속 u 를 격자의 선상에 배치하고, 토사체적농도 c 와 수심 h 는 격자의 중앙에 배치하여 수치모형을 수행한다.

시간레벨에 대하여 $J, J+1, \dots, N$ 로 격자를 나누며, 격자의 간격 수치모형을 수행하는 데 있어서의 시간 변화(Δt)를 나타낸다. 본 수치모형에서는 시간항(유량 공급시간(t_1)), 수치모형의 계산 수행 시간(t_2), 토석류 도달 이후의 계산 시간(t_3), 계산 시간 간격(t_4)에 대한 입력값의 변화에 대한 토석류의 거동을 재현할 수 있다.

3.2 결과분석

Fig. 2와 3은 수로의 상류단에 포화된 조립토사가 포설될

때, 포설 길이의 변화에 따른 수로 하류단에서 토사체적농도의 변화를 30초간 시간에 따라 도시한 것이다. 토석류 발생 위험 경사가 15°이기 때문에 수로경사는 16°(Fig. 2)와 20°(Fig. 3)로 설정하였으며, 공급유량은 600cm³/sec으로 설정하였고, 이때 공급유량에는 세립사가 포함되었으며 20초간 지속하여 공급하였다. 조립토사의 포설길이는 200cm, 300cm, 400cm의 세 가지 경우로 변화시켰다. 그림에서 가로축은 시간변화를 나타내고, 세로축은 토사농도를 나타낸다. Fig. 2에서 보면, 경사각도가 16°일 때는 포설길이에 관계없이 일정한 농도로 토석류가 유하하는 것으로 나타났다. 반면에 경사각도가 20°(Fig. 3)일 때는 약간의 토사농도 변곡점과 고저차가 나타났다. 포설길이가 200cm 일 때 변곡점은 15초에서 발생하였고, 300cm일 때는 18초, 400cm 일 때는 20초에서 발생하였다. 즉, 포설길이가 길수록 변곡점이 발생하는 시간이 늦춰졌다.

공급유량의 변화에 대한 토사체적농도를 분석하기 위하여, 공급 유량을 증가시켰을 때, 조립토사의 포설 길이의 변화에 따른 수로 하류단에서 토사체적농도의 변화를 분석하였다(Fig. 3 & 4). 수로경사는 16°(Fig. 4)와 20°(Fig. 5)로, 공급유량은 1,000cm³/sec으로 설정하였다. Fig. 3에서 보면, Fig. 2

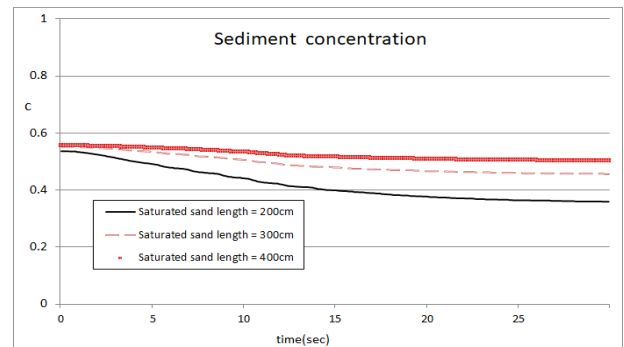


Fig. 2. Sediment concentration at the downstream end varying the sediment supply for channel for $\theta=16^\circ$ and $q=600\text{ cm}^3/\text{sec}$

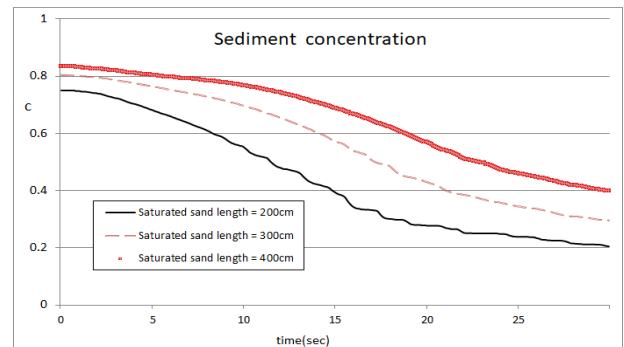


Fig. 3. Sediment concentration at the downstream end varying the sediment supply for channel for $\theta=16^\circ$ and $q=600\text{ cm}^3/\text{sec}$

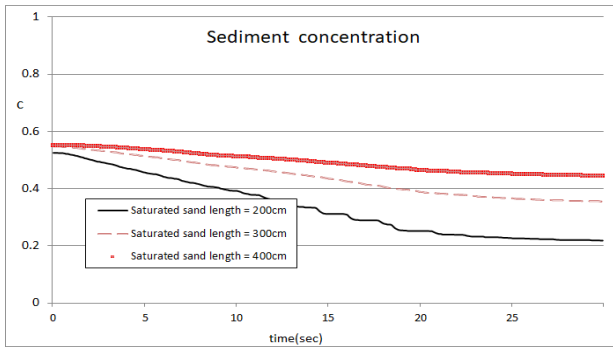


Fig. 4. Sediment concentration at the downstream end varying the sediment supply for channel for $\theta=16^\circ$ and $q=1,000 \text{ cm}^3/\text{sec}$

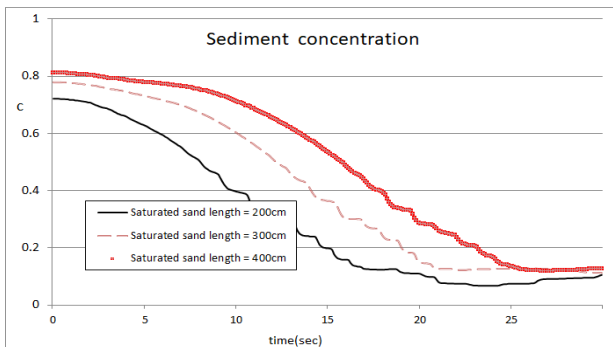


Fig. 5. Sediment concentration at the downstream end varying the sediment supply for channel for $\theta=20^\circ$ and $q=1,000 \text{ cm}^3/\text{sec}$

와 비슷한 경향을 보였지만, 포설길이가 짧은 경우(200cm)에는 약간의 변곡점이 나타났다. Fig. 4(공급유량= $1,000 \text{ cm}^3/\text{sec}$)에서 보면, 토사농도의 고저차가 Fig. 3(공급유량= $600 \text{ cm}^3/\text{sec}$)에 비해 2배 이상 크게 나타났고, 변곡점 발생 시점도 빨라진 것을 알 수 있다. 이때, 포설길이가 200cm 일 때 변곡점은 12초에서 발생하였고, 300cm일 때는 15초, 400cm 일 때는 17초에서 발생하였고, 약 3초 정도 변곡점이 앞당겨져 있는 것을 확인하였다. 이는 집중호우에 의한 강우가 증가할수록, 고농도의 토사가 포함된 토사가 하류로 빠르게 도달하여 하류에 피해를 증가시킨다는 것을 알 수 있다. 즉, 집중호우 증가량은 토석류의 에너지를 증가시켜 토석류의 형태를 소류사 집합운동에서 난류형으로 변화하게 하기 때문에, 토사농도의 변곡점이 발생하는 시점을 파악하여 토사 재해 대책을 세울 필요가 있다.

Fig. 6은 수로경사가 14° 일 때 공급유량의 변화에 따른 수로 상에서의 토사농도의 변화를 도시한 것이다. 가로축은 수로의 길이를 나타내고 세로축은 토사농도를 나타낸다. Fig. 6에서 보면, 공급유량이 많을수록 수로 상에서의 토사 체적 농도의 이동 속도가 빨라지는 것을 알 수 있고, 짧은 시간 내에 고농도의 토사가 하류로 빠르게 도달하는 것을

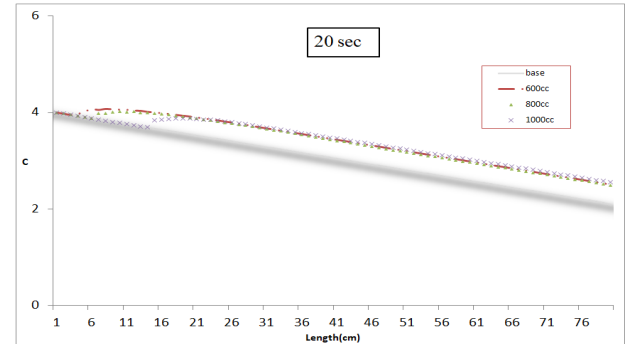
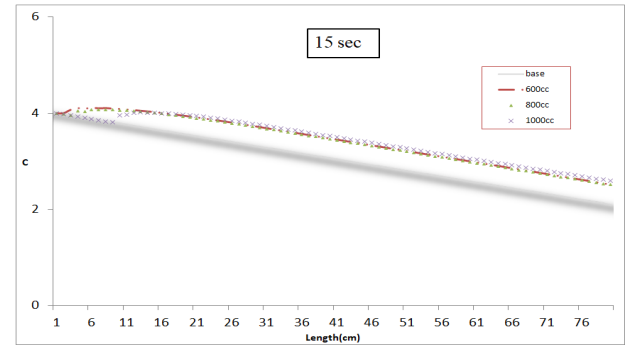
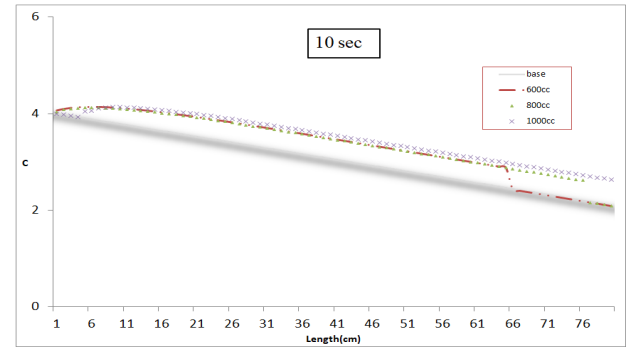
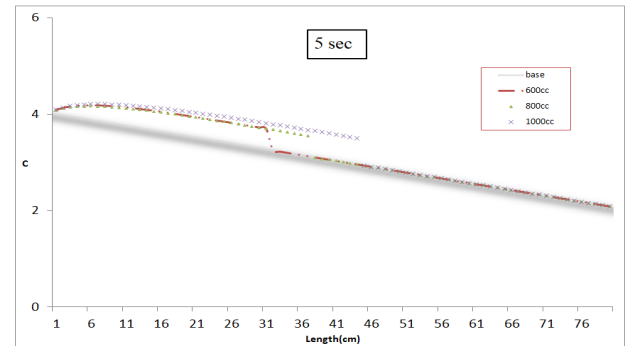
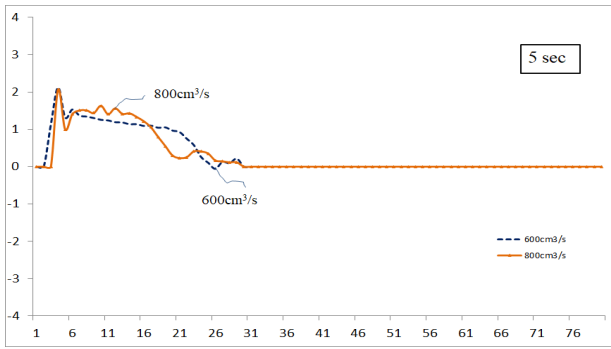


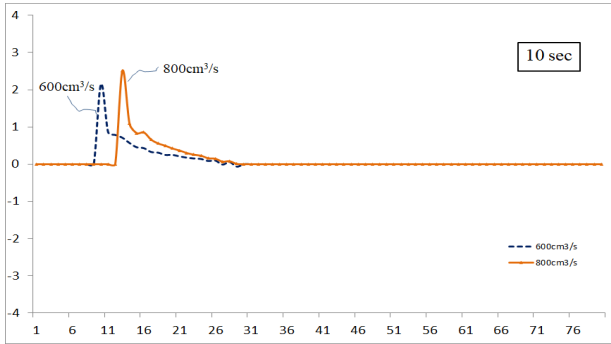
Fig. 6. Sediment concentration on the channel varying water supply with fine sediment fraction for $\theta=14^\circ$

알 수 있다. 따라서, 강우강도 및 강우에 영향을 미치는 인자와 산지 지형의 경사도를 파악하여 고농도의 토석류가 하류에 도달하는 시점을 예측할 필요가 있으며, 이 정보는 토석류 방재에 중요한 정보를 제공한다고 판단된다.

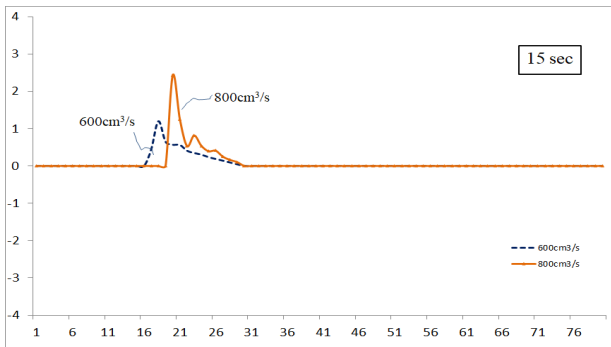
Fig. 7은 Egashira et al.(1997)이 제안한 침식 및 퇴적 속도식을 적용했을 때 수로 상에서의 침식 및 퇴적의 크기를 도시한 것이며, 침식 및 퇴적의 크기는 무차원을 사용한다.



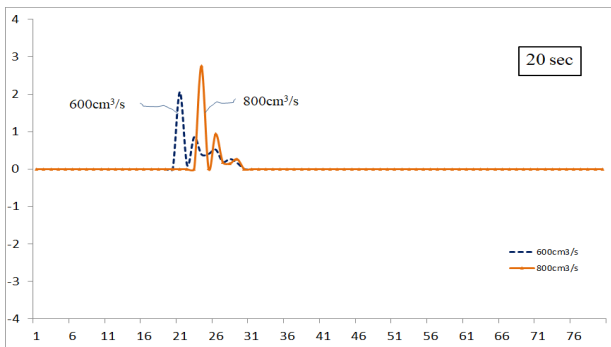
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7. The height of erosion and sedimentation on the channel varying water supply for $\theta=20^\circ$

이때 공급유량은 각각 $600\text{cm}^3/\text{sec}$ 과 $800\text{cm}^3/\text{sec}$ 으로 하였고, 수로의 경사각도는 20° , 상류부에 포설된 조립토사의 길이는 300cm 로 설정하였다. Fig. 7에서 가로축은 수로길이를

나타내며, 세로축은 침식 또는 퇴적 속도의 크기를 나타낸다. Fig. 7(a)에서 보면, 토석류 발생 초기에 상류단에서 큰 규모의 침식이 발생하고 있는 것을 알 수 있고, 공급유량이 클 경우 토사이송 에너지가 커서 침식 더 크게 발생한 것을 알 수 있다. 공급유량이 $600\text{cm}^3/\text{sec}$ 인 경우 15초 지점에서는 약간 소멸하는 듯하였고, 공급유량이 $800\text{cm}^3/\text{sec}$ 인 경우 시간이 경과하더라도 침식의 크기가 줄어들지 않고 수로의 하류부로 이동하고 있는 것을 발견할 수 있다(Fig. 7(c)). 즉, 수로 상에서의 침식의 크기가 줄어들지 않기 때문에 하류단에 고농도의 토석류가 처음 도달한 이후에도 일정시간 지속하여 고농도의 토석류가 계속해서 도달하고 있다는 것을 의미한다.

4. 결 론

최근의 기후변화는 산지가 많은 우리나라에서 토석류를 발생시켜 하류에 많은 재난을 야기하였다. 산지에서 발생한 토석류는 퇴적과 침식을 반복하며 하류로 이동하며, 유동화된 토사-물 혼합물 형태로 나타난다. 이처럼 강한 운동성의 토석류를 해석하기 위하여 연속방정식 및 운동량 방정식을 적용하였고, 퇴적 및 침식에 관한 속도식은 세립사가 포함된 수정형을 적용하였다. 수치모의는 시간변화에 대한 토석류 현상을 잘 모의할 수 있는 유한차분법을 사용하였다.

본 연구는 산지 상류부에서 발생 가능한 퇴적토사량의 변화에 대한 하류부에서의 토석류 거동을 분석한 것이다. 수로 상류부에서 세립사가 포함된 유량의 지속된 공급과 수로 상에 포설된 조립토사의 변화에 따라서 하류단에서의 퇴적토사 농도를 분석하였고, 각각 수로경사변화도 고려하였다. 또한, 공급유량 변화에 따라서 수로 상에서의 퇴적토사 농도를 분석하였고, 침식 및 퇴적의 크기를 시간변화에 따라서 분석하였다.

- (1) 조립토사의 포설 길이 변화에 따른 수로 하류단에서 토사체적농도를 분석해 보면, 경사각도가 16° 일 때는 포설길이에 관계없이 일정한 농도로 나타났고, 반면에 경사각도가 20° 일 때는 토사농도의 변곡점과 고저차가 나타났으며, 포설된 조립토의 길이가 길수록 고농도가 발생하였다.
- (2) 공급유량의 변화에 대한 토사체적농도를 분석해 보면, 공급유량이 많을수록 토사농도의 고저차가 크게 나타났고, 변곡점 발생 시점도 빨라진 것을 알 수 있다. 이는 집중호우에 의한 경우는 토석류의 에너지를 증가시켜 토석류의 형태를 소류사 집합유동에서 난류형으로 변

화하게 하기 때문에, 변곡점 발생시점을 빠르게 만들었다는 것을 의미한다.

- (3) 침식 및 퇴적 속도식을 적용했을 때 수로 상에서의 침식 및 퇴적의 크기를 분석해 보면, 토석류 발생 초기에 상류단에서 큰 규모의 침식이 발생하였고, 공급유량이 증가할 경우 토사이송 에너지가 커서 침식이 더 크게 발생한 것을 알 수 있다. 수로 상에서의 침식의 크기가 줄어들지 않기 때문에 하류단에 고농도의 토석류가 처음 도달한 이후에도 일정시간 지속하여 고농도의 토석류가 계속해서 도달하고 있다는 것을 의미한다.

본 연구의 결과는 급경사의 비탈사면에서의 침식 및 퇴적 가능 여부를 알 수 있는 침식 퇴적 속도를 판단하여 토석류 재해에 대한 대책을 세워야 할 필요가 있음을 보여준다. 또한, 다양한 지형 조건에서 발생한 토석류 재해를 예측하는 데 좋은 정보를 제공하고, 토석류 방재 구조물 설치를 위한 구조물 제원 설정에도 중요한 정보를 제공할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다(No. 2017R1D1A3B03035477).

References

1. Armanini, A., Fraccarollo, L. and Rosatti, G. (2009), Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels, *Computers & Geosciences*, Vol. 35, pp. 993~1006.
2. Bagnold, R. A. (1954), Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proc. R.S. London, Ser. A225*, 49~63.
3. Blair, T. C. and McPherson, J. G. (1994), Alluvial fan processes and forms, in Abrahams, A. D., and Parsons, A. J., eds., *Geomorphology of desert environments*, London, Chapman and Hall, pp. 354~402.
4. Choi, J. H. and Jun, K. W. (2015), Analysis experiment of reduction effect of trees miniature model on debris flow-focusing on the study on making of trees miniature model-, *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, Vol. 16, No. 22, pp. 177~185 (In Korean).
5. DeGraff, J. (1994), The geomorphology of some debris flows in the Southern Sierra Nevada, California, *Geomorphology*, Vol. 10, pp. 231~252.
6. Egashira, S., Miyamoto, K. and Itoh, T. (1997), Constitutive equation of debris flow and their applicability, 1st International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation, ASCE, pp. 340~349.
7. Gori, P. L. and Burton, W. C. (1996), Debris flow hazards in the Blue Ridge of Virginia, U.S. Geological Survey Fact Sheet, pp. 159~96.
8. Kim, C. K., Bak, G. J., Kim, J. C., Song, S. Y. and Yun, J. M. (2013), Prediction of slope hazard probability around express way using decision tree model, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 12, No. 2, pp. 67~74 (In Korean).
9. Kim, S. D. and Lee, H. J. (2015), Assessment of risk due to debris flow and its application to a marine environment, *Marine Georesources and Geotechnology*, Vol. 33, No. 6, 572~578.
10. Kim, S. D., Lee, H. S., Jun, B. H. and Jun, K. W. (2016), The analysis of liquefied-layer of debris flow on the various slope of parallel steep under the environmental soil condition, *Journal of Korean Society of Environmental Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 266~274 (In Korean).
11. Kim, S. D., Yoon, I. R., Oh, S. W., Lee, H. J. and Bae, W. S. (2012), Numerical simulation for behavior of debris flow according to the variances of slope angle, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 13, No. 6, pp. 59~66 (In Korean).
12. Nakagawa, H., Satofuka, Y. and Takahama, J. (2002), Water induced hazard-I, Sub Text Book, M. Sc. in Water Resources Engineering, Institute of Engineering, Nepal, pp. 1~40.
13. Schwab, W. C., Lee, H. J., Twichell, D. C., Locat, J., Nelson, C. H., McArthur, W. G. and Kenyon, N. H. (1996), Sediment mass-flow processes on a depositional lobe, Outer Mississippi Fan, *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 66, pp. 916~927.
14. Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T. and Yamashiki, Y. (1992), Routing debris flows with particle segregation, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 118, No. 11, pp. 1490~1507.