

# 토석류 유동층에서 토사체적 농도 특성에 관한 연구

## The Study of Sediment Volume Concentration in Liquefied-Layer of Debris Flow

김 성 덕<sup>†</sup>  
Sungduk Kim

Received: September 13<sup>th</sup>, 2014; Revised: October 8<sup>th</sup>, 2014; Accepted: November 4<sup>th</sup>, 2014

**ABSTRACT :** The purpose of this study is to estimate the sediment volume concentration of the liquefied-solid mixture which is included fine sediment fractions, according to the variance of the channel slope and the water supply. The numerical model was performed by using the Finite Differential Element Method (FDM) based on the equation for the mass conservation, momentum conservation and the equation of coarse sediment and fine sediment. In comparison of varying the channel slope, the deeper the channel slope, the inflection point of the sediment concentration was occurred rapidly. In comparison of variance of the water supply, as the water supply increases fluctuation with high sediment concentration. In this situation, debris flow changes to the turbulent flow and the sediment becomes to be floated. In comparison varying the length paved saturated sediment, the longer the length, the high concentration of sediment occurred, for the safety of the slope it is needed to check the possibility of the erosion in the slope by debris flow. The results of this study will provide useful information in predicting of the disaster by the liquefied-solid mixture and in prevention of the debris flow with various the slope in the mountain side.

**Keywords :** Fine sediment fraction, Coarse sediment fraction, Liquefied-solid mixture, Sediment volume concentration, Finite difference method

**요 지 :** 본 연구의 목적은 산지에서 세립사가 포함된 유동체 혼합물이 다양한 경사 각도를 갖는 수로에서 공급유량의 변화에 따른 토사체적농도를 분석한 것이다. 수치모델은 질량보존 및 운동량 보존에 관한 방정식 그리고 세립토와 조립토 방정식에 기초하여 유한차분법을 이용하여 수행되었다. 비탈 경사면 각도 변화에 따른 토사농도 비교에서 경사가 급할수록 토사체적 농도의 급격한 변곡점이 나타났다. 공급유량의 변화에서는 공급유량이 많을수록 Fluctuation이 발생하였고, 토석류의 상태가 난류형으로 변하여 토사가 부유사 형태로 변화되었다. 이는 토석류의 이동속도가 빠르게 됨을 알 수 있다. 포화된 조립토의 변화에 따른 비교에서는 그 길이가 길수록 고농도가 발생하였으므로 사면 안정을 위해서는 사면에서의 침식 가능 여부를 먼저 판단해야 된다. 본 연구의 결과는 강우 변화에 따른 비탈면 하류단에서의 유동체 혼합물의 토석류에 의한 재해를 예측 및 다양한 경사의 비탈면을 갖는 산지 밑에서의 토석류에 의한 재해에 대한 정보를 제공할 것이다. 또한 사면 안정 시 효율적인 사면 경사각도로 설치하는 것과 사면에서의 침식 방지 등에 있어 토석류와의 관계성 분석 및 토석류 재해를 막기 위한 다양한 대책을 세우는 데 효과적인 정보를 제공할 것이다.

**주요어 :** 세립사, 조립사, 유동체 혼합물, 토사체적 농도, 유한차분법

## 1. 서 론

집중호우는 토석류의 가장 큰 발생 요인으로서 최근 기후 변화로 인하여 집중호우가 자주 발생하고 있다. 특히 우리나라와 같이 산지가 많고 건기와 우기가 뚜렷한 나라는 토석류에 의한 피해가 크다. 이러한 현상을 토석류로 정의 하였고(Swantson & Swantson, 1974), 이러한 토석류는 물에 포화된 굵고 거친 입자의 물질이 빠른 속도로 경사면과 수로, 협곡 등으로 유하한다(Crosta, 2001; Chen et al., 2006). 이러한 재해를 방지 또는 경감하기 위해서는 구조물로 토사 이

동 현상을 컨트롤하거나 지역 특성에 따른 예보 시스템 체제를 정비하고 적어도 피해자가 발생하지 않도록 대책을 세워야 한다. 또한 전체적으로 지역의 안전성을 높이기 위해서는 토사 재해 위험 지도 및 Hazard map을 정비해야 한다. 이러한 것들에 의한 효과를 거두기 위해서는 토석류에 관한 수치 시뮬레이션 프로그램은 매우 유용한 정보가 된다. Wang et al.(2008)은 다양한 방법으로 토석류를 혼합물질 유동의 개념으로서 모델을 제시하여 발전시켰으며, Wang et al.(2008)은 그 모델로서 Newton, Bingham, Herschel-Bulkley, Dilatant, Dispersive stress, Frictional 모델 등을 이용하였다. 한편 침

<sup>†</sup> Department of Civil Engineering, Chung-Ang University (Corresponding Author : soungdoug@hanmail.net)

식과 퇴적 모형을 이용한 방법으로는 Takahashi & Tsujimoto (1984)가 2차원 유한 차분 모형을 제시하였으며 이는 유체 팽창 모델을 기반으로 하고 있다. 또한 Egashira et al.(1997)은 유동체의 혼합물질 흐름에 대한 Newtonian 모형을 제안하였다. O'Brien et al.(1993)은 토석류가 유하할 때의 운동 메카니즘을 퇴적 또는 침식으로 분리한 모델을 개발하는데 통상 토석류는 침식과 퇴적이 반복되어 유하하기 때문에 모델 적용에는 어려움이 있다. McDougall et al.(2003)은 지형에 대한 사면파괴를 모의하는 수심평균모델(Depth averaged model)을 개발하였다. Calligaris et al.(2008)은 이탈리아 알프스지역에 대한 수치프로그램을 이용하여 토석류를 모의하였다. Martinez et al.(2008)은 천해방정식에 Non-Newtonian Bingham 모형을 이용하여 토석류를 해석하였고, 이것을 유한 요소법으로 해석된 결과와 비교·분석하였다. Nakatani(2008)는 Takahashi et al.(1992)이 개발한 침식/퇴적 모형을 이용하여 수심평균 1차원 모형의 사망뎀을 고려할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 인도네시아 Cipanas 지역에 적용하였다. Armanini et al.(2009)은 침식이 가능한 산지 소유역에 대한 편미분 방정식을 2차원 Godunogo-type으로 풀었고, 공간에 대해서는 유한체적법을 이용하여 모형을 설정하였으며, 재해지도에서의 재해예측에 대한 활용성에 대해 검토하였다. 국내에서는 Paik & Park(2009)이 2차원의 유한체적법을 이용한 수치모형을 개발하여 토석류 흐름을 재현하였으며, Jun et al.(2014)은 Takahashi et al.(1992)의 방법을 이용하여 우면산 지역에서의 피해지역을 수치모의 하였다. 또한 Kim et al.(2012)은 Takahashi et al.(1992)의 방법을 수정하여 비탈 경사면에서의 토석류를 유한차분법으로 수치 모의하였고, Kim et al.(2013)은 침식 및 퇴적이 결합된 Egashira et al.(1997)의 방법을 수정하여 해석하였다. 그러나 기존의 모든 수치해석 연구는 세립사가 포함되어 있지 않은 공급유량을 이용하여 해석하였으나, 본 연구는 세립사를 포함한 유동체로서 수로상에 유하시킬 때의 토석류를 해석한 것이다.

본 연구는 세립사가 포함된 유동체 혼합물이 다양한 경사각도를 갖는 수로 및 공급유량의 변화 등에 따른 토석류 하류단과 수로상에서의 토사체적농도를 평가한 것이다. 비탈 경사면과 토석류의 관계성을 분석하기 위해 우선 상류부에서의 공급유량을 일정하게 한 후 수로의 경사 변화에 따른 하류단과 수로상에서의 체적토사 농도의 변화를 분석하였다. 강우 변화에 따른 토사농도를 비교하기 위하여 비탈 경사면을 일정하게 한 후 공급유량 및 세립토사의 변화에 대한 사면 하류단 및 수로상에서의 체적 토사 농도를 비교하였다. 마지막으로 비탈면에서의 퇴적량과 토석류와의 관계를 비교하기 위해 수로경사와 공급유량을 일정하게 한 후 포설된 조립토사의 길이의 변화에 따른 토사체적 농도를 분

석하였다. 본 연구의 결과는 다양한 비탈 경사면을 갖는 지형에서 비탈면 하류단에서의 토석류에 의한 재해를 예측하는 데 좋은 정보를 제공할 것이다. 또한 강우강도의 변화에 따른 공급유량의 변화에 대비하기 위한 사면 안정 시설물 설치에도 좋은 정보를 제공할 것이다.

## 2. 기본이론

### 2.1 지배방정식

토석류의 유동층을 라그랑지적으로 고려하면, 유동층의 질량, 체적, 밀도 등이 시간적으로 급격히 변화하고 있는 것을 알 수 있다. 이 유동층의 변화에 착안한 형태의 토석류 지배방정식은 질량보존법칙을 만족하게 되며, 토석류의 질량을 검사체적으로 취급해서 레이놀즈 수송이론에 적용하면, Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho_m h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon \rho_m v h) = m \quad (1)$$

여기서  $h$ 는 수심,  $v$ 는 유속,  $\rho_m$ 은 토석류 유동층의 평균 밀도,  $m$ 은 단위시간당 질량변화량(침식·퇴적질량),  $\epsilon$ 는 유동층의 평균 밀도와 관련된 형상계수이다. 토사 입자에 대한 연속방정식을 적용하면 Eq. (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(c_m h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon' c_m v h) = c_s S \quad (2)$$

여기서  $c_m$ 는 유동층의 평균 농도,  $c_s$  퇴적층의 농도,  $S$ 는 침식 또는 퇴적 속도,  $\epsilon'$ 는 유동층의 평균 농도와 관련된 형상계수이다. 토석류 유동층에 운동방정식을 적용하면 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(\alpha \rho_m v h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha' \rho_m v^2 h) = \rho_m g h \sin \theta - \nabla \cdot p - \tau \quad (3)$$

여기서  $p$ 는 압력이고, 수심 방향의 농도를 일정하게 근사시키면  $p = 1/2 \rho_m g h^2 \cos \theta$ 가 된다.  $g$ 는 중력가속도,  $\theta$ 는 하상경사와 수평면이 이루는 각도,  $\tau$ 는 저면 전단력,  $\alpha$ 는 밀도와 속도에 관한 보정계수,  $\alpha'$ 은 운동량 분포에 관한 보정계수이다. Eq. (3)을 간단히 하기 위해서 모든 보정계수를  $\epsilon = \epsilon' = \alpha = \alpha' = 1$ 로 보고, Flux 변화를 Eq. (3)에 적용하면 Eq. (4)와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\rho_m \left\{ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \nabla \cdot (v^2h) \right\} + vh \left\{ \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (v\rho_m) \right\} = \rho_m g h \sin \theta - \nabla \cdot p - \tau \quad (4)$$

Eq. (4)의 두 번째 항을 Eq. (1)의 질량 체적 보존식을 이용하면, Eq. (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_m \left\{ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \nabla \cdot (v^2h) \right\} + v(m - \rho_m S) = \rho_m g h \sin \theta - \nabla \cdot p - \tau \quad (5)$$

운동 방정식 Eq. (4)와 Eq. (8)에 있어서의 두 번째 항의 밀도변화가 다른 항에 비해 무시할 수 있다고 하면, Eq. (6)과 같은 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho_m \left\{ \frac{\partial(vh)}{\partial t} + \nabla \cdot (v^2h) \right\} = \rho_m g h \sin \theta - \nabla \cdot p - \tau \quad (6)$$

본 연구에서는 흐름의 연속식인 Eq. (1), (2)와 운동방정식인 Eq. (6)을 지배방정식으로 하여 토석류 해석을 하였다. Eq. (6)에서 압력과 전단력에 대한 식은 Egashira et al.(1997)이 Eq. (7)과 같이 유도하여 토석류 지배방정식에 적용하였다.

$$\tau = \tau_k + \tau_y + \tau_i \quad (7)$$

여기서  $\tau_k$ 는 하나의 유동층에서 다른 유동층으로 이동하는 것에 의한 운동역학적 응력이고,  $\tau_y$ 는 항복응력,  $\tau_i$ 는 상호 충돌하는 입자의 전단응력이며, Eq. (8)~(10)으로 각각 나타내어진다.

$$\tau_y = p_w \tan \psi \quad (8)$$

$$\tau_k = \rho k_k d^2 (1 - c_k)^{5/3} (du/dz)^2 \quad (9)$$

$$\tau_i = k_i \sigma (1 - e) d^2 c_k^{1/3} (du/dz)^2 \quad (10)$$

여기서  $d$ 는 퇴적층의 평균 입경,  $p$ 는 정수압,  $\phi$ 는 토사입자 사이의 내부마찰각,  $c_k$ 는 토석류에서의 토사농도,  $\sigma$ 는 토사입자의 밀도,  $e$ 는 토사입자간의 반발계수,  $k_f$ 는 0.16,  $k_e$ 는 0.0828의 값을 갖는 계수이다. 위에서 도출된 결과식은 토석류를 세 가지로 구분하며, Stoney 토석류, Immature 토석류, 난류형 흐름으로 나눌 수 있다(Takahashi et al., 1992).

## 2.2 토사체적 농도의 적용

흐름에서 입자의 성분은 조립토 성분과 세립토 성분으로 나눌 수 있으며, 흐름에서 조립토는 내부 입자 충돌 효과로 유지되는 토사이고, 세립토는 침입형 유체로서 난류에 의해 유지되는 입자이다. 이러한 입자들의 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며, Eq. (11)은 조립토에 대한 식이고, Eq. (12)는 세립토에 대한 식이다(Takahashi et al., 1992).

$$\frac{\partial(c_s h)}{\partial t} + \nabla \cdot (c_s q) = c_s^* S \quad (11)$$

$$\frac{\partial\{(1 - c_s)c_f h\}}{\partial t} + \nabla \cdot \{(1 - c_s)c_f q\} = (1 - c_s^*)c_f^* S \quad (12)$$

여기서  $c_s$ 는 토석류에서 조립토사의 농도,  $c_f$ 는 세립토사의 농도,  $c_s^*$ 는 정지하상에서의 조립토사의 농도,  $c_f^*$ 는 정지하상에서의 세립토사의 농도,  $q$ 는 토석류의 단위 폭당 유량이다. Eq. (11)과 Eq. (12)를 흐름의 연속식과 운동방정식에 적용하고, 전단력에 관한 식에 적용하여 조립토사와 세립토사의 체적농도 특성을 분석한다.

## 3. 수치 모델링 결과 및 분석

### 3.1 수치 모의 조건 및 수치해석

본 연구는 세립토가 포함된 물을 모래가 포설된 수로에 계속해서 공급하였을 때 수로상 및 하류단에서의 토석류의 거동을 분석한 것이다. 이때 공급유량은 600 cm<sup>3</sup>/sec, 800 cm<sup>3</sup>/sec, 1,000 cm<sup>3</sup>/sec로 변화시켰다. Fig. 1은 수로상에서

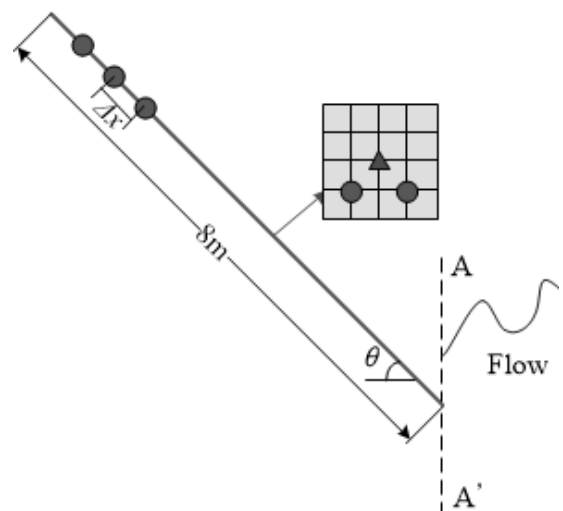


Fig. 1. Schematic design for numerical experiment of debris flow

의 토사체적 농도에 대한 본 연구의 수치실험 모식도이고, 수치모델은 Fortran 언어로 코딩된다. 수치모의를 하기 위한 수로는 폭이 10 cm, 하상 경사각도  $\theta$ 는 14°, 16°, 18°, 20°로 변화시켜가며 모의를 수행한다. 이때 상류부 수로에서 포화된 모래가 10 cm의 두께로 포설되어 있고 그 포설길이는 2 m, 3 m, 4 m로 변화시켰다. 기준면으로부터 상류부까지 높이는 4 m로 한다. A-A' 라인은 하류부에서의 조사지점을 나타낸다. 조립토의 평균입경  $d$ 는 3.08 mm, 세립토의 평균입경  $d_f$ 는 0.0084 mm, 모래입자 밀도는 2.65 g/cm<sup>3</sup>, 정지하상에서의 조립토사의 농도  $c_{ps}$ 는 65 %, 정지하상에서의 세립토사의 농도  $c_{fs}$ 는 35 %, 내부마찰각  $\tan\psi$ 는 0.7이다. 위의 수치모의에 필요한 입력변수 조건은 Froude 상사법칙에 근거한다(Kim et al., 2013).

기후변화에 의해 폭우가 발생할 때, 시간 변화에 따른 토석류의 예측은 중요하다. 따라서 본 연구의 수치모델은 시간 변화에 따른 효율적 분석을 위해서 유한차분법을 적용하였다. 본 연구의 수치모델은 직선 형태의 수로에 적용된 모델이다. 그렇기 때문에 수치계산을 수행하기 위해서는 수로 상의 계산지점에서 수면경사를 이해해야 한다. 가로축의 동그라미와 격자에 위치한 토사체적 농도는 유량에 의해 삼각형 격자로 이동하게 된다. 이때 가로축은 격자의 위치변화를 나타내고, 세로축은 격자의 시간변화를 나타낸다. Fig. 1에서 수로상의 격자 위치를  $I$ 라 하면, 격자 수는 다음의 상류부와 하류부 그리고 총 격자수로 나눌 수 있다.  $\sum_{\theta_1}^{상류부} I = 50$ 이고,  $\sum_{\theta_2}^{하류부} I = 30$ 으로서  $\sum_{Total} I = 80$ 으로 하며, 여기서  $\Delta x = 10cm$ 의 격자 간격을 나타낸다. 위의 격자에서 조립토가 포설된 길이가 300 cm, 400 cm, 500 cm라 함은 수로상의 상류부에서 격자가 각각 30, 40, 50을 나타낸다. 유한차분 수치모델은 시간 변화에 대한 적용이며, 본 연구의 수치계산을 수행하는 데는 유량의 공급시간, 연속방정식 및 운동량 방정식, 토사체적 농도의 수치모델 계산 수행 시간, 토석류가 수로 상 및 하류단의 특정 위치에 도달한 이후의 계산 시간, 수치모델 계산 시간 간격으로 나눌 수 있다. 본 수치모델에서는 시간 항에 대한 입력값의 변화에 따른 토석류의 거동을 재현할 수 있다.

## 3.2 결과분석

### 3.2.1 수로경사 변화에 대한 결과분석

Fig. 2는 수로의 경사변화에 따른 수로 하류단에서 토사체적 농도의 변화를 30초간 시간에 따라 도시한 것이다. 이때 토사체적 농도는 조립토사와 세립토사가 모두 적용되었다. 공급유량은 600 cm<sup>3</sup>/sec이고, 수로경사는 14°, 16°, 18°,

20°로 변화시켰다. Fig. 2에서 가로축은 시간변화를 나타내고, 세로축은 토사농도의 양을 나타낸다. 토석류 발생 위험도는 수로 경사가 통상 15°인 경우에 한하며, 본 연구에서의 수로 경사가 작은 경우는 토석류 발생위험도의 사이 값인 14°와 16°로 설정하였고, 큰 경우는 18°와 20°로 설정하였다.

Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 수로경사가 14°와 16°로서 경사가 작은 경우에는 토석류 발생 초기에 약간의 Peak가 발생했지만, 이후 완만한 형태를 나타내고 있다. 반면에 수로경사가 18°와 20°인 경사가 큰 경우에는 토사체적 농도의 변곡점이 나타나며, 수로경사가 20°인 경우는 급격한 변곡점이 15 sec 지점에서 나타났다. 즉 경사가 급할수록 짧은 시간 내에 토석류의 양이 많아지는 것을 의미하며, 이는 급경사지 하류에서 큰 피해를 초래하게 되며, 급경사지가 20° 이상이 되는 지점에서의 급격한 변곡점 발생 시간을 측정하여 피해 예측을 해야 한다고 판단된다.

Fig. 3은 수로의 경사변화에 따른 수로상에서의 토사적농도의 변화를 도시한 것이다. Fig. 3에서 보면, 수로의 경사가 급할수록 고저차가 큰 고농도의 토사체적 농도를 나타내고 있으며, 시간이 경과함에 따라 하류로 더 빨리 도달하는 것을 알 수 있다. 이는 토석류가 하류단에 도착하자마자 고농도의 토사가 고유량의 유동체와 섞여 하류로 흘러가 그 피해를 가중시킨다는 것을 알 수 있다.

### 3.2.2 공급유량 변화에 대한 결과분석

Fig. 4는 수로의 상류단에 세립토가 섞인 유량의 변화에 따른 수로 하류단에서 토사체적 농도의 변화를 30초간 시간에 따라 도시한 것이다. 이때 수로경사는 20°이고, 공급유량은 600 cm<sup>3</sup>/sec, 800 cm<sup>3</sup>/sec, 1,000 cm<sup>3</sup>/sec의 세 가지 경우로 변화시켰다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 공급유량이 많아질수록 빠른 시간 내에 하류단에 고유량의 토사가 도달하게 되며, 1,000 cm<sup>3</sup>/sec에서는 Fluctuation이 발생하였다. 이는 토석류의 에너지가 커지기 때문에 토석류의 상태가 난류형으로 변하게 되고, 이에 의해 토사는 소류사에서 부유사

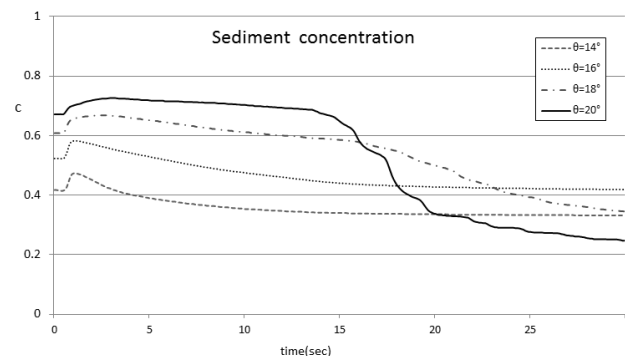


Fig. 2. Sediment concentration at the downstream end varying the angle of the channel for  $q_{in}=600 \text{ cm}^3/\text{sec}$

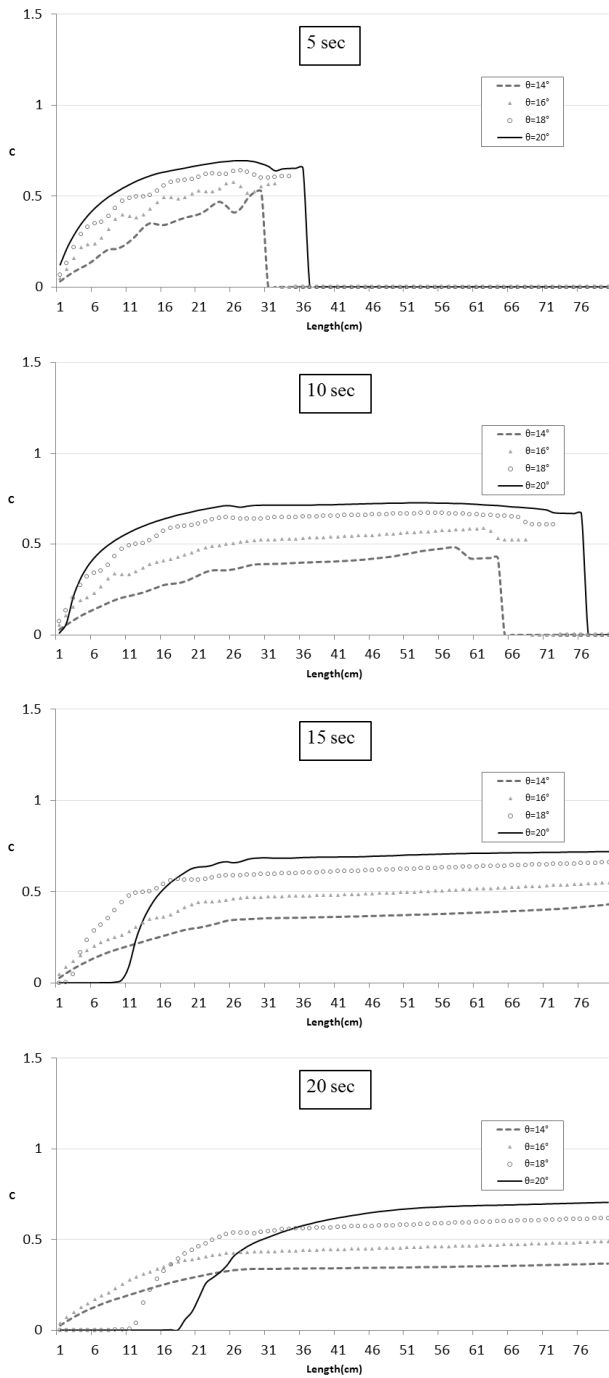


Fig. 3. Sediment concentration on the channel varying the channel slope according to time elapse for  $q=600 \text{ cm}^3/\text{sec}$

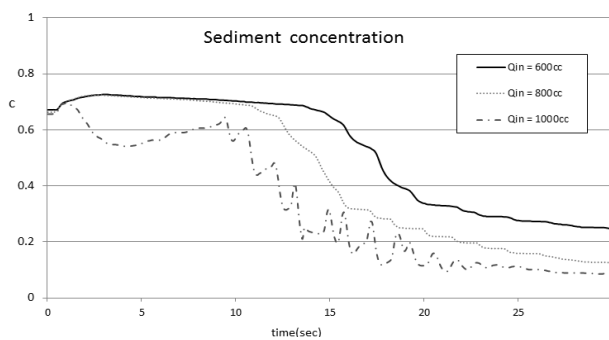


Fig. 4. Sediment concentration at the downstream end varying water supply with fine sediment fraction for  $\theta=20^\circ$

형태로 변하게 된다. 즉 강우의 증가로 인해 토석류의 유동 내에서 토사가 하류에 빠르게 전달되어 그 피해를 증가시키게 된다.

Fig. 5는 수로의 경사가  $20^\circ$ 일 때 세립사를 포함한 공급유

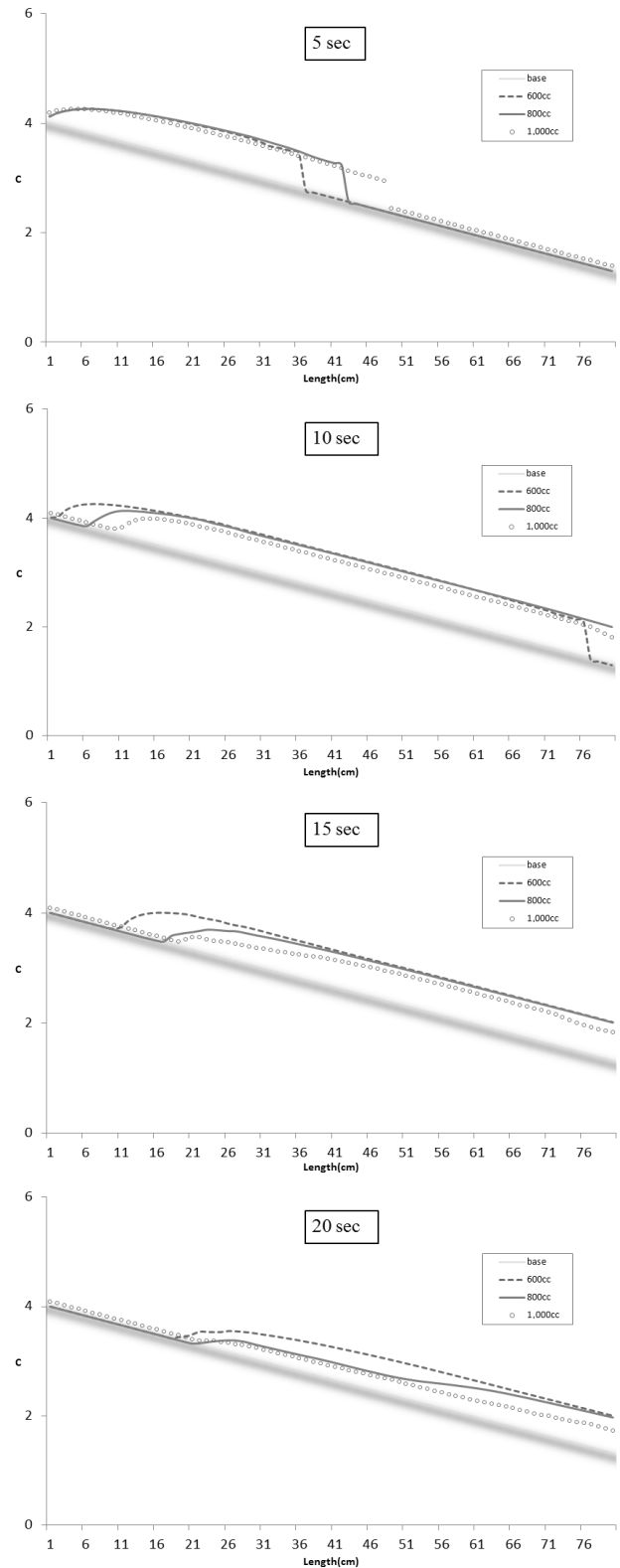


Fig. 5. Sediment concentration on the channel varying water supply with fine sediment fraction according to time elapse for  $\theta=20^\circ$

량의 변화에 따른 수로상에서의 토사농도의 변화를 도시한 것이다. Fig. 5에서 보면, 공급유량이 많을수록 수로상에서의 토사체적 농도의 이동 속도가 빨라지는 것을 알 수 있다. 또한 15초 지점의 그림을 보면, 공급유량이 1,000 cm<sup>3</sup>/sec 인 경우는 수로상에서의 토사농도가 약화되거나 저하되는 것을 알 수 있고, 반면에 공급유량이 적은 600 cm<sup>3</sup>/sec인 경우는 수로상에서의 토사농도가 여전히 일정하게 진행하고 있음을 알 수 있다. 이는 공급유량이 많을수록 토석류가 빠른 시간 내에 경사면 위를 지나서 하류단에 고농도의 토사를 함유한 고유량의 혼합물로서 유하기 때문에 많은 피해를 줄 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 강우강도 및 강우에 영향을 미치는 인자를 파악해서 사면의 경사각도의 변화에 따른 토석류의 피해예측이 필요하다고 판단된다.

### 3.2.3 토사공급 변화에 대한 결과분석

Fig. 6은 수로의 상류단에 포화된 조립토사가 포설된 길이의 변화에 따른 수로 하류단에서 토사체적 농도의 변화를 30초간 시간에 따라 도시한 것이다. 이때 수로경사는 20°이고, 공급유량은 600 cm<sup>3</sup>/sec, 조립토 포설길이는 200 cm, 300 cm, 400 cm의 세 가지 경우로 변화시켰다. Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 모든 경우에 토사농도의 변곡점과 고저차가 나타났다. 포설된 조립토의 길이가 길수록 고농도가

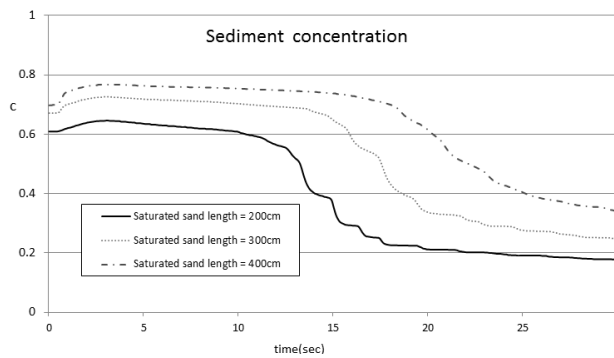


Fig. 6. Sediment concentration at the downstream end varying sediment supply for  $\theta=20^\circ$  and  $q=600 \text{ cm}^3/\text{sec}$

발생하였으며, 이는 침식이 유리한 비탈 경사면에서 토석류가 발생했을 때 고농도의 토사가 유하하므로 하류에 큰 피해를 줄 수가 있다. 따라서 비탈 경사면에서의 침식 가능 여부를 알 수 있는 침식 속도를 판단하여 토석류 재해에 대한 대책을 세워야 할 필요가 있다.

## 4. 결 론

최근 지구 온난화에 의한 기후 변화로 인하여 집중호우는 사면이 많은 산악지형에서 토석류를 발생시켜 재산과 인명피해를 야기한다. 이와 같이 다양한 종류의 토석류에 의한 재해는 기후변화와 연관되어 계속해서 증가해왔다. 본 연구는 집중호우와 세립토사가 섞인 혼한 유동체가 산지에서 유하할 때의 하류에서의 토석류의 변화를 예측한 것이다. 이러한 혼한 유동체가 산지 비탈면에서 침식과 퇴적이 반복되면서 하류로 유하하게 되면 고농도의 토사체적 농도가 발생하게 되고 이것이 고유량의 유동체와 섞이게 되어 큰 에너지를 발생하여 하류에서의 피해를 양산한다. 따라서 본 연구의 분석 인자로서는 조립토사의 토사농도와 세립토사의 토사농도로 설정하였다. 본 연구의 수치해석 모델은 침식 또는 퇴적 모델로서 질량보존 및 운동량 보존에 관한 방정식에 기초하며 세립토와 조립토의 지배 방정식을 이용한 유한차분법으로 수행되었다.

- (1) 수로경사의 변화에 따른 토사체적 농도의 분석을 보면 경사가 작은 경우에는 토석류 발생 초기에 약간의 Peak가 발생했지만 이후 완만한 형태를 나타내고 있고, 수로경사가 큰 경우에는 토사체적농도의 변곡점이 나타났다. 즉 경사가 급할수록 짧은 시간 내에 토석류의 양이 많아지는 것을 의미하며, 이는 급경사지 하류에서 큰 피해를 초래된다.
- (2) 세립토가 섞인 공급유량이 많아질수록 빠른 시간 내에 하류단에 고유량의 토사가 도달하게 되며, Fluctuation

Table 1. Results for numerical simulations according to the variation of input condition

Slope angle	Water supply = 600 cm <sup>3</sup> /sec	Water supply	Slope angle = 20°	Paved depth	Slope angle = 20° Water supply = 600 cm <sup>3</sup> /sec
14°	Peak at the initiate time	600 cm <sup>3</sup> /sec	Turbulent and Immature water flow	200 cm	Low concentration
16°	Peak at the initiate time	800 cm <sup>3</sup> /sec	Turbulent and Immature water flow	300 cm	Mid concentration
18°	An inflection point of volume concentration	1,000 cm <sup>3</sup> /sec	fluctuation (Turbulent water flow)	400 cm	High concentration
20°	An inflection point of volume concentration				

이 발생하였다. 이는 토석류의 에너지가 커지기 때문에 토석류의 상태가 난류형으로 변하게 되고, 이에 의해 토사는 소류사에서 부유사 형태로 변하게 된다. 즉 강우의 증가로 인해 토석류의 유동 내에서 토사가 하류에 빠르게 전달되어 그 피해를 증가시키게 된다. 수로상에서는 토사체적 농도의 이동 속도가 빨라지는 것을 알 수 있으며, 하류단에 고농도의 토사를 함유한 고유량의 혼합물로서 유하하기 때문에 많은 피해를 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

- (3) 포화된 조립토사의 포설된 길이 변화에 따른 토사체적 농도의 분석을 보면, 포설된 조립토의 길이가 길수록 고농도가 발생하였으며, 이는 침식이 유리한 비탈 경사면에서 토석류가 발생했을 때 고농도의 토사가 유하하므로 하류에 큰 피해를 줄 수가 있다.

본 연구의 결과는 강우 변화에 따른 비탈면 하류단에서의 유동체 혼합물의 토석류에 의한 재해를 예측하는 데 좋은 정보를 제공할 것이며, 다양한 경사의 비탈면을 갖는 산지 밑에서의 토석류에 의한 재해에 대한 정보를 제공할 것이다. 또한 사면 안정 시 효율적인 사면 경사도로 설치하는 것과 사면에서의 침식 방지 등에 있어 토석류와 관계성 분석 및 토석류 재해를 막기 위한 다양한 대책을 세우는 데 좋은 정보를 제공할 것이다.

## References

- Armanini, A., Fraccarollo, L. and Rosatti, G. (2009), Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels. *Computers & Geosciences*, Vol. 35, pp. 993-1006.
- Calligaris, C., Boniello, M. A. and Zini, L. (2008), Debris flow modeling in Julian Alps using FLO-2D, *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows II*, WIT, pp. 76-83.
- Chen, H., Dadson, S. and Chi, Y. G. (2006), Recent rainfall-induced landslides and debris flow in northern Taiwan, *Geomorphology*, Vol. 77, pp. 112-125.
- Crosta, G. B. (2001), Failure and flow development of a complex slide: the 1993 Sesa, landslide, *Engineering Geology*, Vol. 53, pp. 173-199.
- Egashira, S., Miyamoto, K. and Itoh, T. (1997), Constitutive equation of debris flow and their applicability, *1<sup>st</sup> International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, ASCE, pp. 340-349.
- Jun, B. H., Jun, K. W. and Lee, S. C. (2014), Analysis of the erosion/deposition in debris flow using terrestrial Lidar data, *Korean Review of Crisis & Emergency Management*, Vol. 10, No. 3, pp. 61-71 (in Korean).
- Kim, S. D., Oh, S. W. and Lee, H. J. (2013), The study of relationship between berm width and debris flow at the slope, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 14, No. 11, pp. 5-12 (in Korean).
- 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 Geoenvironmental Society*, Vol. 13, No. 6, pp. 59-66 (in Korean).
- Martinez, C., Miralles-Wilhelm, F. and Garcia-Martinez, R. (2008), Verification of a 2D finite element debris flow model using Bingham and cross rheological formulations, *Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows II*, WIT, pp. 56-64.
- McDougall, T., Donley, H. F. and Howard, T. R. (2003), On debris flow/avalanche California, in *debris flows/avalanches: Process, Recognition and Mitigation*, *Reviews in Engineering Geology*, Geol. Soc. AM. VII, pp. 223-236.
- Nakatani, K., Wada, T., Satofuka, Y. and Mizuyama, T. (2008), Development of "Kanko 2D (Ver. 2.00)", a user-friendly one- and two- dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 1, No. 2, pp. 62-72.
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y. and Fullerton, W. T. (1993), Two-dimensional water flood and mudflow simulation, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 244-266.
- Paik, J. C. and Park, S. D. (2009), Numerical modeling and field measurement of 1D debris flows, *Proceeding of the Korean Society of Civil Engineers*, pp. 695-698 (in Korean).
- Swanson, D. N. and Swanson, F. J. (1974), Timber harvesting, mass erosion, and steepland forest geomorphology in the Pacific Northwest. In: *Geomorphology and Engineering*. Edited by D.R. Coates. Dowden, Hutchinson, and Ross. Inc., Stroudsburg, pp. 199-221.
- 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.
- Takahashi, T. and Tsujimoto, H. (1984), Mechanics of granular flow in inclined chute. *Journal of Hydraul. Coast. Environment Engineering*, JSCE, Vol. 565, No.2-39, pp. 57-71 (in Japanese).
- Wang, N. S., Yi, R. H. and Liu, D. (2008), A solution method to the problem proposed by Wang in voting systems, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, Vol. 221, pp. 106-113.