

## 소단 위치 변화에 따른 토석류 방재 모델링\*

### The Modeling of Debris Flow Disaster According to the Location of Berm

Ho Jin Lee\*\*, Sung Duk Kim\*\*, Kye Won Jun\*\*\*, Moon Se Lee\*\*\*\*\*

\*\*School of Civil Engineering, Chungbuk National University,

1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Korea

\*\*\*School of Civil Engineering, Chungbuk National University,

1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Korea

\*\*\*\*Graduate School of Disaster Prevention Kanwon National University,

346 Joongang-ro, Samcheok-si, Gangwon, Korea

\*\*\*\*\*Research & Development Center National Forestry Cooperation Federation,

1800 Dongseo-daero, Daeduk-gu, Daejeon, Korea

#### Abstract

The purpose of this study is to analyze the water discharge and the sediment volume concentration of debris flow at the end of downstream channel according to the various locations of the berm. The aspect of debris flow by the variance of the supplying water discharge was also investigated at the each locations of berm, based on the Finite Difference Method (FDM). For the case of fewer water supply, the closer the berm was to the upstream channel and the higher the slope angle was, the larger water discharge of debris flow was observed. The increase in water supplying discharge lead to a higher fluctuation at the end of downstream channel. For the case of sediment volume concentration, the value of sediment volume concentration remain unchanged for each location of the berm with a low level of supplying water discharge. On the other hand, an inflection point was occurred when the supplying water discharge increased and the slope angle of the channel was large.

---

\* 본 연구는 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2013R1A1A4A01010397).

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

\*\*\* Corresponding author. Tel. +82-43-261-2403. Fax. +82-43-275-2377. E-mail: soungdoug@hanmail.net

Submission & Publication Process

Received: Aug. 10, 2015 / Revised: Aug. 26, 2015 / Accepted: Sep. 7, 2015

**Key words:** sediment volume concentration, supplying water discharge, berm, Finite Difference Method, numerical analysis

### 국문초록

본 연구의 목적은 수로에서 소단의 위치 변화에 따른 하류단에서의 토석류의 유량 및 토사농도를 분석하는 것이다. 또한 공급유량의 변화에 따라서 소단의 각 위치에서의 양상을 조사하였으며, 수치해석은 유한차분법을 기초로 하였다. 공급유량이 작은 경우 소단의 위치가 상류단과 가까울수록 그리고 하상경사가 클수록 토석류의 유량이 크게 발생하고, 소단의 위치가 하류단으로 갈수록 토석류의 유량이 작아지는 것을 발견하였다. 또한 유량의 증가는 큰 fluctuation을 발생시켰고, 소단의 위치가 상류단과 가까울수록 고유량이 초기에 발생하며, 하상경사가 클수록 고유량의 fluctuation이 발생하게 됨을 발견하였다. 토사농도의 경우 유량이 작을수록 하상경사 및 소단 위치 변화에 따라서 큰 차이가 나지 않았지만, 유량이 증가하고 하상경사가 큰 경우 토사농도의 변곡점이 발생하였다.

**주제어:** 토사농도, 공급유량, 소단, 유한차분법, 수치해석

## 1. 서론

산지 사면에서 발생하는 토석류는 상류에서의 강우량이 증가할수록 하류에 큰 피해를 주게 된다. 특별히 급경사지를 갖는 사면에서는 그 피해의 정도가 심하다. 왜냐하면, 토석류는 상류에서 공급되는 유체, 그리고 침식 및 퇴적으로 발생하는 암석 및 토사가 서로 혼합되어 강한 운동성을 갖고 하류로 유하하기 때문이다 (Kim, *et. al.*, 2013). 최근의 기후 변화로 인해 토석류는 국내 뿐만 아니라 전세계적으로 빈번하게 발생하고 있으며, 이러한 토석류의 방재를 위해서 국내에서는 다양한 대책이 나오고 있다 (Kim, *et. al.*, 2012; Jun, *et. al.*, 2014 ; Kim & Lee, 2014; Paik & Park, 2009). 그러나, 여러 가지의 대책에도 불구하고 토석류를 억제하기에는 아직도 역부족이다. 이는 토석류가 dynamic 한 운동성질 뿐 만 아니라 kinematic 적인 요소가 지배적으로 작용하기 때문이다. 따라서, 보다 정확한 토석류 예측을 위해서는 kinematic 적인 입자 개개의 위치 및 특성을 파악하여 연구대상지역 또는 수치모의 실험에 적용해야 한다.

이러한 토석류 입자의 kinematic 성질의 적용 전에 선행되어야 할 과제는 토석류 입자의 dynamic 성질의 적용이다. 기존의 토석류 입자의 dynamic 운동성은 입자군으로서가 아닌 토석류의 전체 개체로서 적용을 하였기 때문에 실제적으로 오차가 많이 발생하였다. 따라서 토석류 입자군으로서의 dynamic 운동성을 조사하기 위해서는 다양한 형태를 갖는 연구대상지역 또는 수치모의 실험이 필요하다.

본 연구는 이러한 토석류 입자군으로서의 dynamic 성질을 다양한 소단 위치를 갖는 수로에 적용하여 수치모의를 실시하였다. 수치모의에는 Takahashi, *et. al.*(1992)이 수정한 방법을 적용하였으며, 공

급유량을 일정하게 한 후 소단의 위치 변화에 따른 유량과 토사체적 농도를 조사하였으며, 공급유량의 변화에 따라서 각각의 소단 위치에서의 유량과 토사체적 농도의 특성을 분석하였다.

## II. 지배방정식

토석류 입자군의 dynamic한 성질은 유체의 검사체적 접근법을 적용하며, 검사체적 법에서 system의 시간변화에 따른 특성을 알기 위해서는 레이놀즈 수송이론이 적용된다. 레이놀즈 수송이론을 통해 검사체적의 기본방정식이 유도되고, 이 때 좌변항은 오일러적 특성을 우변항은 라그랑지적 특성을 내포한다. 이 검사체적의 기본방정식에 질량보존과 운동량보존을 적용하면 아래의 방정식이 유도된다.

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

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

여기서,  $h$ 는 수심,  $u$ 는 유속,  $i$ 는 침식 및 퇴적속도,  $c$ 는 퇴사입자의 체적농도,  $c_*$ 는 하상에서 최대 퇴사입자농도를 나타낸다.

식 (1)과 (2)에서의 침식속도식은 퇴적층의 포화 및 불포화에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다. 퇴적층이 불포화인 경우,

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

퇴적층이 포화인 경우,

$$i = E \frac{C_{t\infty}}{c_* - C_{t\infty}} \left\{ 1 - \frac{c}{c_\infty} \frac{\rho_m \tan \phi - (C_t/C_{t\infty})(c_\infty/c)(\rho/\rho_m)\tan \theta}{\tan \phi - \tan \theta} \right\} \frac{q}{d} \quad (4)$$

여기서,  $K$ 와  $E$ 는 각각 수치적 계수,  $g$ 는 중력가속도,  $\theta$ 는 하상경사,  $\rho_m$ 은 물과 토사 혼합물의 밀도( $\rho_m = (\sigma - \rho)c + \rho$ ),  $\sigma$ 는 토사의 밀도,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $\phi$ 는 토사의 내부마찰각,  $c_t$ 는 토석류 중의 전 개체의 용적농도,  $c_\infty$ 는 퇴사입자의 평형농도,  $C_{t\infty}$ 는 토석류 중의 전 개체의 평형용적농도,  $d$ 은 토사층의 대표입경,  $q$ 는 토석류의 단위폭당유량이다.

전 개체의 평형용적농도와 퇴사입자의 평형농도는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$c_{t\infty} = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (5)$$

$$c_{\infty} = \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (6)$$

만일 토석류의 유동형태가 침류상 집합유동(Kim, *et. al.*, 2012)이 발생하는 경우에는 평형농도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

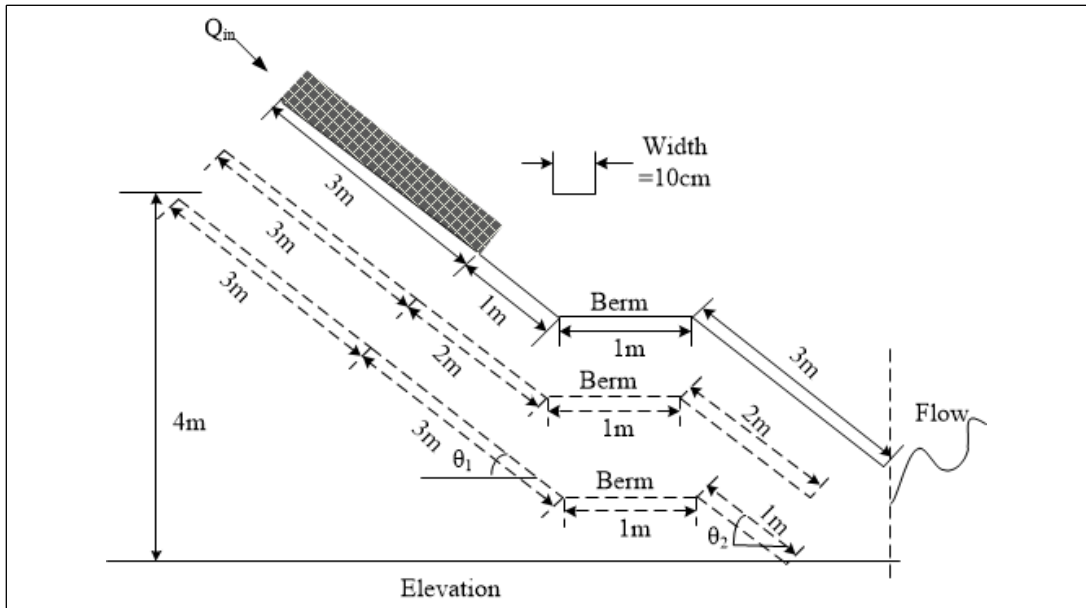
$$C_{S\infty} = 6.7 C_{t\infty}^2 \quad (7)$$

### III. 결과 및 분석

#### 1. 수치실험조건

<Figure 1>은 소단을 갖는 수로에서 소단의 위치변화에 따른 토석류의 유량 및 토사농도의 특성을 조사하기 위해서 사용된 수치실험 모식도이다. 수치실험은 시간 변화에 따른 경계조건에서의 특성을 잘 나타내는 유한차분법을 사용하였다. 수로의 형태는 직사각형 형태이고, 상류부 수로의 3m구간에는 10cm 두께로 모래를 포설하고, 소단의 길이는 1m로 설정하며, 그 외 4m의 수로를 갖는다. 수로의 총 길이는 8m이고, 이 때 소단은 상류 끝단에서부터 하류 끝단까지 각각 4m, 5m, 6m에 위치한 것으로 설정하였다. 소단 위의 하상경사는  $\theta_1$ , 소단 아래의 하상경사는  $\theta_2$ 로 설정하였다. 이 때 모래의 평균 입경은 3.1 mm, 모래입자의 밀도는  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , 퇴적토사농도  $c_* = 0.65$ , 내부마찰각  $\tan \phi = 0.7$ 인 것으로 설정하였다. 또한, 공급유량의 변화 특성을 분석하기 위해서  $Q_{inflow} = 500 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 와  $Q_{inflow} = 700 \text{ cm}^3/\text{sec}$ ,  $Q_{inflow} = 900 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 인 3가지 경우로 수치모델링 조건으로 설정하였다.

유량의 공급시간은 20 sec, 계산수행시간은 60 sec, 토석류가 수로의 하루단의 위치에 도달한 이후의 계산시간은 30 sec, 계산간격은 0.2 sec로 설정하였으며, 이는 유한차분법의 모의 계산에 적용되었다 (Kim, *et. al.*, 2013).

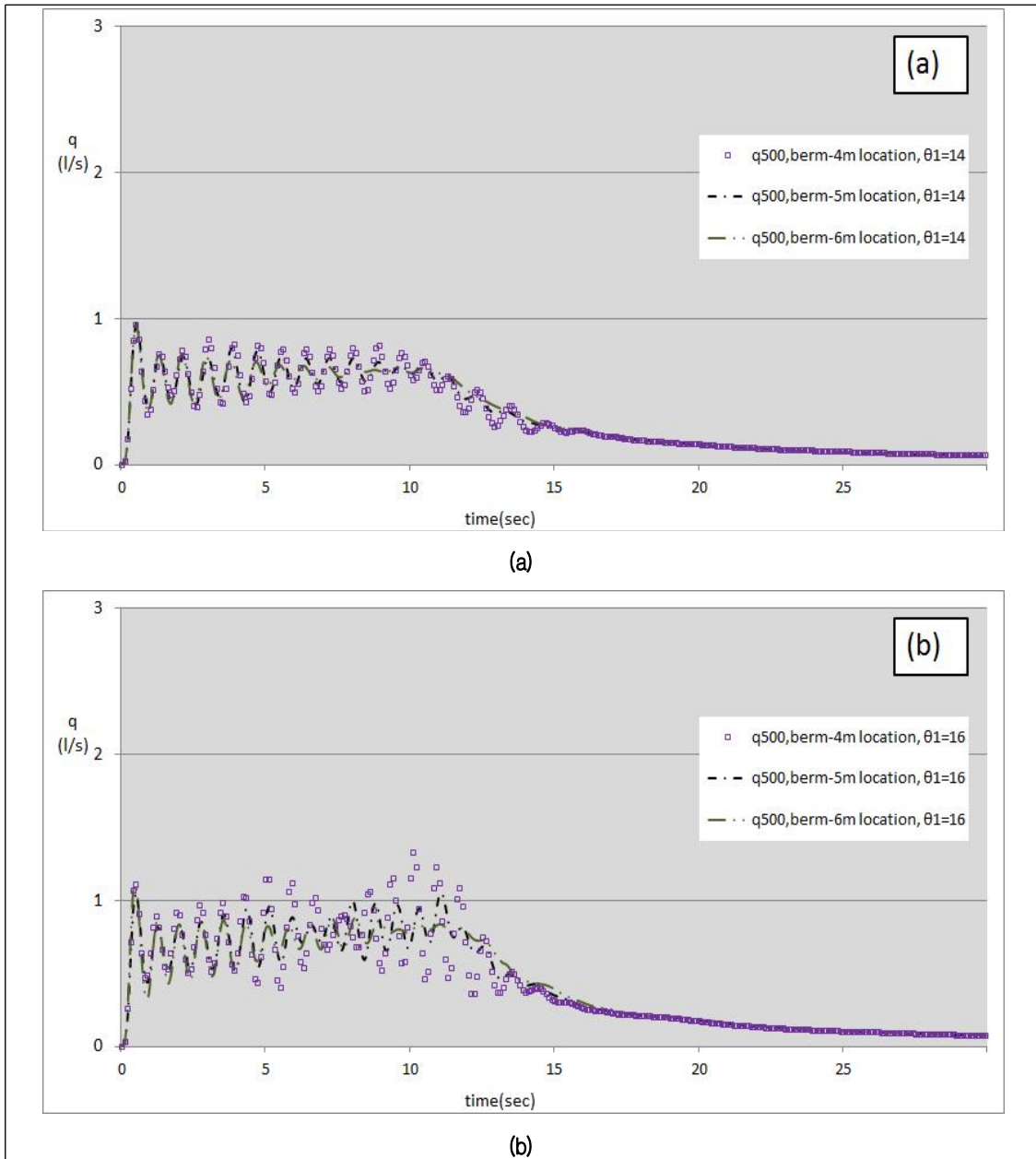


<Figure 1> The Diagram of the Channel for Numerical Modeling

## 2. 수치실험 결과분석

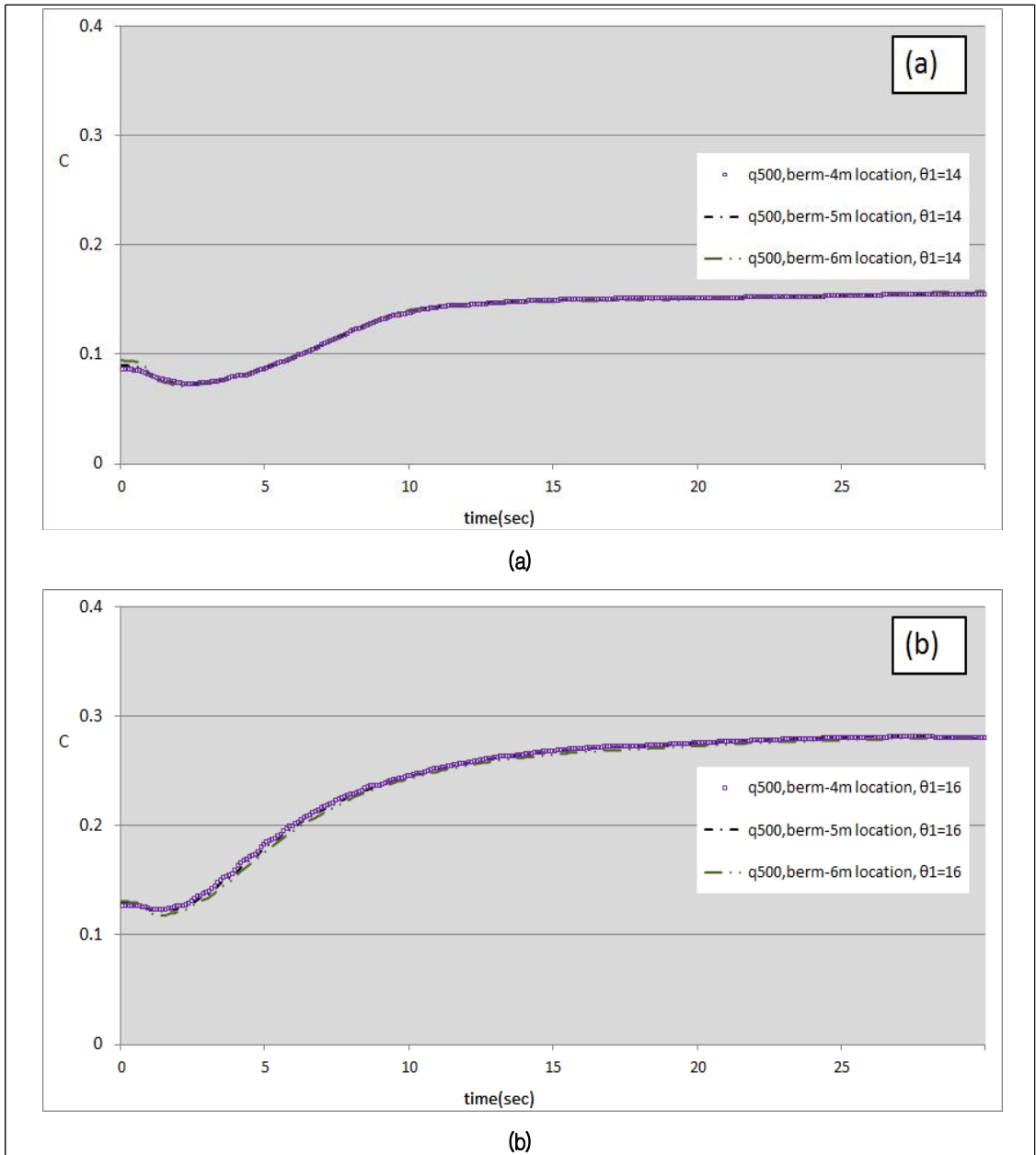
<Figure 2>에서 <Figure 7>은 공급유량이 각각  $Q_{inflow} = 500cm^3/sec$ ,  $Q_{inflow} = 700cm^3/sec$ ,  $Q_{inflow} = 900cm^3/sec$ 일 때, 소단의 위치에 따른 유량 및 토사농도를 도시한 것이다. <Figure 2>와 <Figure 3>은 공급유량이  $Q_{inflow} = 500cm^3/sec$ 일 때, 소단 위의 비탈면 경사와 소단 아래의 비탈면 경사가  $14^\circ$ 와  $16^\circ$ 인 경우 시간에 따른 유량 및 토사농도를 나타낸 것이고, <Figure 4>와 <Figure 5>는 공급유량이  $Q_{inflow} = 700cm^3/sec$ 일 때, 소단 위의 비탈면 경사와 소단 아래의 비탈면 경사가  $14^\circ$ 와  $16^\circ$ 인 경우 시간에 따른 유량 및 토사농도를 나타낸 것이고, <Figure 6>과 <Figure 7>은 공급유량이  $Q_{inflow} = 900cm^3/sec$ 일 때, 소단 위의 비탈면 경사와 소단 아래의 비탈면 경사가  $14^\circ$ 와  $16^\circ$ 인 경우 시간에 따른 유량 및 토사농도를 나타낸 것이다.

<Figure 2 > 에서 보면, 토석류 위험도의 각도( $15^\circ$ )의 아래인  $14^\circ$ 인 경우 각각의 소단 위치에서 비슷한 값을 갖다가 토석류 도달 후 11초에서 14초 사이에 소단위치 4m 인 곳에서 유량의 진폭이 다소 커지는 것을 알 수 있다. 반면에 토석류 위험도의 각도( $15^\circ$ )보다 큰  $16^\circ$ 도의 경우 소단 위치가 4m인 경우에서 소단의 위치가 5m와 6m인 경우보다 유량의 진폭이 상당히 커지는 것을 알 수 있다. 즉, 공급유량이 작은 경우 소단의 위치가 상류단과 가까울수록 그리고 하상경사가 클수록 토석류의 유량이 크게 발생하고, 소단의 위치가 하류단으로 갈수록 토석류의 유량이 작아지는 것을 알 수 있다.



<Figure 2> The Water Discharge at the Downstream Channel for  $Q_{in,flow} = 500 \text{ cm}^3/\text{sec}$

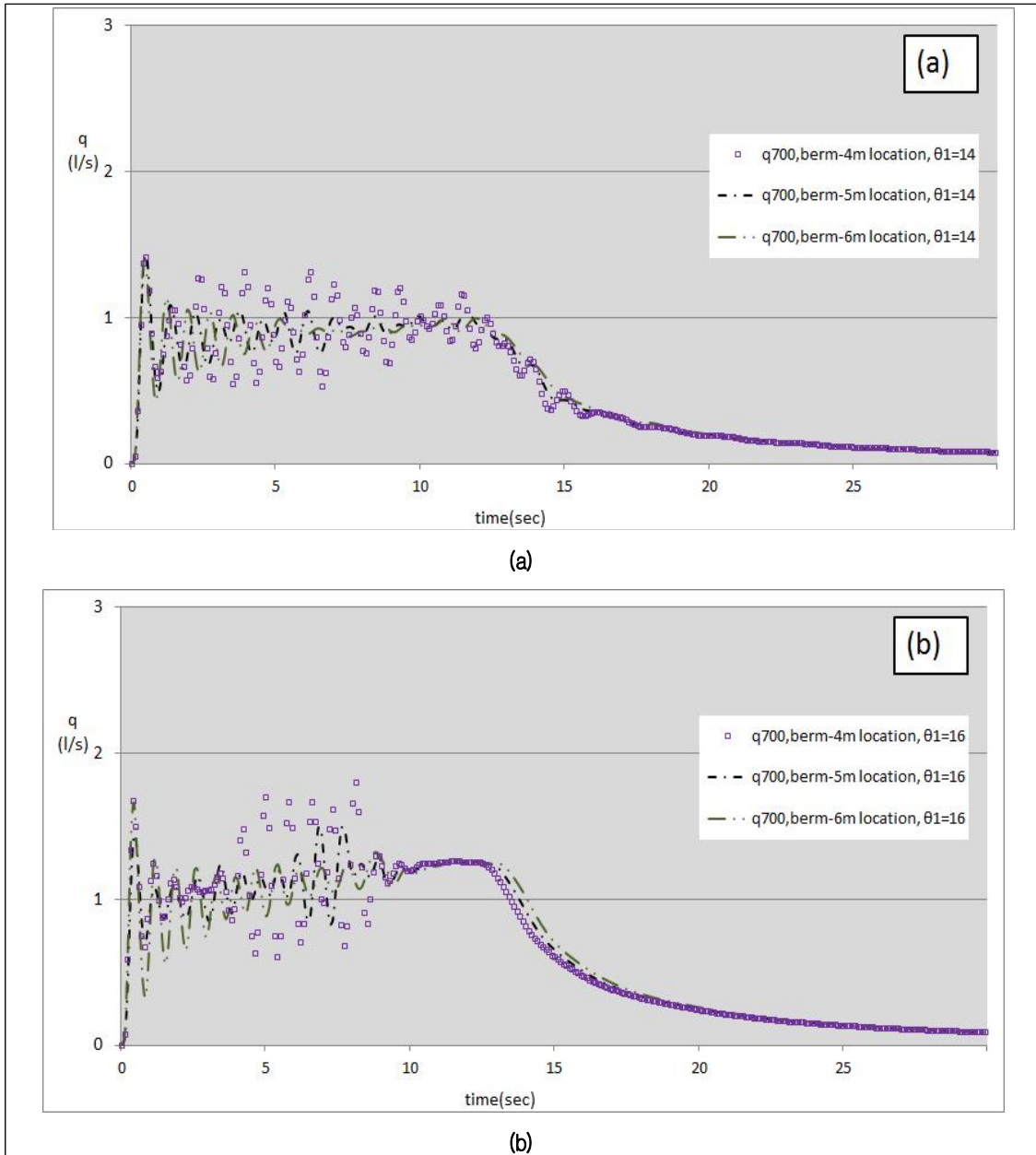
<Figure 3>에서 보면, 토사농도의 경우 하상경사 및 소단 위치 변화에 따라서 큰 차이가 나지 않았으며, 소단 위치 변화에 따른 차이는 유량에만 국한됨을 알 수 있다.



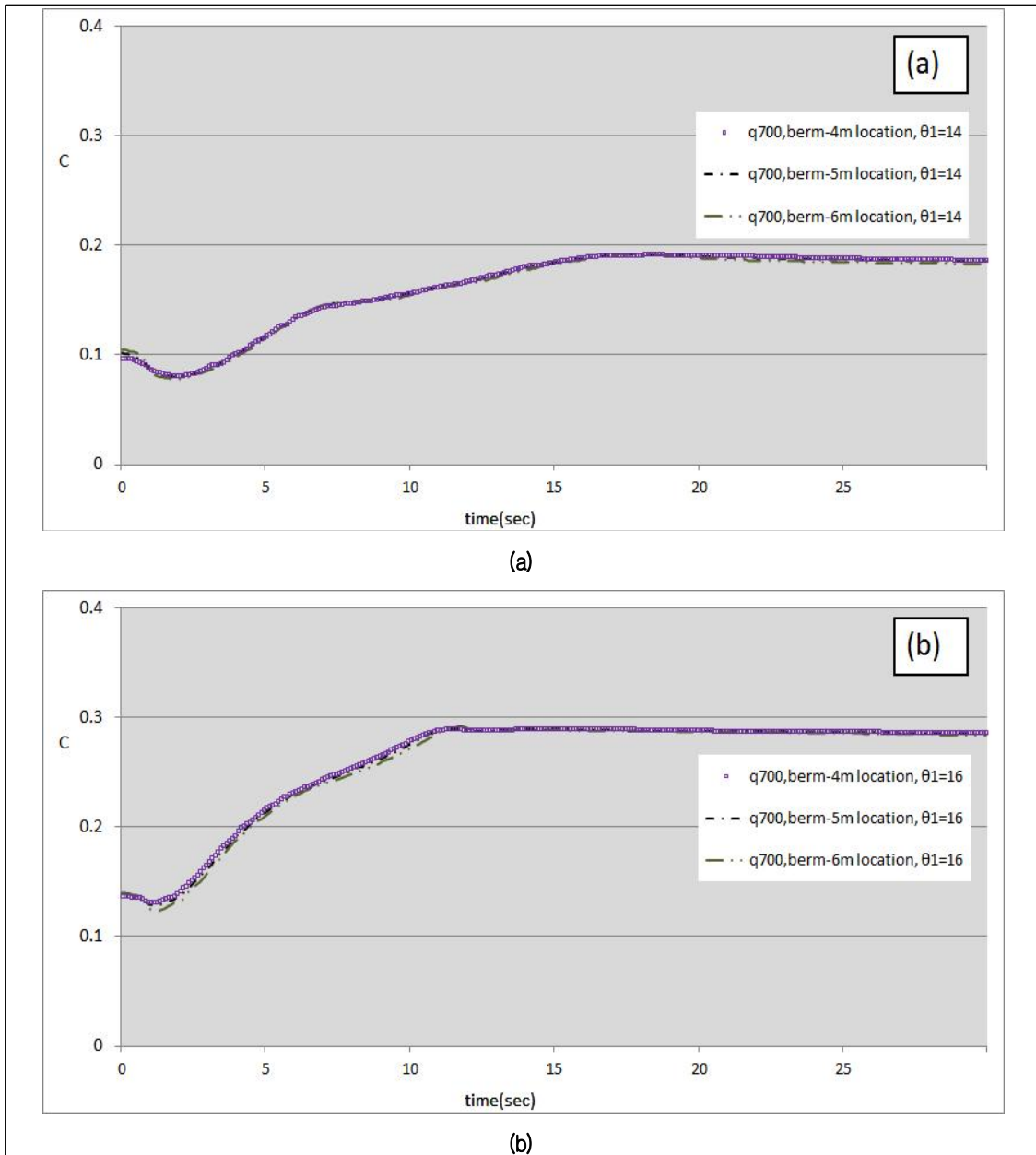
<Figure 3> The Sediment Concentraion at the Downstream Channel for  $Q_{inflow} = 500 \text{ cm}^3/\text{sec}$

유량이 증가된 <Figure 4 >에서 보면, 토석류 위험도의 각도( $15^\circ$ )의 아래인  $14^\circ$ 인 경우 토석류 발생초기 3초대에서부터 소단위치가 4m인 경우 유량의 진폭이 소단위치가 5m와 6m인 경우보다 더 컸으며 그 규모는 유량이 작은  $Q_{inflow} = 500 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 인 경우보다 더 컸다. 더욱이 토석류 위험도의 각도

(15°)보다 큰 16°의 경우 소단 위치가 4m인 경우에서 약 4초에서 9초 사이에 한 번의 큰 fluctuation이 발생하였다. 이는 공급유량이 증가하게 되면 소단의 위치가 상류단과 가까울수록 고유량이 초기에 발생하며, 하상경사가 클수록 고유량의 fluctuation이 발생하게 됨을 알 수 있다.

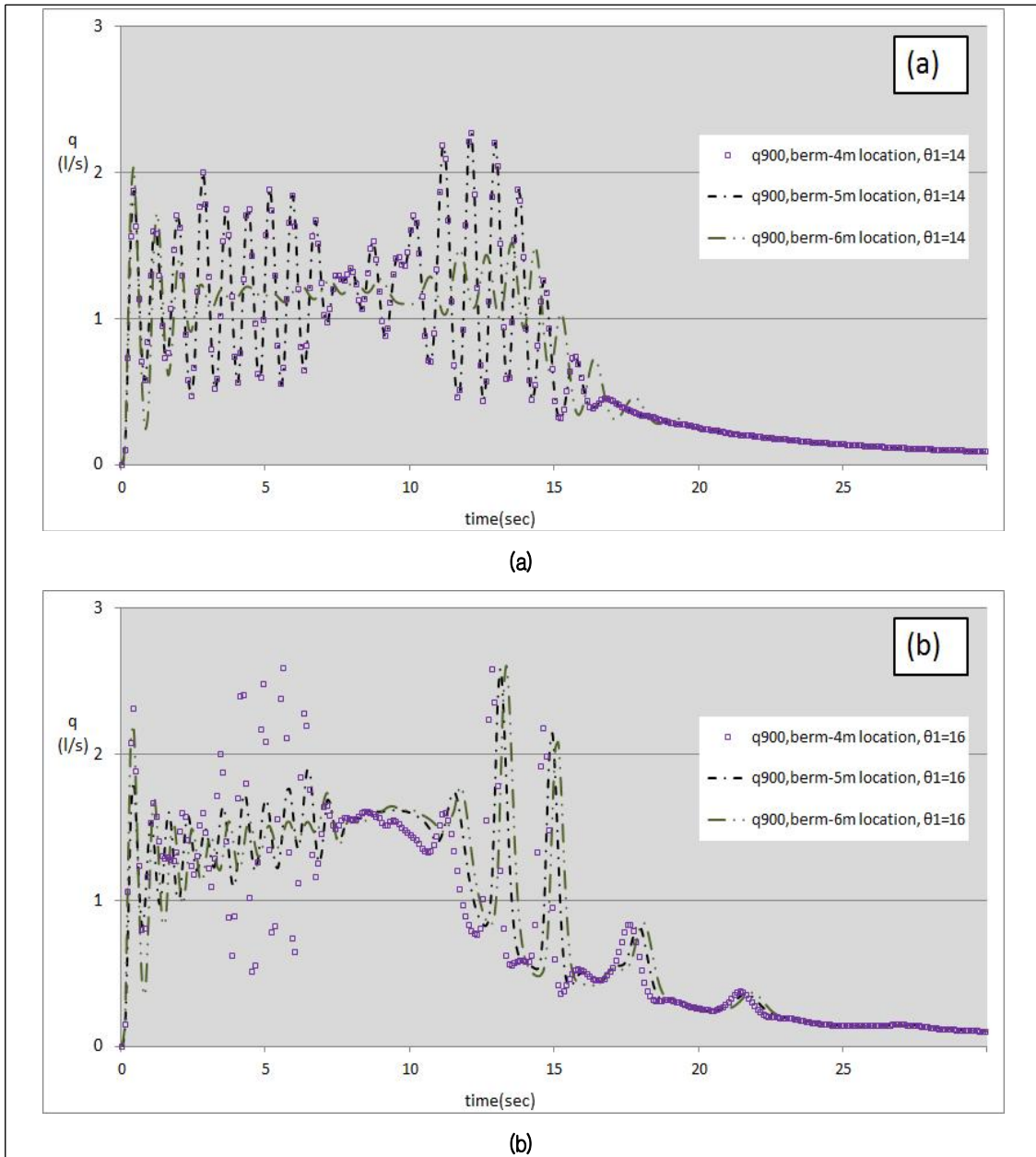


<Figure 4> The Water Discharge at the Downstream Channel for  $Q_{inflow} = 700cm^3/sec$



<Figure 5> The Sediment Concentraion at the Downstream Channel for  $Q_{inflow} = 700 \text{ cm}^3/\text{sec}$

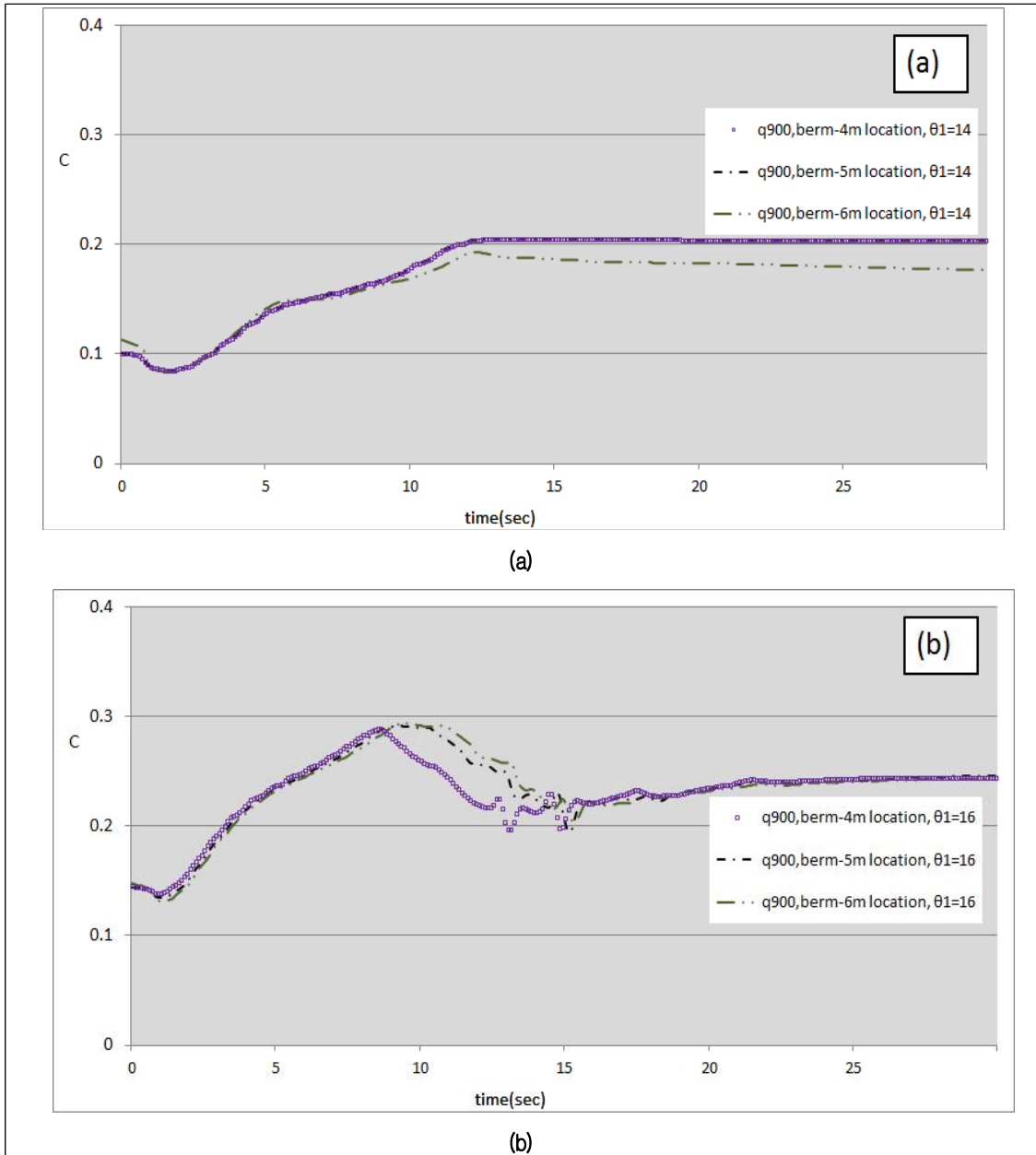
<Figure 5>에서 보면, 토사농도의 경우 유량이 증가하더라도 하상경사 및 소단 위치 변화에 따라서 큰 차이가 나지 않았으며, 이의 결과는 <Figure 3>의 양상과 비슷하였고, 역시 소단 위치 변화에 따른 차이는 유량에만 국한됨을 알 수 있다.



<Figure 6> The Water Discharge at the Downstream Channel for  $Q_{inflow} = 900 \text{ cm}^3/\text{sec}$

유량이  $Q_{inflow} = 900 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 로 증가된 <Figure 6>에서 보면, 토석류 위험도의 각도( $15^\circ$ )의 아래인  $14^\circ$ 인 경우 소단위치가 6m인 경우를 제외하고 소단위치가 각각 4m와 5m인 경우 비슷한 양상을 보였으며 유량의 진폭의 크기는 위의 두 결과(<Figure 2>와 <Figure 4>)보다 크게 나타났다. 이는 유량

이 아주 큰 경우 하류단에 가까운 소단 위치를 제외하고는 큰 규모의 유량의 진폭이 나타나게 됨을 알 수 있다. 토석류 위험도의 각도(15°)보다 큰 16°의 경우 소단 위치가 4m인 경우에서 약 4초에서 7초 사이에 다른 두 케이스에 비해 상당히 큰 fluctuation이 발생하였다.



<Figure 7> The Sediment Concentraion at the Downstream Channel for  $Q_{inflow} = 900 \text{ cm}^3/\text{sec}$

<Figure 7>에서 보면, 하상경사가 14°인 경우 토사농도는 약간의 차이가 났지만, 거의 비슷한 양상을 보였다. 반면에 하상경사가 16°인 경우 토사농도의 변곡점이 발생하였으며 이러한 토사농도의 변곡점은 고농도를 갖는 토석류가 하류단에 도달하게 되므로 그 피해를 가중시킨다. <Figure 7>에서의 소단위치가 상류단에 가까울수록 변곡점의 발생 시점이 빨라짐을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 토석류 발생시 수로의 소단 위치에 따른 토석류의 유량 및 토사농도를 분석하기 위하여 공급유량의 변화에 따른 양상을 시간변화에 따라 나타내었다. 수치실험으로는 유한차분법을 적용하였으며, 그 결과를 그래프로 도시하였다.

공급유량이 작은 경우 소단의 위치가 상류단과 가까울수록 그리고 하상경사가 클수록 토석류의 유량이 크게 발생하고, 소단의 위치가 하류단으로 갈수록 토석류의 유량이 작아지는 것을 발견하였다. 유량이 다소 증가된 경우 토석류 위험도의 각도(15°)의 아래인 14°에 토석류 발생초기 3초대에서부터 소단위치가 4m인 경우 유량의 진폭이 소단위치가 5m와 6m인 경우보다 상당히 증대됐고, 더욱이 토석류 위험도의 각도(15°)보다 큰 16°도의 경우 소단 위치가 4m인 경우에서 약 4초에서 9초 사이에 한번의 큰 fluctuation이 발생하였다. 이는 공급유량이 증가하게 되면 소단의 위치가 상류단과 가까울수록 고유량이 초기에 발생하며, 하상경사가 클수록 고유량의 fluctuation이 발생하게 됨을 알 수 있다.

유량이 아주 큰 경우 하류단에 가까운 소단 위치를 제외하고는 큰 규모의 유량의 진폭이 나타나게 됨을 알 수 있고, 토석류 위험도의 각도(15°)보다 큰 16°도의 경우 소단 위치가 4m인 경우에서 약 4초에서 7초 사이에 다른 두 케이스에 비해 상당히 큰 fluctuation이 발생함을 발견하였다.

토사농도의 경우 유량이 작을수록 하상경사 및 소단 위치 변화에 따라서 큰 차이가 나지 않았으며, 소단 위치 변화에 따른 차이는 유량에만 국한됨을 알 수 있다. 반면에 유량이 크게 증가한 경우 하상경사가 16°에서 토사농도의 변곡점이 발생하였으며 이러한 토사농도의 변곡점은 고농도를 갖는 토석류가 하류단에 도달하게 되므로 그 피해를 가중시킨다. 또한 소단위치가 상류단에 가까울수록 변곡점의 발생 시점이 빨라짐을 알 수 있다.

#### References

- Jun, Byong Hee, Kye Won Jun, and Seung Cheol Lee. 2014. Analysis of the Erosion/Deposition in Debris Flow Using Terrestrial LiDAR Data. *Korean Review of Crisis & Emergency Management*. 10(3): 61-71.

- Kim, Sungduk and Hojin Lee. 2014. Simulation of Debris Flow Considering Erosion and Sedimentation. *Korean Review of Crisis & Emergency Management*. 10(7): 149-159.
- Kim, Sungduk, Ilro Yoon, Sewook Oh, Hojin Lee, and Wooseok Bae. 2012. Numerical Simulation for Behavior of Debris Flow according to the Variances of Slope Angel. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*. 13(6): 59-66.
- Kim, Sungduk, Sewook Oh, and Hojin Lee. 2013. The Study of Relationship between Berm Width and Debris Flow at the Slope. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*. 14(11): 5-12.
- Paik, Joongcheol and Sang-Deok Park. 2009. Numerical Modeling and Field Measurement of 1D Debris Flows. *Porceeding of Korean Society of Civil Engineer*. 698-701.
- Takahashi, T., H. Nakagawa, T. Harada, and Y. Yamashiki. 1992. Routing Debris Flows with Particle Segregation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(11): 1490-1507.

#### Korean References translated from the English

- 김성덕, 오세욱, 이호진. 2013. 사면에서 토석류와 소단폭의 관계성에 관한 연구. 한국지반환경공학 회논문집. 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. 한국위기관리논문집. 10(7): 149-159.
- 백중철, 박상덕. 2009. 토석류 흐름의 1차원 수치모의 및 현장관측. 대한토목학회 정기학술대회논문집. 698-701.
- 전병희, 전계원, 이승철. 2014. 지상 LiDAR 자료를 이용한 토석류 침식/퇴적 해석. 한국위기관리논문집. 10(3): 61-71.

**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).

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

**전계원:** 충북대학교에서 공학박사 학위를 취득하고(논문: 홍수유출과 수질예측을 위한 Web기반 시스

템의 개발, 2004.2), 현재 강원대학교 방재전문대학원에서 교수로 재직 중이다. 관심분야는 풍수해방재, 산지재해방재, 자연재해관리 등이며, 자연재해란 무엇인가?(공저, 2008) 등의 저서와 주요 논문으로 “산악지역돌발홍수 기준유량 결정에 관한 기초연구(2010)”, “지상 LiDAR를 이용한 토석류 발생량 추정에 관한 기초연구(2010)” 등이 있다(kwjun@kangwon.ac.kr)

**이문세:** 충남대학교에서 공학박사 학위를 취득하고, 현재 산림조합중앙회 ENG 센터 산림공학연구소 소장으로 재직 중이다. 주요 관심분야는 산사태방지, 토석류방지, 생태형사방댐 개발 등이다 (eoehehr@nfcf.or.kr).