

토석류 모델에서 하상경사, 내부마찰각이 유사농도에 미치는 영향에 관한 연구

전병희

본 연구에서는 유동학적 토석류 모델에서 이용되는 하상에서 유사의 균형농도식을 구성하는 인자들 중에서 하상경사, 입자밀도, 내부마찰각이 유사의 균형농도에 미치는 영향을 검토하였다. 입자의 밀도는 유사농도에 큰 영향을 주지 않은 반면, 하상경사는 큰 영향을 주었으며, 하상경사가 30°를 넘어서면 유사농도는 급격히 증가하다가 37°정도에서 -50이하로 크게 감소한 후 0으로 수렴하였다. 또한 내부마찰각조건에 따른 유사농도를 계산한 결과, 하상경사 5°에서는 큰 차이가 없으나, 내부마찰각이 작아질수록 하상경사의 영향을 크게 받으며 증가하고 있었다. 특히 내부마찰각이 20°에서 30°의 범위와 하상경사가 20°에서 30°로 존재하는 범위에서는 체적농도가 극한치로 발산하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 토석류모델을 현장에 적용할 때는 하상경사와 내부마찰각의 일정 범위에 대한 체적농도의 값을 미리 설정해 두고 적용하는 방법을 통해서 전체적으로 보다 안정적인 계산을 하는 것이 필요하다고 판단되었다.

주제어: 토석류, 유사농도, 하상경사, 내부마찰각

1. 서론

우리나라는 최근에 집중호우와 그로 인한 산지재해에 의한 도로손실, 인명피해 등이 증가하고 있다. 이런 산지재해 중 토석류는 대규모 피해를 입히는 것으로 알려져 있다(김경석, 2008). 토석류는 토사와 물의 혼합물이 연속유체처럼 유동하는 현상을 말한다. 입자간극이 물 또는 슬러리로 채워진 경우 토사는 유체와 같이 유동할 수 있다.

Brunsdn(1999)은 토석류 모델을 크게 사면 안정도 모델, 유동학적 모델, 수문학적 모델로 구분하였다. 이러한 모델 중 유동학적 모델은 토석류의 시작, 흐름, 정지 과정을 해석할 수 있어서 피해지역을 예측하고 재해위험지도를 작성하는데 중요한 수단으로 이용된다(Crosta, *et al.*, 2006; Chen, *et al.*, 2010; Armento, *et al.*, 2008). 토석류의 함수비 또는 체적농도는 토석류의 흐름을 결정하는 중요한 인자가 된다. 함수비가 낮으면 낙석, 활동(Slide), 사태와 같은 고체의 운동이 되며, 함수비가 높으면 흐름(Flow), 함수비가 더욱 높으면 고농도 흐름(Hyperconcentrated flow)이 된다. Iverson(1997)은 토석

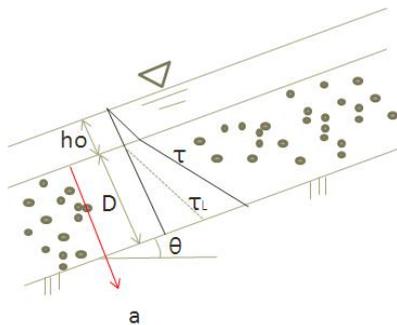
류의 경우 체적농도가 0.4-0.8의 범위를 갖는다고 보고하였다. Takahashi(2007)는 흐름내 평균입자농도에 따라 토석류를 분류하였다. 여기에서 농도가 0.02 이하일 때는 입자간의 충돌응력은 매우 작으며 흐름은 주로 난류와 점성에 의해 지배받는 소류사의 형태를 가진다. 입자농도가 0.02-0.2에서는 충돌응력에 의해 지배받는 미성숙 토석류가 된다. 그리고 0.2 이상에서(포화된) 토석류가 되며, 입자농도는 최대한 하상에서의 입자농도의 90%를 가질 수 있어 0.56을 최대값으로서 제시하였다.

유역의 여러 가지 형태적 특성이 토석류 발생에 영향을 주며(Imaizumi, *et. al.*, 2010) 그 중에서 가장 중요한 인자 중 하나는 하상경사이다. 지면경사는 토석류가 발생하는데 가장 중요한 인자가 되며(Blijenberg, 2007; Shuin, *et. al.*, 2012), 토석류의 이동과 퇴적과정에도 큰 영향을 준다(Malet, *et. al.*, 2005; 김운형 외, 2009).

본 연구에서는 유동학적 토석류 모델에서 이용되는 하상에서 유사의 균형농도식에 구성하는 인자들 중에서 하상경사와 입자의 밀도가 균형농도식의 결과에 미치는 영향을 검토하였다. 또한 모델인자 중 하나인 입자의 내부마찰각에 대한 영향도 검토하여 향후 토석류 모델을 현장에 적용할 때 보다 안정적인 해석이 가능하도록 하는 것을 목표로 하였다.

II. 기본 이론

1. 지배방정식



<그림 1> 물로 포화된 토층에서의 전단력 분포

일정한 하상경사(θ)를 가지고 무한히 계속되는 무한사면을 가정하고, 그 위에 물로 포화된 토양층의 두께가 D 라고 하였을 때, 전단응력은 아래와 같다.

$$\tau(a) = \rho g h_0 \sin \theta + \rho_m g a \sin \theta \tag{1}$$

또한 이에 점성을 무시한 경우 저항하는 응력은 아래와 같다.

$$\tau_L = (\rho_m - \rho) g a \cos \theta \tan \phi \tag{2}$$

여기서 ρ : 물의 밀도, g : 중력가속도, ρ_m : 토양층의 밀도, σ : 토양 입자의 밀도이다.

토양층의 밀도는

$$\rho_m = \sigma c + \rho(1 - c) = (\sigma - \rho)c + \rho \quad (3)$$

정상상태 흐름에서 x성분 운동량은

$$\tau(z) = g \sin \theta \int_z^h \rho_m dz \quad (4)$$

z성분 운동량은

$$p(z) = g \cos \theta \int_z^h \rho_m dz \quad (5)$$

유사의 농도가 일정하다는 가정을 이용하면

$$\tau(z) = \{ \sigma \bar{c} + \rho(1 - \bar{c}) \} g(h - z) \sin \theta \quad (7)$$

$$p(z) = \{ \sigma \bar{c} + \rho(1 - \bar{c}) \} g(h - z) \cos \theta \quad (8)$$

가 성립한다. 여기서 \bar{c} 는 유사의 평균농도이다.

전단력과 항력의 균형식에서 유사농도의 식이 유도된다.

$$\{ \sigma \bar{c} + \rho(1 - \bar{c}) \} g h \sin \theta = (\sigma - \rho) \bar{c} g h \cos \theta \tan \phi \quad (9)$$

$$\bar{c} = \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (10)$$

여기에서 힘이 전단력을 초과하면 아래의 관계가 성립하고 침식이 일어난다.

$$\bar{c} < \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (11)$$

반대로 힘이 전단력보다 작으면 퇴적이 일어난다.

$$\bar{c} > \frac{\tan \theta}{(\sigma/\rho - 1)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (12)$$

또한 이 유사농도를 이용한 침식, 퇴적 속도식은 Takahashi, *et. al.*(1992)에 의해 아래와 같이 제안되었다.

침식속도식($C < C_\infty$)

$$i = \delta \frac{C_\infty - C}{C_* - C_\infty} \frac{M}{d_m} \quad (13)$$

퇴적속도식($C \geq C_\infty$)

$$i = \delta \frac{C_\infty - C}{C_*} \frac{M}{d_m} \quad (14)$$

여기서, δ : 침식 또는 퇴적 계수, d_m : 토사의 평균 입경, C_∞ : 균형유사농도이다.

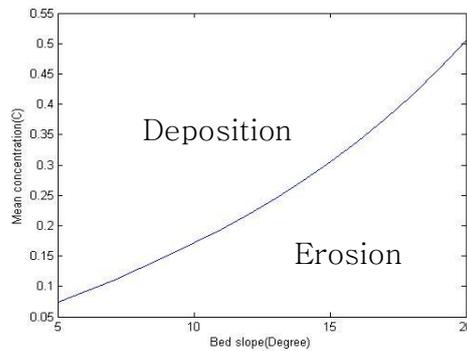
균형유사농도는 하상경사나 수면경사에 의해 영향을 받으며, 침식과 퇴적을 발생시키는 주된 인자로서 작용한다. 토석류 해석을 위한 모델 침식과 퇴적과정을 동시에 해석하는 것이 필요하며 이러한

모델 중에서 Takahashi의 모델은 많은 적용사례가 있어서 본 연구에서 채택하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 하상경사와 토양입자밀도의 영향

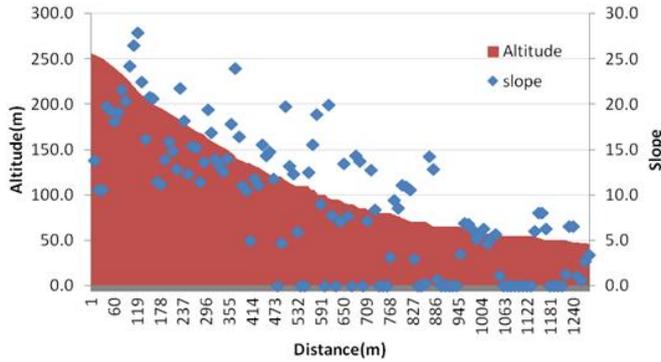
토석류 발생에 영향을 미치는 주요 인자들을 파악하고 영향인자의 변화에 따른 해석 결과를 비교, 분석하였다. <그림 2>는 식 10에서 표현하고 있는 하상경사의 변화에 따른 균형농도의 변화를 시뮬레이션의 결과로서 나타낸 것이다. 이때 토양입자의 밀도는 2.6, 내부마찰각은 $0.8(=\tan 39^\circ)$ 로 하였다.



<그림 2> 하상경사에 따른 균형농도의 변화

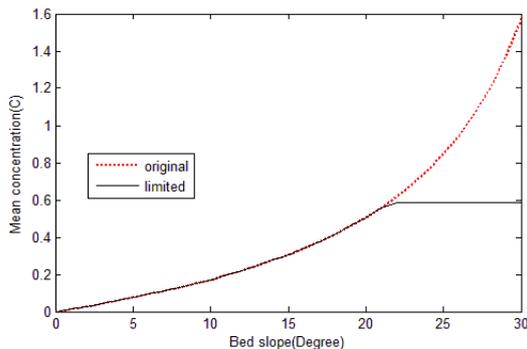
<그림 2>에서 나타내는 것은 토석류의 발생조건이 아니라 토석류가 발생한 이후 충분한 시간과 거리를 이동하면서 안정된 상태에 이르렀을 때, 하상경사에 따라 하상에서의 침식 또는 퇴적의 과정을 나타내고 있다. Takahashi(1977)는 이동상 플룸을 이용한 실내 실험에서 하상경사 5°에서 20°의 조건에서 계산값과 실험결과가 일치함을 보였다. 여기에서 유사농도가 경계치보다 높으면 퇴적이 일어나고, 유사농도가 낮으면 침식이 일어난다고 주장하였다.

또한 유사농도는 하상에서의 입자농도(C_*)의 90%를 넘을 수 없으므로 이 값을 유사농도의 상한치로서 계산하였다. 몇 번의 실내실험을 통해서 적용된 C_* 는 0.55-0.75의 범위에서 분포하며 평균값으로서 0.65의 값을 이용할 수 있으며, 따라서 유체 내 최대 유사농도는 0.65에 0.9를 곱한 값인 0.585를 적용할 수 있다.



〈그림 3〉 우면산 토석류 트랙의 표고와 하상경사

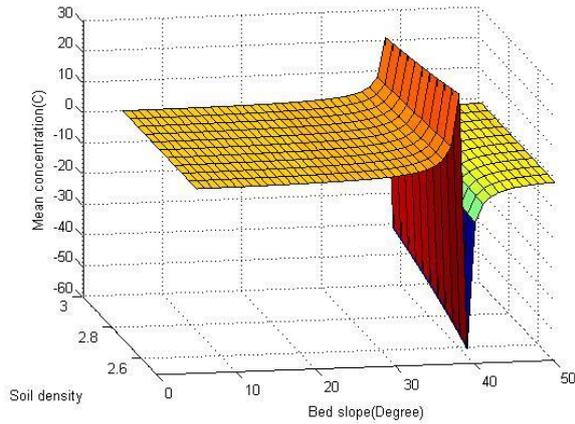
실내 실험결과를 토대로 실제 현장에서의 토석류 흐름을 해석하기 위해서는 하상경사의 자료가 필요하다. 〈그림 3〉은 2011년 서울 우면산 산사태 지역인 송동마을에 발생한 토석류 경로에 대한 지형 자료이다. 이 자료는 1/5000 수치지도에서 1m 격자의 지형도를 작성한 다음, 토석류 발생지역에서부터 이동구간을 따라서 10m 간격으로 경사를 계산하여 나타낸 것이다. 최상류 토석류 발생지점에서 송동마을 입구까지 약 1240m에 걸쳐 토석류가 이동하였으며, 많은 양의 토사가 마을에 퇴적되었으며 1명이 사망하였다. 실제 현장의 한 예로서 이 구간을 보았을 때, 최고 경사는 30°에 가까우며 최상류 발생부보다는 약간 하류지역에서 급한 경사를 보이는 특징을 가지고 있다. 주된 침식지역에서는 하상경사가 10°에서 25°사이의 넓은 경사범위를 가지며 이동하다가 중, 하류 지역에 이르면 0°에서 10° 경사를 가진다. 특히 거리가 470m이상인 하류지역에서는 수치지도의 해상도의 한계상 하상경사가 0인 지역이 다수 나타나서 경사도가 0인 점이 집중되어 있다. 이런 하상특성상, 토석류 모델에 적용할 때는 하상경사를 0에서 최소한 30°이상을 고려할 필요가 있다.



〈그림 4〉 하상경사 0°에서 30°에서 평균농도 변화

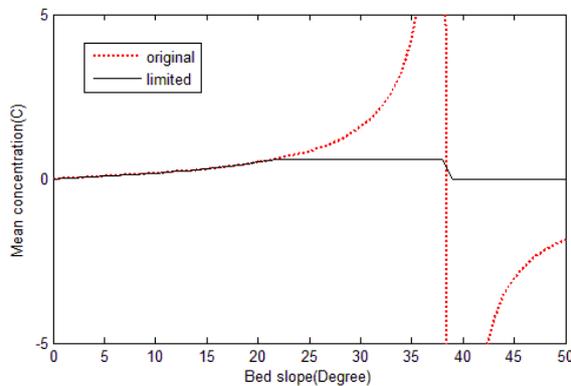
〈그림 4〉는 하상경사 0°에서 30°의 범위에서 유사농도의 변화를 보여준다. 붉은 색 점선이 식에 의

해서 계산된 값으로서 경사가 20°를 넘으면 유사농도가 급격하게 증가하여 26°정도에서 이미 물리적으로 불가능한 값인 1을 넘어서고 있다. 여기서 농도는 유사의 체적비를 의미하므로 체적비가 1을 초과할 수는 없다. 실제 흐름속에서 유사의 체적농도는 하상의 체적농도의 90%를 최대값으로 제안되어 있으며, 이는 약 0.6정도의 값을 가진다. 이를 상한치로서 적용하여 그래프에 나타낸 것이 <그림 5>의 검은 색 실선이다. 이 경우 하상경사가 약22°를 넘어서면 상한 경계치의 적용을 받고 있다.



<그림 5> 하상경사와 입자밀도에 따른 평균농도 변화

<그림 5>는 하상경사 범위를 0°에서 50°까지, 입자의 밀도를 2.5에서 3.0까지의 범위에서 변화시키면서 유사농도의 변화를 계산한 결과이다. 입자의 밀도는 유사농도에 큰 영향을 주지 않았으나, 하상경사는 30°를 넘어서면 급격히 증가하다가 37°정도에서 -50이하로 크게 감소한 후 천천히 0으로 수렴하고 있다. 입자밀도가 증가하면 농도의 증감이 줄어들지만 35°에서 40°사이의 범위에서 발산하는 경향은 유지되고 있다.

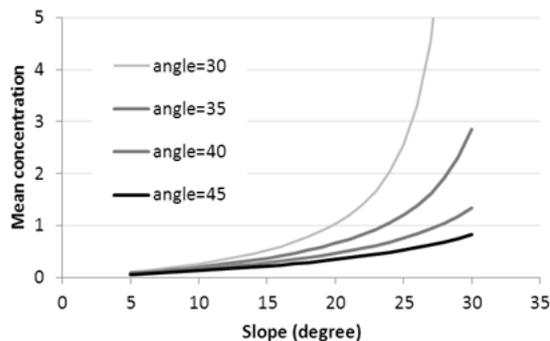


<그림 6> 하상경사 0°에서 50°에서 평균농도 변화

이런 발산구간을 처리하기 위하여 계산과정에서 상한치로서 $0.9 \cdot C^*$ 와 하한치로서 0을 적용하여 <그림 6>에 나타내었다. 단순히 상/하한치로서 처리하면 하상경사가 22° 에서 37° 까지는 상한값을 가지다가 이상의 지역에서는 0이 되어버리는 결과가 나타났다. 즉 하상경사가 37° 이상일 때는 퇴적지역으로 계산된다. 실제 현장적용 시에는 급경사 지역이 포함될 수 있고, 특히 세밀한 해석을 위해 높은 공간해상도 조건에서 계산하는 경우에는 급경사 지역이 나타날 가능성이 높으므로 이에 대한 충분한 계산상의 고려가 필요하다.

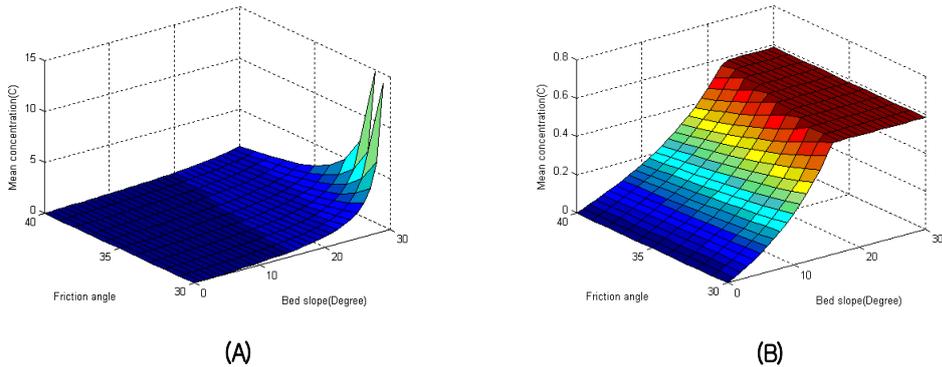
2. 내부마찰각의 영향

<그림 7>에 하상경사 5° 에서 30° 의 범위에서 각 내부마찰각조건에서 유사의 체적농도를 계산하여 나타내었다. <그림 7>에서 하상경사 5° 에서는 각 조건에서 차이가 없으나, 내부마찰각이 작아질수록 하상경사의 영향을 크게 받으며 증가하고 있다. 또한 내부 마찰각이 40° 보다 작은 경우에는 체적농도가 1을 초과하고 있다.



<그림 7> 내부마찰각 30° , 35° , 40° , 45° 에서 하상경사에 따른 평균농도변화

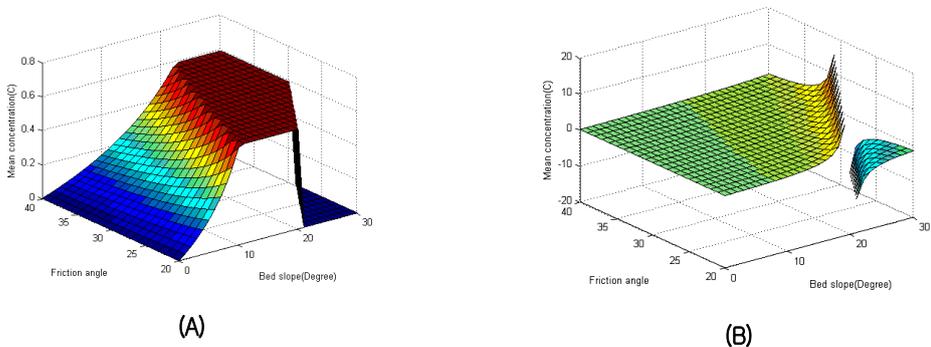
<그림 7>에서 보인 민감도 결과를 넓은 범위에서 세밀하게 계산한 결과를 <그림 8>에 나타내었다. 여기에서 하상경사는 0° 에서 30° 의 범위에서 1° 씩 증가시켰으며, 내부마찰각도 30° 에서 40° 의 범위에서 1° 씩 증가시키면서 계산하였다. <그림 8> (A)는 내부마찰각이 작은 조건에서 하상경사의 증가에 따른 유사 체적농도가 급격하게 증가하는 결과를 보여주고 있다. 일부 조건에서는 체적 농도가 1을 초과하고 있으며, 체적 농도의 최대치를 하상의 유사체적농도의 90%로 하는 경우 0.585로 제한된다. 이러한 계산 결과를 <그림 8> (B)에 나타내었다. 이 결과에서 내부마찰각이 30° 인 경우, 최대 유사 최적 농도에 도달하는 하상경사는 20° 보다 작아지며, 내부마찰각이 커지면서 최대치에 도달하는 하상경사가 조금 증가하여 20° 를 조금 넘고 있다. 즉 제안된 모델에서는 하상경사 20° 를 전후로 최대 유사 농도에 도달하여 침식작용이 대부분을 차지하게 된다.



<그림 8> 하상경사와 내부마찰각의 변화에 따른 평균농도 변화(A:제한치 없음, B:제한치 있음)

토양의 내부마찰각은 토질의 성질에 따라서 범위가 넓고 일정한 수치로 결정하기 어렵다. 한국도로공사 도로설계 실무편람의 토질분류표상에서 제시하고 있는 내부마찰각은 15°에서 40°의 범위를 이용하고 있다. 이에 근거하여 내부마찰각의 범위를 20°에서 40°의 범위에서 1°씩 증가시키면서 계산하여 <그림 9>에 나타내었다.

<그림 9> (A)는 내부마찰각이 작은 20°에서 30°범위와 하상경사가 큰 20°에서 30°범위에서는 체적농도가 극한치로 수렴하여 불연속적인 경계선을 보이고 있다. 이런 경우에 전체 계산상에 오차를 크게 할 수 있으므로 체적농도의 최대치를 적용하면 (B)와 같이 나타난다. 이 결과에서 내부마찰각이 20°인 경우, 하상경사는 20°보다 커지면 오히려 체적 농도가 0으로 접근하기 때문에 급경사지 부분에서 침식보다는 퇴적이 발생하는 오류가 생길 수 있다. 실제 현장에서 다양한 하상경사와 토질에 따른 안정적인 유사 체적농도 계산을 위해서는 체적농도 계산 결과에 대한 상, 하한값을 설정하는 것은 급경사지 부분에서 오류를 일으킬 가능성이 크다. 따라서 하상경사와 내부마찰각의 일정 범위에 대한 체적농도의 값을 미리 설정해 두고 적용하는 방법을 통해서 전체적으로 보다 안정적인 계산을 하는 것이 필요하다.



<그림 9> 하상경사와 20°에서 40°의 내부마찰각의 변화에 따른 평균농도 변화(A:제한치 없음, B:제한치 있음)

IV. 결론

본 연구에서는 유동학적 토석류 모델에서 이용되는 하상에서 유사의 균형농도식을 구성하는 인자들 중에서 하상경사, 입자밀도, 내부마찰각이 균형농도에 미치는 영향을 검토하였다. 실제 서울 우면산의 토석류 발생현장의 최고 경사는 30°에 가까우며 최상류 발생부보다는 약간 하류지역에서 급한 경사를 보이는 특징을 가지고 있었다. 주된 침식지역에서는 하상 경사가 10°에서 25°사이의 넓은 경사범위를 가지며 이동하다가 중, 하류 지역에 이르면 0°에서 10° 경사를 가졌다. 이러한 현장의 상황을 고려하여 하상경사 범위를 0°에서 50°까지, 입자의 비중을 2.5에서 3.0까지의 범위에서 변화시키면서 유사농도의 변화를 살펴보았다. 그 결과, 입자의 밀도는 유사농도에 큰 영향을 주지 않은 반면, 하상경사는 큰 영향을 주었다. 하상경사가 30°를 넘어서면 유사농도는 급격히 증가하다가 37°정도에서 -50이하로 크게 감소한 후 천천히 0으로 수렴하고 있다. 또한 하상경사 5°에서 30°의 범위에서 내부마찰각조건에 따른 유사농도를 계산한 결과, 하상경사 5°에서는 큰 차이가 없으나, 내부마찰각이 작아질수록 하상경사의 영향을 크게 받으며 증가하고 있었다. 특히 내부마찰각이 20°에서 30°의 범위와 하상경사가 20°에서 30°로 존재하는 범위에서는 체적농도가 극한치로 발산하는 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 토석류모델을 현장에 적용할 때는 하상경사와 내부마찰각의 일정 범위에 대한 체적농도의 값을 미리 설정해 두고 적용하는 방법을 통해서 전체적으로 보다 안정적인 계산을 하는 것이 필요하다고 판단되었다.

참고문헌

- 김경석. 2008. 토석류 발생 지형과 유발 강우 특성 분석. 대한토목학회지. 28(5C): 263-271.
- 김운형, 송병용, 이국현, 김범석. 2009. 토석류, 유목 대책에 관한 설계인자 분석. 한국지반환경공학회 논문집. 10(2): 69-76.
- Armento, M. C., R. Genevois, and P. R. Tecca. 2008. Comparison of Numerical Models of Two Debris Flows in the Cortina d' Ampezzo Area, Dolomites, Italy. *Engineering Geology*. 5: 143-150.
- Blijenberg, H. M. 2007. Application of Physical Modelling of Debris Flow Triggering to Field Conditions: Limitations Posed by Boundary Conditions. *Engineering Geology*. 91: 25-33.
- Brunsdon, D. 1999. Some Geomorphological Considerations for the Future Development of Landslide Models. *Geomorphology*. 30: 13-24.
- Chen, S. C., C. Y. Wu, and B. T. Huang. 2010. The Efficiency of a Risk Reduction Program for Debris-Flow Disasters - a Case Study of the Songhe Community in Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 10: 1591-1603.

- Crosta, G. B., H. Chen, and P. Frattini. 2006. Forecasting Hazard Scenarios and Implications for the Evaluation of Countermeasure Efficiency for Large Debris Avalanches. *Engineering Geology*. 83: 236-253.
- Imaizumi, F., T. Hattanji, and Y. S. Hayakawa. 2010. Channel Initiation by Surface and Subsurface Flows in a Steep Catchment of the Akaiishi Mountains, Japan. *Geomorphology*. 115: 32-42.
- Iverson, R. M. 1997. The Physics of Debris Flow. *Reviews of Geophysics*. 35(3): 245-296.
- Malet, J. P., D. Laigle, A. Remaitre, and O. Maquaire. 2006. Triggering Conditions and Mobility of Debris Flows Associated to Complex Earthflows. *Geomorphology*. 66: 215-235.
- Shuin, Y., N. Hotta, M. Suzuki, and K. Ogawa. 2012. Estimating the Effects of Heavy Rainfall Conditions on Shallow Landslides Using a Distributed Landslide Conceptual Model. *Physics and Chemistry of the Earth* 49: 44-51.
- Takahashi, T. 1977. A Mechanism of Occurrence of Mud-Debris Flows and their Characteristics in Motion. *Annuals. DPRI*. 20B-2: 405-435.
- Takahashi, T., H. Nakagawa, T. Harada, and Y. Yamashiki. 1992. Routing Debris Flows with Particle Segregation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118: 1490-1507.
- Takahashi, T. 2007. *Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. Tokyo: Taylor & Francis/Balkema.

田炳熙: 동경공업대학에서 “Study on Porous Carrier and Membrane Hybrid Process for Nitrogen Removal in Wastewater”로 공학박사학위를 취득하였으며(2000. 3), 현재는 강원대학교 삼척캠퍼스 소방방재학부 부교수로 재직중이다. 주 연구분야는 폐턴분류와 산지재해 분야다(bhjun@kangwon.ac.kr).

투 고 일: 2013년 09월 15일

수 정 일: 2013년 10월 28일

게재확정일: 2013년 10월 30일

The Study on the Effects of the Bed Slope and Internal Friction Angle on Mean Soil Volumetric Concentration in Debris-Flow model

Byong Hee Jun

In this study, we investigated the effects of the debris flow model parameters such as bed slope, soil density and internal friction angle on mean volumetric concentration. While the soil density showed little effect on mean concentration under the condition from 2.5 to 3.0, the bed slope greatly influenced on mean concentration. The mean concentration was increased steeply in high bed slope over 30° and dropped to -50 in bed slope of 37° and converged to zero. In lower bed slope of 5° , friction angle showed minor effects on mean concentration. However, in high bed slope, as friction angle got smaller, the mean concentration increased steeply. Especially, at the range of 20° to 30° of friction angle and bed slope, the mean concentration jumped discontinuity. For the stable simulation in field case, it was thought that a proper mean concentration value should be applied in particular range of bed slope and friction angle.

Key words: debris-flow, mean soil concentration, bed slope, internal friction angle