

지형분할 격자크기에 따른 토석류 흐름 특성

Characterization of Debris Flow at Various Topographical Division Sizes

진 현 우¹⁾ · 황 영 철[†]

Hyunwoo Jin · Youngcheol Hwang

Received: December 12th, 2014; Revised: December 26th, 2014; Accepted: February 10th, 2015

ABSTRACT : The rainfall pattern, rainfall intensity as well as topographical conditions used for the analysis of debris flow affect, in general, the magnitude of debris flow and flow velocity, when debris flow occurs. The consideration of topographical conditions implies that the topography is equally divided into grids and the slope of inside the grid is computed as an average, leading to, in turn, obtain the closer results to the reality as the grid is smaller in the case of the severely bended topography. Although the size of grid should be as small as possible so as for more accurate analysis of debris flow, the analysis of debris flow has been so far conducted by using sparsely divided grids due to the limitation of analysis algorithm, computational ability and running time. So, it is necessary to suggest an appropriate grid size for the practical approaches. Therefore, this study presents the evaluation of the effect of the size of a grid on the debris flow besides the factors which referred to the previous studies such as accumulated rainfall, rainfall intensity and rainfall duration time. From this, it enables to suggest a rational and practical grid size for topography to be divided.

Keywords : Debris flow, Grid size, Rainfall pattern

요 지 : 토석류가 발생할 때는 강우패턴, 강우강도 및 해석을 위한 지형여건에 따라 토석류의 발생량과 흐름의 속도가 달라진다. 지형여건의 고려는 일정규모의 격자로 지형을 구분하고 구분된 격자 내의 지형경사는 평균경사로 가정하여 계산하므로 굴곡이 심한 지형에서는 분할되는 격자를 세분할수록 실제와 근접한 결과를 얻을 수 있게 된다. 그러나 지금까지는 해석알고리즘 및 컴퓨터 계산능력, 해석수행 시간 등의 한계로 인해 지형분할 격자를 상당히 크게 구분하여 수행하고 있다. 그러나 토석류 해석의 정확도를 위해서는 지형구분 격자크기를 가급적 작게 하여야 하므로, 실무적 접근을 위한 적절한 격자규모의 제안이 필요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 기존 연구에서 논의되었던 누가 강우량, 강우강도, 강우지속시간 및 선행 강우량 등의 강우 특성 이외에 지형분할 격자크기가 토석류 흐름에 미치는 영향을 평가하고 이로부터 합리적이고 현실성 있는 지형분할규모를 제시하였다.

주요어 : 토석류, 격자크기, 강우패턴

1. 서 론

최근 기후변화로 인하여 국지적 집중호우가 빈발함에 따라 집중 호우에 의한 산사태 및 토사 유출에 의한 피해가 증가하고 있으며, 토석류 발생면적과 피해규모는 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 이에 따른 산사태(토석류)로부터 인명, 재산피해를 최소화하기 위해서는 산사태 정보의 정확도를 높여야 하는 실정이다. 현재 산림청에서는 산사태 정보시스템의 정확도를 향상하기 위해서 기존의 KLAPS(5km×5km)에서 MAPLE(1km×1km)로 개선하려 하고 있으며 산사태정보시스템의 공간정보를 이용하여 3차원 지도 서비스를 개발하고 있다.

토석류 흐름 해석에 대한 접근은 유동학적 모델을 이용

한 접근이나 침식과 퇴적모형을 이용한 접근 방법이 있다 (Wang et al., 2008; O'Brien & Julien, 1985, 1988; O'Brien et al., 1993; Kim & Seo, 1997a, 1997b; Iverson et al., 1997; Imran et al., 2001; Jeong, 2010, 2011; Takahashi & Tsujimoto, 1984). 이외에도 토석류 해석을 위한 방법으로 Singh와 Scarlatos가 개발한 BEED모형, Imran이 개발한 BING, Fred가 개발한 DAMBRK모형 및 그 외에 FLO-2D와 현재 연구개발단계에 있는 모형 등이 있다.

국내에서의 토석류 흐름과 관련한 연구는 Ryu et al.(2012)이 토석류 피해 데이터에 대한 통계적 분석을 수행하여 유역별 토석류 위험도 평가 모델을 제안하였으며, Kim et al.(2009)은 2002년 8월 말 태풍 '루사'로 인하여 큰 피해를 입은 강릉 연곡천을 대상으로 격자형 강우자료와 GIS자료를

1) Department of Civil Engineering, Sangji University

† Department of Civil Engineering, Sangji University (Corresponding Author : ychwang@sangji.ac.kr)

이용하여 토석류 발생 위험도를 시, 공간적으로 비교·분석하였다. Kim et al.(2014)은 LiDAR DEM을 기반으로 우면산 토석류 모의실험을 실시하였고, 1m 해상도를 기반으로 지형데이터를 이용하였다. 하지만 FLO-2D 모델 자체의 한계와 분석시간의 한계로 Grid Size를 임의로 선정하여 접근하였다. Hwang et al.(2012)은 국내 산사태나 토석류 예보 기준은 시간최대강우량 혹은 연속 일강우량을 기본으로 설정하고 있으나, 짧은 지속기간에 큰 강우강도를 가지는 국지성 호우가 급격히 증가하고 있는 최근의 호우 패턴을 고려할 때, 1시간 이하 강우량을 이용한 토석류 발생시점에 대한 분석과 검증이 필요하다고 하였다.

국외에서는 눈사태, 토석류 및 낙석에 관한 중력 자연재해를 분석하기 위하여 입체 산악 지형 모델의 규격을 단순화하기 위한 인터페이스 조건 및 모델 파라미터를 분석하였으며(Christen et al., 2012), 여러 모델의 저항법과 Voellmy 모델을 이용한 토석류의 역학적 패턴과 수치결과를 비교·분석하여 현장실험 데이터와 일치하는지를 분석하였다(Medina et al., 2008). 또한 Voellmy 유체 유동성과 Bingham의 quadratic rheologic, 난류응력 및 점성을 나타내는 Herschel-Bulkley rheology로 모델 되었으며, 이에 현장실험을 통하여 측정하였다. 이 세 모델의 토석류 기록데이터를 사용하여 보정, 합리적인 토석류의 퇴적 패턴을 재현할 수 있었다(Rickenmann et al., 2006). 하지만 국내에서는 토석류 해석에 필요한 인자와 관련한 시험방법 및 시험자료가 정제화되어 있지 않은 상태이므로 이에 따른 토석류의 유동성 및 퇴적 패턴 등에 대한 연구가 필요하다.

기존의 연구에서는 산사태(토석류) 안정성을 검토하는 경우 누가 강우량, 강우강도, 강우지속시간 및 선행 강우량 등의 강우 특성과 토석류 발생과의 관계를 주로 제시하고 있으나, 또 다른 인자인 지형분할 격자크기에 따른 영향은 고려되지 않았다.

2. 지배방정식

DEM에 의한 경사와 유역 분석은 기본적으로 규칙적인 격자 DEM과 TIN이 지형표면을 표현하는데 사용된다. 지표면의 형상을 나타내는 가장 일반적인 수치자료는 셀을 기반으로 하는 규칙적인 격자 DEM이며, 이 자료는 지표면의 특징을 정향화하여 GRID 분석의 입력 자료로 이용된다.

경사방향에서 지표면의 굴곡은 굴곡에 대하여 종단면으로 나타낼 수 있으며, 종단면상에 굴곡이 있는 곳에서는 흐름의 가속이나 감속에 의하여 지표면을 오목하거나 볼록하게 만든다. 이러한 지역에서 흐름에 가속이 생기면 하천은

에너지가 집중되고 수송능력이 증가하게 된다. 따라서 Fig. 1의 수면곡선에서 보는 바와 같이 볼록한 굴곡이 있는 종단면에서는 침식이 발생할 수 있는 지역이고, 오목한 굴곡의 종단면 지역에서는 흐름율이 감소하며 하천에서의 에너지도 감소하게 되어 퇴적이 발생된다.

규칙적인 격자구조 DEM에서 경사는 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$\tan S = \sqrt{\left[\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2\right]} \quad (1)$$

여기서 z는 고도축이고 x와 y는 평면 축이다. 경사방향은 Eq. (2)와 같이 정의된다.

$$\tan A = -\frac{\left(\frac{dz}{dy}\right)}{\left(\frac{dz}{dx}\right)} \quad [-\pi < A < \pi] \quad (2)$$

Fig. 2에서 보는 바와 같이 대부분의 경사와 경사방향을 계산하는 방법은 격자상에서 움직이는 3×3 대상영역을 이용한다. 유한미분방정식으로 방정식 (3)과 (4)에 정의된 부

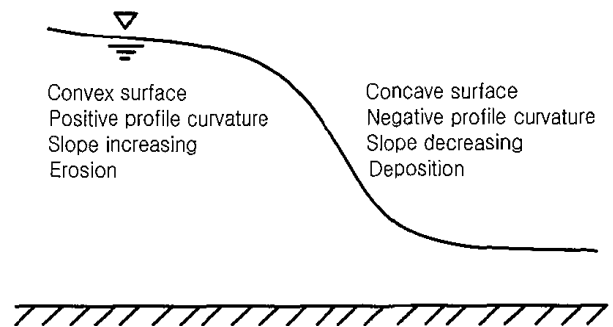


Fig. 1. Longitudinal section of terrain slope

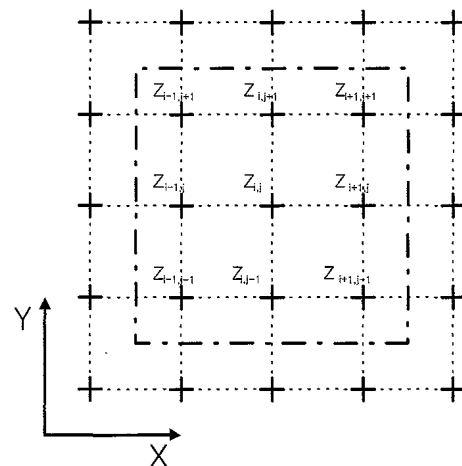


Fig. 2. Target area of 3x3

분도함수를 계산한다. 유한미분을 계산하는 가장 단순한 방법은 대상영역 중앙점의 위, 아래, 옆에 인접한 것을 계산하는 것이다. 그러므로 dz/dx 와 dz/dy 유한미분은 Eq. (3), (4)와 같이 정의된다.

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(z_{i+1,j} - z_{i-1,j})}{(2Dx)} \quad (3)$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(z_{i,j+1} - z_{i,j-1})}{(2Dy)} \quad (4)$$

여기서 Dx 와 Dy 는 x 와 y 방향에서 셀 중앙사이의 거리이다.

Skidmore는 위에서 언급한 방법을 포함해서 몇 가지 방법을 비교·분석하였다(Skidmore, 1989). 이 방법은 수치해석을 근거로 하여 유한미분을 계산하기 위해서 Eq. (5), (6)과 같은 방정식을 이용하였다.

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(z_{i+1,j+1} + 2z_{i+1,j} + z_{i+1,j-1})}{8Dx} - \frac{(z_{j-1,j+1} + 2z_{i-1,j} + z_{i-1,j-1})}{8Dx} \quad (5)$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(z_{i+1,j+1} + 2z_{i+1,j+1} + z_{i-1,j-1})}{8Dy} - \frac{(z_{j+1,j-1} + 2z_{i,j-1} + z_{i-1,j-1})}{8Dy} \quad (6)$$

Voellmy-fluid friction model은 X 와 Y 가 고정 직교좌표계의 수평 좌표를 나타내고, X 와 Y 의 매개 변수와 한 측면을 $Z(X, Y)$ 로 나타낸다. 독립변수 X 와 Y 는 표면 지형을 따라 호의 길이를 나타내고, Z 좌표는 측면(Fig. 3)에 수직이다. 좌표(X, Y, Z)는 표면을 유도하고, 이것의 방향은 표면의 위치에 따라 달라진다. 중력가속도 $g=(GX, GY, GZ)$ 의 벡터

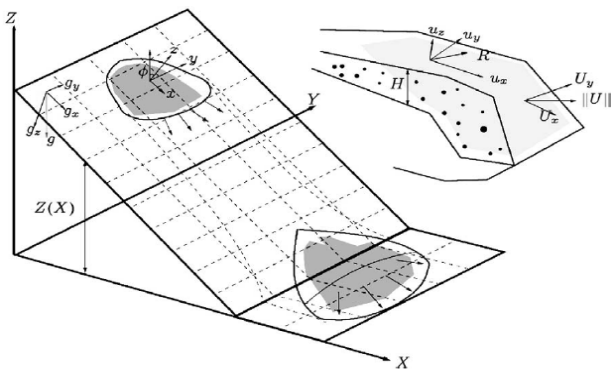


Fig. 3. Transformation of coordinates from local $x, y,$ and z to global X, Y and Z by projection for a structured mesh

X 와 Y 의 경우 일반적으로 0이 아닌 3가지 성분을 가지고 있다. 시간 t 는 독립 변수로 한다.

Fig. 3에서 지형 Z 는 (X, Y) 직교를 제시하고 X 와 Y 는 수평 좌표를 나타내며, 지역 좌표 X, Y, Z 는 표면을 유도한다. 이같이 불연속 되는 X, Y 는 구조화된 mesh의 평면 결과이다. 얇은 자유 표면 흐름에 대한 연속체 모델에 대한 정보는 Savage & Hutter(1989), Pudasaini & Hutter(2007)에서 정의되었다.

이와 같은 식으로부터 질량의 균형, 가속도의 추정, 지반의 마찰저항 등을 고려하여 다음의 Voellmy-fluid friction model이 정의되었다.

$$S = \mu \rho H g \cos(\varnothing) + \frac{\rho g U^2}{\xi} \quad (7)$$

여기서 μ : 밀도, g : 중력 가속도, \varnothing : 마찰각, H : 흐름의 높이, U : 흐름의 속도, 표면에 수직응력은 $\rho H g \cos(\varnothing)$ 값을 나타낸다.

3. 붕괴지역 역해석을 통한 해석 입력변수 추정

본 논문에서는 지형분할 격자크기에 따른 산지계곡 부의 토석류 발생 가능성 및 평가를 하기 위해 수치해석기법을 이용한 접근방법을 사용하였으며, 사용프로그램인 Ramms는 지형정보, 강우량 정보, 지반정보를 이용하게 된다. 이 정보들을 이용하여 토석류의 흐름 속도, 흐름 높이, 흐름 압력 등을 계산할 수 있으며, 사방댐과 같은 대책공법이 설치되었을 경우에도 이를 해석하여 효과를 파악할 수 있다. 강우패턴의 경우 최근의 호우 패턴을 고려할 때, 1시간 이하 강우량을 이용한 토석류 발생 시점에 대한 분석과 검증이 필요할 것으로 판단되어 ‘한국화물강우량도’(건설교통부, 2000)을 참고 하였으며, 프로그램 실행 시간은 각각 3,600s으로 100년 빈도 시우량인 110.5mm/hr를 기준으로 유량을 산출하기 위해 합리식(Lloyd-Davies, 1906)을 사용하였고, 추정된 최대유량은 1.2m³/sec로 나타났다.

국내의 경우 토석류 해석에 필요한 인자와 관련된 시험 방법이나 시험자료가 정제화되어 있지 않은 상태이다. 따라서 필요한 물성값을 추정하기 위하여 붕괴가 발생한 지역을 대상으로 역해석을 수행하였다.

본 연구대상 지역 인근에는 과거에 토석류가 발생하였으며, 경기도 소화천정비 종합계획에 의하면 2011년 7월 26~28일경 발생한 것으로 보고되어 붕괴발생 당시의 기상정

AWS 강우정보를 활용하여 분석에 이용하였다. 당시 강우량은 578mm이고 붕괴당시 최대시우량은 72mm였다.

이로부터 추정된 지반 물성데이터는 Table 1과 같다.

해석에 필요한 수치지도의 경우 수치지형도 1:1,000 축적을 이용하였고, Arc-GIS를 이용하여 지형분할 격자크기를 10m, 5m, 2m, 1m로 각각 지형 데이터를 작성하였다(Fig. 4).

4. 결과분석 및 고찰

4.1 지형분할 격자크기에 따른 토석류의 최대 높이 및 속도

지형분할 격자크기에 따른 해석결과와 영향을 확인하기 위하여 계곡 부에 형성되는 토석류의 최대 높이지점을 대상으로 토석류의 경사 및 최대 속도를 비교하였다. Fig. 5는 지형분할을 위한 격자의 크기를 각각 10m, 5m, 2m, 1m로 하였을 경우의 흐름 발생 높이를 나타낸 것이다. 해석결과에서와같이 지형분할 격자크기에 따라 흐름 발생 위치 및 흐름 정도가 상이한 것으로 나타나고, 지형분할 격자크기가

작을수록 보다 많은 지역에서 흐름이 발생하고 흐름 속도도 빨라지는 것으로 해석되었다.

토석류 흐름 해석결과로부터, 지형분할 격자 크기별로 최대 토석류 흐름이 발생하는 구간을 비교하였다(Table 2). 표에서 시간과 거리는 각각 흐름 발생 시점으로부터의 경과시간과 거리를 나타낸다. 최대 높이의 흐름은 거의 동일한 지역에서 발생하는 것으로 나타났으며, 각 격자크기별로 조금씩 발생위치가 다른 것은 지형을 분할함에 따라 얻어지는 정보의 위치가 다르기 때문이며 발생위치별로 크게 차이가 나지 않으므로 동일한 위치라고 간주하고 그 결과를 비교하였다. 토석류의 최대 높이는 격자의 크기가 작을수록 높게 나타났으며 흐름 속도는 1m나 2m 격자크기보다 5m로 지형을 분할한 경우가 속도가 크게 나타나 뚜렷한 경향이 관찰되지 않았다. 이러한 영향은 지형을 세분함에 따라 경사가 구간별로 급한 지형을 충분히 반영함으로써 흐름량이 많아지게 되어 흐름 높이가 높아진 것으로 판단되며, 흐름 속도의 경우는 흐름에너지를 완충하는 지형이 큰 지형분할에 의해 무시될 경우 오히려 흐름 속도가 크게 해석될 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

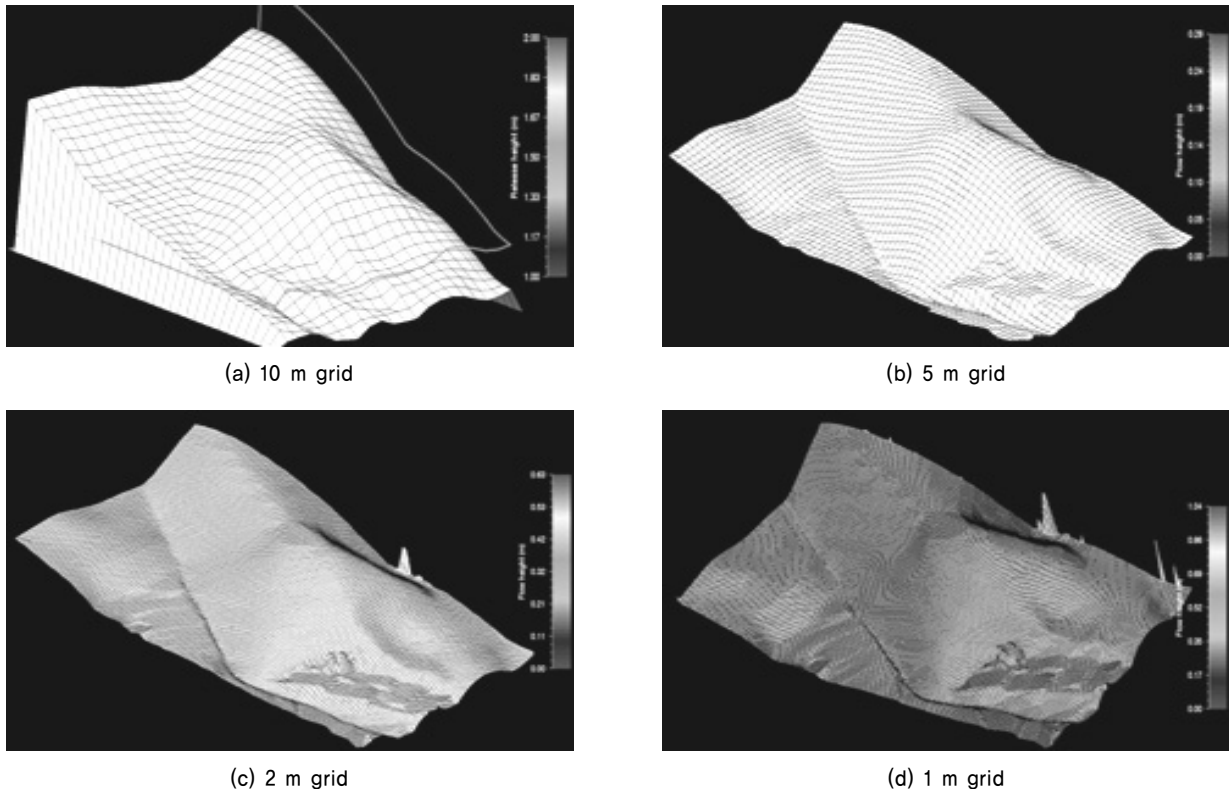


Fig. 4. Grid modelling

Table 1. Input data (Soil properties)

Division	Vol (m ³)	Q max (m ³ /s)	t1 (s)	v (m/s)	ξ	μ	ρ (kg/m ³)
Hourly rainfall	2,006.5	1.2	1,800	1	100	0.2	1,726

4.2 격자크기에 따른 최대 토석류 량 비교·분석

동일한 지역에서의 지형분할 격자크기에 따라 발생하는 최대 토석류 량을 비교하였다. 토석류 흐름은 지형의 경사에 따라 영향을 받으며, 지형의 굴곡이 잘 표현될수록 정확한 해석결과를 얻을 수 있을 것이다. Fig. 6 및 Table 3에서와 같이 지형분할 격자별로 상당한 차이가 발생하는 것으로 해석되었다. 10m로 지형을 분할한 경우의 최대 토석류 량을 기준으로 비교할 경우, 지형을 5m로 분할하였을 경우는 10m로 분할하여 해석한 경우보다 최대 토석류 량이 약 57.8% 증가하는 것으로 계산되었으며, 2m 격자는 68.8%, 1m 격자는 138.1%가 증가하는 것으로 계산되었다. 본 연구에서는 등고선간격이 1m인 지형도를 이용하여 해석하였으므로 더 작은 격자크기에 대해서는 수행하지 않았다. 해석결과 지형분할 격자크기에 따라 토석류 발생량의 차이가 상당히 크게 발생하는 것으로 분석되어 토석류 발생 위험지에서의 방재 대책 수립 시 지형분할 격자의 크기는 매우 중요한 해석인자라고 판단된다.

4.3 격자크기에 따른 시간별 토석류 거동

Grid 크기(1m, 2m, 5m, 10m) 별 시간에 따른 토석류의

움직임을 분석한 결과는 Fig. 7과 같다. 세로축은 전체 분할 격자 중 흐름이 발생한 격자의 비율을 나타낸 것으로 각 격자에서 흐름이 발생한 후 시간 경과에 따라 흐름이 멈추게 됨을 나타낸다. 그림에서와같이 격자크기가 큰 경우(10m, 5m)는 지형의 부분적 급경사지를 무시하게 될 가능성이 크기 때문에 격자의 크기가 작은 경우에 비하여 흐름이 발생한 격자의 비율이 다소 낮은 것으로 나타났다. 이러한 영향으로부터 토석류의 해석 시 지형분할 격자의 크기는 매우 중요한 요소인 것으로 판단된다.

4.4 산림청 산사태 정보시스템과의 비교

산림청의 산사태 위험지도는 수치지형도의 경우 1/5,000 도면이 활용되었으며, 지형분할 격자크기는 10m가 적용되어 작성된 것이다. 산림청의 산사태 위험지도에서 본 연구 대상 지역과 동일한 위치에 대한 결과를 비교하였다. 확인 결과 대상지역의 계곡 부는 Fig. 8에서 보는 것과 같이 5등급으로 매우 안정한 상태를 나타내고 있으며, 이는 본 연구에서 10m 격자크기를 이용하여 해석하였을 경우와 유사한 상태인 것으로 판단된다. 산사태 정보시스템의 경우 전국의 산지에 대한 위험정보를 분석해야 하므로 개략적인 정보를

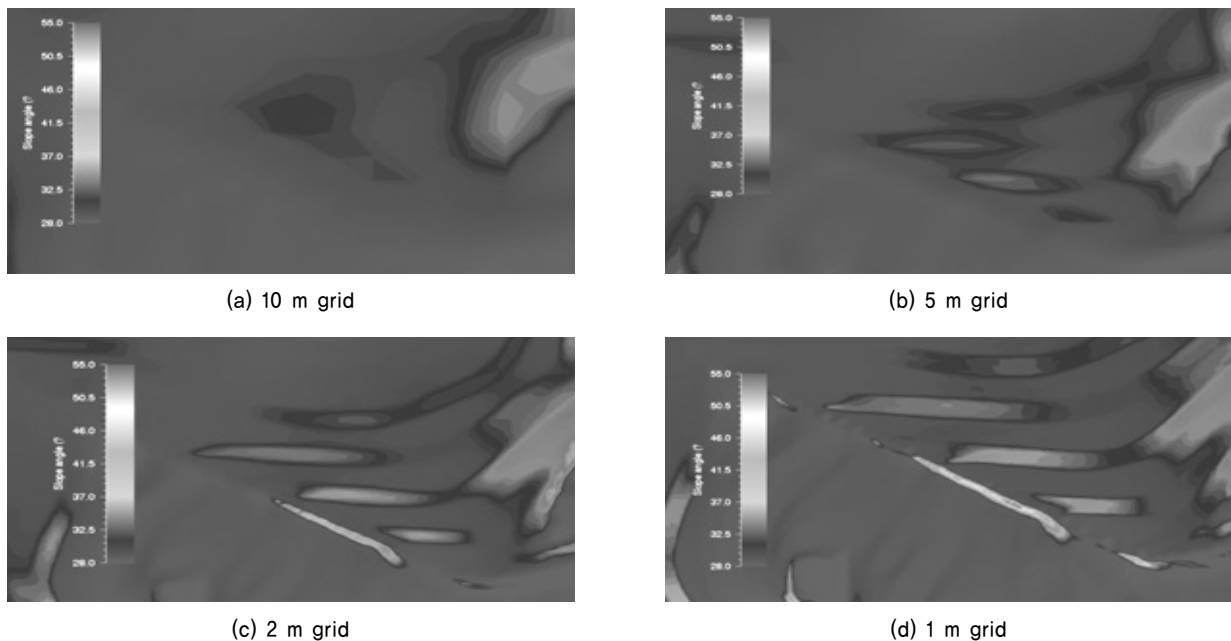


Fig. 5. Contour plots of velocity at various grid sizes

Table 2. Maximum height and velocity of debris flow at various (different) grid sizes

	Max. height (m)	At time (s)	Distance (m)	Max. velocity (m/s)
1 m grid	0.78753	1,635	195	2.32
2 m grid	0.45741	1,615	198	2.32
5 m grid	0.296203	1,565	186	2.6
10 m grid	0.126235	470	175	0

지원하고 있는 형태이다. 따라서 특정지역에 대한 토석류 흐름에 대한 예측을 위해서는 해석모델, 지반물성치 등의 정확한 정보뿐만 아니라 지형분할 격자의 크기도 고려하여 예측하는 것이 필요하다고 판단된다.

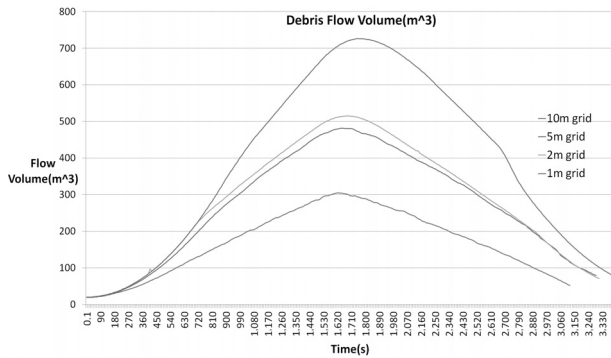


Fig. 6. Debris flow volume at various (different) grid sizes

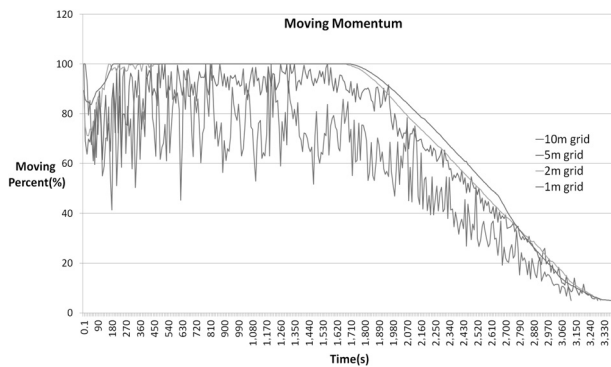


Fig. 7. Moving momentum of total debris flow at various (different) grid sizes

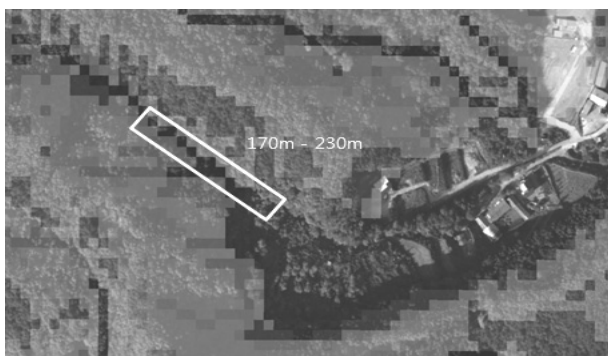


Fig. 8. Landslide risk map (Forest service)

5. 결 론

지금까지의 토석류 흐름과 관련된 연구는 흐름 해석을 위한 모델 위주로 진행되어 왔고, 실제 거동분석을 위한 해석은 주로 강우량과 관련된 인자나 지반조건, 식생조건 등에 대한 입력변수 위주로 수행되어 왔으나, 본 연구결과 지형을 반영하기 위한 지형분할 격자크기도 토석류 흐름 해석 결과에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서는 지형분할 격자크기가 토석류 흐름에 미치는 영향을 분석하기 위하여 Voellmy-salm model을 이용한 토석류 해석 프로그램을 이용하여 결과를 비교하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 지형분할 격자크기는 1:1,000 수치지형도와 Arc-GIS를 이용하여 1m, 2m, 5m, 10m의 크기로 구분하였으며, 토석류 해석을 위한 적용 강우량은 지속기간별 확률강우량으로 100년 빈도의 강우강도를 적용하였다. 지반정보 데이터의 경우는 국내의 경우 토석류 해석에 필요한 인자와 관련된 시험방법이나 시험자료가 정제화되어 있지 않은 상태이므로 인근 붕괴가 발생한 지역을 대상으로 역해석하여 물성치를 추정하고 이를 활용하였다.
- (2) 지형분할 크기별로 토석류의 흐름량, 흐름 속도, 흐름 높이 등을 비교·분석한 결과, 흐름 속도는 뚜렷한 경향을 보이지는 않으나, 토석류의 흐름량 및 흐름 높이의 경우는 지형분할 격자크기를 작게 할수록 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 영향은 지형을 세분함에 따라 경사가 구간별로 급한 지형을 충분히 반영함으로써 흐름량이 많아지게 되어 흐름 높이가 높아진 것으로 판단되며, 흐름 속도의 경우는 흐름에너지를 완충하는 지형이 큰 지형분할에 의해 무시될 경우, 오히려 흐름 속도가 크게 해석될 수 있기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 산림청 산사태 정보시스템의 산사태 위험지도에서 본 대상지역의 계곡 부에 관한 위험도는 5등급(안전)으로 나타났으며, 이 결과는 10m 격자를 활용한 해석결과와 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 동일한 해석조건에 대해서 격자크기를 달리했을 경우, 상당히 많은 부분에서 흐름이 발생하는 것으로 계산되었으며 이는 지형분

Table 3. Increase rate of debris flow at various (different) grid sizes

	Max. volume of debris flow (m ³)	Time (s)	Rate of increase (%)
10 m grid	304.968	1,630	-
5 m grid	481.185	1,650	57.78
2 m grid	514.747	1,680	68.79
1 m grid	726.035	1,750	138.07

할 격자크기가 해석결과에 상당히 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

- (4) 따라서 가급적 지형도에서 표시하는 등고선 간격을 활용하는 것이 보다 실제적인 해석이 될 수 있으며, 지형의 굴곡여부 등 여건에 따라 가급적 세부적으로 구분하여 활용하는 것이 필요하다고 확인되었다. 현실적으로 지금까지 지형분할 격자크기는 해석을 위한 주요고려 인자가 아니었으며, 광범위한 지역을 해석하고자 하는 경우에는 해석수행시간의 과다로 상당히 큰 지형분할 격자가 활용되었으나, 본 연구결과를 통하여 지형분할 크기에 따라 해석결과의 차이가 매우 뚜렷하게 발생함이 확인되었으므로 지형여건을 충분히 반영할 수 있는 지형분할 규모가 활용되어야 할 것이다.

References

1. 건설교통부 (2000), 1999년도 수자원관리기법 개발연구조사 보고서 제1권 별책부록, 한국건설기술연구원, pp. 1~60.
2. Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Glover, J., Schweizer, A., Graf, C., McArdell, B. W., Gerber, W., Deubelbeiss, Y., Feistl, T. and Volkwein, A. (2012), Integral hazard management using a unified software environment, 12th Congress INTERPRAEVENT 2012 - Grenoble / France, pp. 77~86.
3. Hwang, S. H., Kim, H. J., Ham, D. H. and Lee, D. R. (2012), Review of domestic landslide and debris flow forecast standard using hydrologic data, Korean Society of Civil Engineers (KSCE), pp. 1895~1898 (in Korean).
4. Imran, J., Harff, P. and Parker, G. (2001), A numerical model of submarine debris flow with graphical user interface, computers & geosciences, Vol. 27, No. 6, pp. 717~729.
5. Iverson, R. M., Ried, M. E. and LaHusen, R. G. (1997), Debris-flow mobilization from landslides, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 25, pp. 85~138.
6. Jeong, S. W. (2010), Flow characteristics of landslides/debris flows: sediment rheology and mobility and mobility of landslides, Proceedings of Korean Society of Engineering Geology (KSEG) Conference 2010, KSEG, pp. 79~80 (in Korean).
7. Jeong, S. W. (2011), Rheological models for describing fine-laden debris flows: grain-size effect, Journal of Korean Geotechnical Society, Vol. 27, No. 6, pp. 49~61 (in Korean).
8. Kim, B. S., Bae, Y. H. and Hong, S. J. (2009), A risk assessment of flash flood and debris flow occurrence using gridded rainfall, Korean Society of Civil Engineers(KSCE), pp. 2691~2694 (in Korean).
9. Kim, S. K. and Seo, H. S. (1997a), An analysis of debris flow movement using rheological model, Journal of Korean Geotechnical Society (KGS), Vol. 13, No. 5, pp. 133~143 (in Korean).
10. Kim, S. K. and Seo, H. S. (1997b), Rheological characteristics of debris flows, Journal of Korean Geotechnical Society (KGS), Vol. 13, No. 5, pp. 125~131 (in Korean).
11. Kim, T. Y., Yoon, H. S., Cho, J. M. and Kim, H. (2014), Study of debris flow simulation FLO-2D model based on LiDAR DEM of Mt. umyeon, The Korean Society of Disaster Information (KOSDI), pp. 161~162 (in Korean).
12. Lloyd-Davies, D. E. (1906), The elimination of storm water from sewerage systems. Proc., Inst. Civ. Eng., London, Vol. 164, pp. 41~67.
13. Medina, V., Hürlimann, M. and Bateman, A. (2008), Application of FLATModel, a 2D finite volume code, to debris flows in the northeastern part of the Iberian Peninsula, Landslides Vol. 5, pp. 127~142.
14. O'Brien, J. S. and Julien, P. Y. (1985), Physical properties and mechanics of hyper-concentrated sediment flows, Proceedings of the Specialty Conference on Delineation of Landslide, Flash Flood and Debris Flow Hazard in Utah, Utah State University, Utah, pp. 260~279.
15. O'Brien, J. S. and Julien, P. Y. (1988), Laboratory analysis of mud flow properties, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 114, No. 8, pp. 877~887.
16. O'Brien, J. S., Julien, P. Y. and Fullerton, W. T. (1993), Two-dimensional water flood and mudflow simulation, J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 119, No. 2, pp. 244~261.
17. Pudasaini, S. and Hutter, K. (2007), Avalanche dynamics-dynamics of rapid flows of dense granular avalanches. Springer-Verlag, Berlin. pp. 96~110.
18. Rickenmann, D., Laigle, D., McArdell, B. W. and Hübl, J. (2006), Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events, Computational Geosciences, Vol. 10, pp. 241~264.
19. Ryu, H. J., Shin, J. H., Seo, H. S., Kim, G. H. and Lee, S. W. (2012), A model for evaluation of debris flow risk in a watershed, Korean Society Of Hazard Mitigation, Vol. 12, pp. 67~76 (in Korean).
20. Savage, S. and Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of a granular material down a rough incline, Journal of Fluid Mechanics Vol. 199, pp. 177~215.
21. Skidmore, A. K. (1989), A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from a gridded DEM, International Journal of GIS, Vol. 3 pp. 323~334.
22. 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).
23. 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.