

유동학적 인자에 따른 토석류의 이동 및 퇴적 특성

Movement and Deposition Characteristics of Debris Flow According to Rheological Factors

이 미 지¹ Lee, Mi-Ji

김 윤 태² Kim, Yun-Tae

Abstract

Most of the landslides induced by rainfall in summer rainy season appear in the type of debris flow. Debris flow gives a lot of economic losses and human casualties due to high moving velocity and volume of debris flow. In order to analyze movement and deposition characteristics of debris flow, numerical analysis using FLO-2D program was conducted with various viscosities and yield stresses. As a result of numerical analysis, velocity and runout distance of debris flow decreased as its viscosity increased due to resisting force between particles of debris flow. Consequently, flow depth of debris flow increased and impact force decreased. Yield stress of debris flow affected its initiation and deposition characteristics. As yield stress increased, runout distance of debris flow decreased and its impact force increased. Based on the results of numerical analysis, it was found that velocity of debris flow mainly depended on viscosity, while deposition characteristics (runout distance, deposition width, deposition area) of debris flow depended on both viscosity and yield stress.

요 지

여름철 강우로 인한 산사태는 대부분 토석류의 형태로 나타난다. 토석류는 빠른 이동속도와 체적 때문에 경제적 손실 뿐만 아니라 많은 인명피해를 일으킨다. 토석류 해석 프로그램인 FLO-2D를 사용하여 유동학적 인자인 점성과 항복응력에 따른 토석류의 이동과 퇴적 특성을 분석하였다. 수치해석을 수행한 결과, 점성이 증가할수록 토석류 입자 간의 응집력이 증가하여 토석류의 퇴적거리와 속도가 감소한다. 그에 따라 유동심은 증가하고 충격력은 감소하였다. 항복응력은 토석류의 발생과 퇴적에 큰 영향을 미치는 요인이다. 항복응력이 증가할수록 충격력은 증가하였다. 수치 해석 결과에 의하면, 토석류의 이동속도는 주로 점성에 의존하나 토석류의 퇴적 특성(퇴적거리, 퇴적 폭, 퇴적면적)은 점성과 항복응력에 의존한다.

Keywords : FLO-2D, Debris flow, Yield stress, Viscosity

1. 서 론

국내에서 대부분의 사면파괴는 여름철에 주로 발생

하는 태풍 및 집중호우로 인해 유발된다. 또한 최근 이 상기후로 인해 1996년 이후부터 매년 여름철 강수량이 800mm를 초과하고 있다. 이러한 강수량의 증가로 산사

1 정회원, 부경대학교 해양공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ.)

2 정회원, 부경대학교 해양공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Ocean Engrg., Pukyong National Univ., Tel: +82-51-629-6587, Fax: +82-51-629-6590, yuntkim@pknu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

태의 발생 빈도 또한 증가하고 있다. 우리나라의 경우 국토 면적의 70%가 산지로서, 이 산지에서 산사태가 발생할 경우 도로 유실, 매몰과 같은 경제적 손실 뿐만 아니라 많은 인명피해를 유발한다. 특히 도심지의 경우 자연사면 또는 인공사면이 붕괴될 경우 더 많은 경제적 손실과 인명피해를 낼 수 있다. Fig. 1은 2011년 7, 8월 호우로 인한 급경사지 피해를 사망자 수로 나타낸 그림이다. 급경사지 재해를 크게 활동과 토석류로 나누어 그에 따른 사망자 수를 나타내었다. 이를 통해 2011년도만 하더라도 국내에서 발생하는 산사태 중에서 토석류로 인한 사망자 수가 전체 급경사지 재해로 인한 사망자 수의 75% 이상을 차지하고 있어 토석류로 인한 인명피해가 월등히 크음을 알 수 있다. 급경사지 재해로 인한 인명피해와 경제적 손실을 줄이기 위해 산사태, 특히 토석류의 거동에 대한 이해를 바탕으로 산사태 피해 저감을 위한 대책이 빨리 마련되어야 함을 알 수 있다.

토석류는 일반적인 산사태와는 달리 많은 물을 함유함으로써 암석과 같은 큰 입자들을 포함하고, 토체가 아닌 혼합체로 거동하는 특징을 지닌다. 많은 연구자들에 의해 토석류는 비선형적인 점도를 가지는 비뉴턴 유체로 거동한다고 알려졌다. 이에 따라 토석류의 이동을 점성을 가지는 유체의 이동으로 간주하여 유동학적 모델로 해석하였다(O'Brien and Julien, 1985; Kim and Seo, 1997a, b; Iverson et al., 1997; Imran et al., 2001; Jeong 2010, 2011). 특히 비뉴턴 유체의 거동을 설명하는 유동학적 모델 중 토석류의 거동을 가장 잘 표현하는 Bingham 모델을 기반으로 하여 실제 토석류 재해이력을 모의한 연구가 많다. 그러나 지형학적, 지질학적, 토질공학적 요소 등이 모두 결합되어 나타나는 토석류의 이동 메커니즘을 유동학적 모델만으로 해석하기에는 많은 어려움이

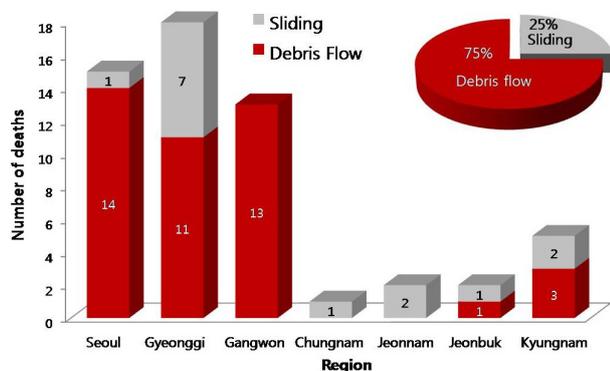


Fig. 1. The damage of steep slope failure due to heavy rainfall in 2011

있다(Iverson, 2003). 또한 토석류는 이동속도가 빠르고 이동거리가 길어 피해 범위가 넓은 것이 특징이며, 피해 지역을 예측하는 것 또한 어렵다. 토석류에 대한 피해를 최소화하기 위해서는 피해 지역을 예측하여 사용을 제한하도록 하여야 한다. 그러기 위해서는 토석류의 이동 특성을 이해하고 이동범위를 예측하는 것이 매우 중요하다.

국외에서는 유동학적 실험과 유동학적 모델을 기반으로 한 수치해석 기법이 많이 개발되었으며, 개발된 수치해석 프로그램을 통해 모의한 결과와 실제 토석류의 피해범위나 이동속도, 유동심 등을 비교, 분석한 연구가 주로 진행되어 왔다(Imran et al., 2001; Iverson, 2003; D. Rickenmann et al., 2006; O'Brien et al., 1993). 하지만 국내에서는 토석류를 유동학적인 모델로 분석한 연구는 아직 기초단계에 있다고 할 수 있다. 따라서 사면을 구성하는 지반의 유동학적 인자에 따른 토석류 이동 및 퇴적 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 2011년 ○○에서 발생한 토석류의 기본 데이터를 바탕으로 유동학적 인자인 점성과 항복응력의 변화에 따른 토석류의 이동 및 퇴적 특성을 수치해석을 통해 분석하였다. 수치해석에 사용된 토석류 해석 프로그램은 FLO-2D로서 유동학적인 모델을 기반으로 하고 있다.

2. FLO-2D

2.1 개요

FLO-2D는 미국 콜로라도 주립 대학의 O'Brien 등 (1993)이 유한차분법을 이용하여 개발한 프로그램이다. 해석 범위를 일정한 크기의 그리드로 나누고 범람, 홍수, 유역강우 및 유출, 해일, 토사이동 및 토석류 등을 포함하는 홍수 위험을 예측하여 관련 지도를 작성하는 2차원 해석 소프트웨어로서 수리학 분야에서 주로 쓰이고 있다. 격자와 시간에 상관없이 결과 값을 산정할 수 있으며, 다른 프로그램과의 연동이 쉽다는 것이 장점이다. 그러나 토석류 모의 시 하상침식에 의한 토석류 증가를 고려할 수 없고, 토석류의 이동, 퇴적, 확산 등과 같은 모의만 가능하다는 단점이 있다.

2.2 모델링

FLO-2D는 지배방정식으로서 식 (1)의 연속방정식과

식 (2), (3)의 운동방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} + \frac{\partial h V_y}{\partial y} = i \quad (1)$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (2)$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_y}{\partial y} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_y}{\partial t} \quad (3)$$

식 (1)에서 h 는 토석류의 유동심, V_x 와 V_y 는 각각 유동심을 통해 산정된 x 방향과 y 방향의 이동속도, i 는 강우강도를 뜻한다. 식 (2)와 (3)은 각각 x 방향과 y 방향의 마찰경사(friction slope)로서 대류가속도와 국부가속도, 압력구배와 바닥경사를 통해 산정되는 것을 알 수 있다(Rickenmann 등, 2006). 마찰경사란 유체흐름에서 마찰에 의하여 손실되는 에너지를 고려한 에너지선의 경사를 의미한다. 또한, 운동 방정식 중 시간 변화에 의해서만 변하는 가속도를 국부가속도(local acceleration)라고 하며 위치 변화에 의해서만 변하는 가속도를 대류가속도(convective acceleration)라고 한다.

토석류의 흐름은 전단속도(dv/dy)에 따른 2차 유동학 모델인 식 (4)를 기반으로 해석된다. τ_y 는 Bingham 모델의 항복응력, η 은 Bingham 모델의 점성을 뜻하며 이 두 항은 Bingham 모델의 총 전단응력을 의미한다. 세 번째 항은 분산과 난류 전단응력의 물리적 의미를

담고 있으며, C 는 관성 전단응력 계수로 토석류의 밀도와 체적농도의 함수로 구성되어 있다. 식 (4)를 식 (5)와 같은 dimensionless slope으로 변환하여 이동속도(V)와 토석류의 흐름두께인 유동심(h)을 구하게 된다(O'Brien et al., 1993).

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (4)$$

$$S_f = \frac{\tau_y}{\rho gh} + \frac{K_1 \eta V}{8 \rho gh^2} + \frac{n^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (5)$$

여기서, ρ 는 토석류의 밀도, g 는 중력가속도, K_1 은 층류 저항계수로서 범위는 24~50000이며, 24일 때가 가장 저항이 작은 값이다. n 은 매닝계수로서 난류 경계 마찰과 내부 충돌응력을 의미한다.

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_V} \quad (6)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_V} \quad (7)$$

$$C_V = \frac{\text{Volume of sediment}}{\text{Volume of water and sediment}} \quad (8)$$

FLO-2D에서는 체적농도에 따른 흐름 특성을 Table 1과 같이 크게 Landslide, Mud flow, Mud Flood, Water Flood의 4단계로 나누었다(FLO-2D, 2004).

Table 1. Flow behavior as a function of sediment concentration (FLO-2D, 2004)

	Sediment concentration		Flow characteristics
	by volume	by weight	
Landslide	0.65 - 0.80	0.83 - 0.91	Will not flow; failure by block sliding
	0.55 - 0.65	0.76 - 0.83	Block sliding failure with internal deformation during the slide; slow creep prior to failure
Mud flow	0.48 - 0.55	0.72 - 0.76	Flow evident; slow creep sustained mudflow; plastic deformation under its own weight; cohesive; will not spread on level surface
	0.45 - 0.48	0.69 - 0.72	Flow spreading on level surface; cohesive flow; some mixing
Mud flood	0.40 - 0.45	0.65 - 0.69	Flow mixes easily; shows fluid properties in deformation; spreads on horizontal surface but maintains an inclined fluid surface; large particle (boulder) setting; waves appear but dissipate rapidly
	0.35 - 0.40	0.59 - 0.65	Marked settling of gravels and cobbles; spreading nearly complete on horizontal surface; liquid surface with two fluid phases appears; waves travel on surface
	0.30 - 0.35	0.54 - 0.59	Separation of water on surface; waves travel easily; most sand and gravel has settled out and moves as bedload
	0.20 - 0.30	0.41 - 0.54	Distinct wave action; fluid surface; all particles resting on bed in quiescent fluid condition
Water flood	< 0.20	< 0.41	Water flood with conventional suspended load and bedload

Landslide는 흐름이라기보다는 토체의 이동으로 볼 수 있으며, Mud flow를 토석류로 정의하고 있다. Mud flood는 토석류와 홍수의 중간 상태로 농도에 따라 세부적으로 나누고 있으며, Water flood는 거의 토사를 포함하고 있지 않은 홍수 형태이다. 본 연구에서 토석류의 흐름 특성을 모의하기 위해 사용한 체적농도 값은 Table 1을 참고로 0.45를 적용하였다.

2.3 입력변수

본 논문에서는 2011년 집중호우로 인해 도심지 지역에 큰 피해를 입힌 ○○ 토석류의 데이터를 바탕으로 프로그램을 수행하였다. 복잡한 토석류의 메커니즘을 기초적으로 연구하기 위해 ○○에서 발생한 토석류 중 가장 큰 유역을 이룬 A 유역의 데이터를 적용하였다. A 유역의 실측된 단면(Paik and Kim, 2011)에 근거하여 길이 556m, 높이 198m의 사면을 Fig. 2와 같이 상부(사면경사 = 38°), 유역부(사면경사 = 15°), 퇴적부(사면경사 = 6° 및 0°)로 구성하였다. 상부와 유역부의 경사는 해당 사면의 평균경사를 적용하였고, 퇴적부는 일반적인 퇴적부의 사면경사(6~10°) 중에서 6°를 선택하였다. 또한, 토석류의 전체적인 퇴적 특성을 파악하기 위해 길이 556m 이후의 평지도 퇴적부로 간주하였다.

유량은 실제 ○○의 유역면적과 강우강도에 의해 산

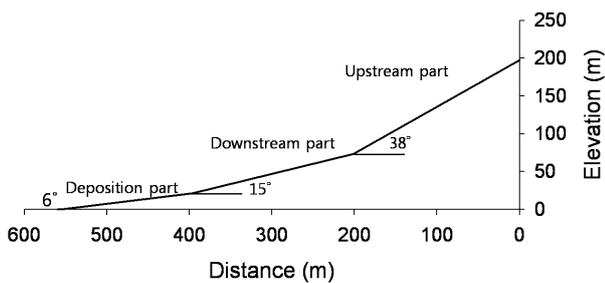


Fig. 2. Basin cross section

정되었다. 토석류 발생 시 당일 누적강우량은 250mm를 넘었으며, 강우강도는 105mm/hr에 달했다. 이를 통해 해석에 적용된 유량은 ○○의 유역에서 최대유량인 1.89 m³/sec이다(Oh, 2011).

프로그램 실행 시간은 각각 9시간과 18시간이다. 9시간은 토석류가 발생한 당일 총 누적강우량 250mm에 대한 강우 시간으로서, 실제 강우 시간동안 토석류의 이동범위를 분석하기 위해 설정하였다. 또한 토석류의 연속적인 이동 및 퇴적 특성을 보다 확실히 분석하고자 실제 강우 시간의 2배인 18시간도 모의 시간으로 설정하였다.

Table 2는 토석류의 이동 및 퇴적 특성 분석에 사용된 입력 물성치를 나타낸다. 점성과 항복응력의 변화에 따른 토석류의 이동 및 퇴적 특성을 분석하기 위해 점성은 η_0 , $10\eta_0$, $100\eta_0$ 로, 항복응력은 τ_{y0} , $10\tau_{y0}$, $100\tau_{y0}$ 로 변화시켜 해석을 수행하였다. 그러나 유입유량, 체적 농도, 실행 시간 등의 나머지 입력 조건은 모두 동일하다.

Fig. 3과 4는 수치해석에 사용된 점성과 항복응력을 체적농도의 함수로 나타낸 것이다. 해석에 사용된 점성과 항복응력인 η_0 와 τ_{y0} 값 중 점성은 카오리나이트와 화강풍화토를 각각 50%씩 혼합한 시료에 대하여 실내 cone and plate rheometer로 실험하여 얻었다(Kang and Kim, 2012). 그리고 항복응력은 O'Brien 등이 실험한 Aspen 지역의 Aspen Mine Fill 시료의 물성치이다. 또한 비교를 위해 콜로라도 주에 위치하는 Aspen 지역과 Glenwood 지역의 실트 및 점토로 이루어진 토석류 퇴적물의 점성과 항복응력값도 함께 표현하였다(O'Brien et al., 1988).

본 논문에서는 점성과 항복응력의 변화에 따른 이동 및 퇴적 특성을 파악하기 위해 해석에 사용된 기준 점성과 항복응력 값에 각각 10배, 100배로 차이를 주어 해석을 수행하였다. 점성과 항복응력이 합리적으로 선정되었는지를 판단하기 위해 O'Brien et al.(1988)의 유변물

Table 2. FLO-2D input variable conditions

Case	Viscosity			Yield stress			C _v	Discharge (m ³ /sec)	Simulation time (hr)	
	Pa.s	α_1	β_1	Pa	α_2	β_2				
η_0	24.614	0.00693	23.284	2.834	0.128	12	0.45	1.89	9	18
$10\eta_0$	246.140	0.06930								
$100\eta_0$	2461.400	0.69300								
τ_{y0}	24.614	0.00693	23.284	2.834	0.128	12	0.45	1.89	9	18
$10\tau_{y0}$				28.340	1.280					
$100\tau_{y0}$				283.400	12.800					

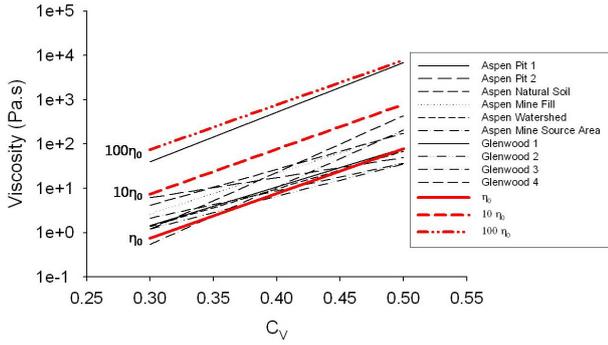


Fig. 3. Viscosity as a function of sediment concentration

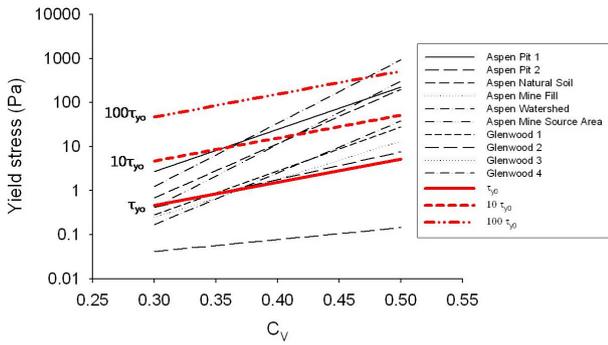


Fig. 4. Yield stress as a function of sediment concentration

성시험 값과 비교한 결과, Fig. 3, 4와 같이 일반적인 범위 내에 들을 알 수 있었다.

3. 해석 결과 및 분석

3.1 점성에 따른 토석류의 이동 및 퇴적 특성

Fig. 5와 6은 상부, 유역부 및 퇴적부에서 점성의 변화 (η_0 , $10\eta_0$, $100\eta_0$)에 따른 토석류의 정규화된 이동속도 (velocity)와 유동심(flow depth)을 나타낸 결과이다. 이동속도와 유동심은 점성이 η_0 이고 사면 경사가 6° 에서의 결과를 기준으로 각각 정규화하였다. 점성의 변화에 따른 이동속도와 유동심의 뚜렷한 경향을 알아보기 위해 수치해석 시간은 토석류의 이동 및 퇴적이 연속적으로 발생한 18시간 후로 하였다.

Fig. 5에서 알 수 있듯이 토석류의 이동속도는 사면 경사에 크게 의존한다. 또한 점성이 증가함에 따라 이동속도는 감소하는 경향을 볼 수 있다. 낮은 점성(η_0)에서는 사면 경사각에 따라 이동속도가 크게 차이이나, 점성이 증가함에 따라 사면 경사각에 따른 이동속도의 차이는 작아진다. Fig. 6은 점성의 변화에 따른 토석류의 정규화된 유동심(flow depth)을 나타낸다. 토석류의 흐름

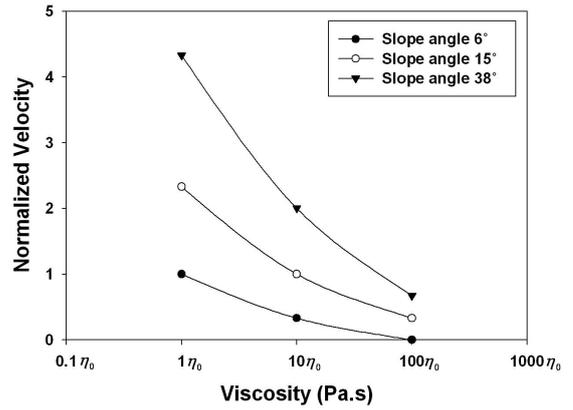


Fig. 5. Velocity of debris flow according to viscosity

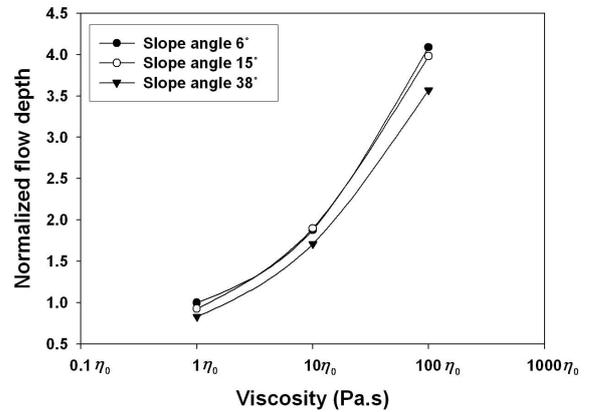


Fig. 6. Flow depth of debris flow according to viscosity

두께를 나타내는 유동심은 사면경사의 변화에 따른 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 또한 이동속도와는 반대로 점성이 커질수록 입자 간의 응집력이 증가하면서 유동심이 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통해 점성이 증가함에 따라 이동속도는 감소하며, 유동심은 증가하는 경향을 알 수 있다.

Fig. 7은 점성의 변화에 따른 토석류의 이동범위를 나타낸 결과이다. 토석류의 이동범위에 대한 결과는 토석류 발생 시 당일 총 누적강우량의 강우시간인 9시간을 기준으로 분석하였다. 점성이 커질수록 이동거리와 확산범위가 줄어드는 것으로 나타났다. 점성이 $100\eta_0$ 일 경우에는 퇴적부 중 경사가 6° 인 사면 내에서 활동을 멈춰 평지까지 도달하지 않은 것을 알 수 있다. 이것으로부터 점성이 증가할수록 토석류 입자 간의 응집력 증가로 인해 토석류의 흐름이 저항 받는다는 것을 알 수 있다. Table 3은 토석류가 퇴적되기 시작하는 퇴적부에서의 이동 특성을 정량적으로 나타낸 표이다. 토석류의 퇴적거리(runout distance), 평균 퇴적 폭, 최대 퇴적 폭

Table 3. Movement characteristics of debris flow according to viscosity

Viscosity (Pa.s)	Runout distance (m)	Average width (m)	Maximum width (m)	Depositional area (m ²)
η_0	520	520.8	660	270,800
$10\eta_0$	360	317.8	380	114,400
$100\eta_0$	160	170.0	220	272,00

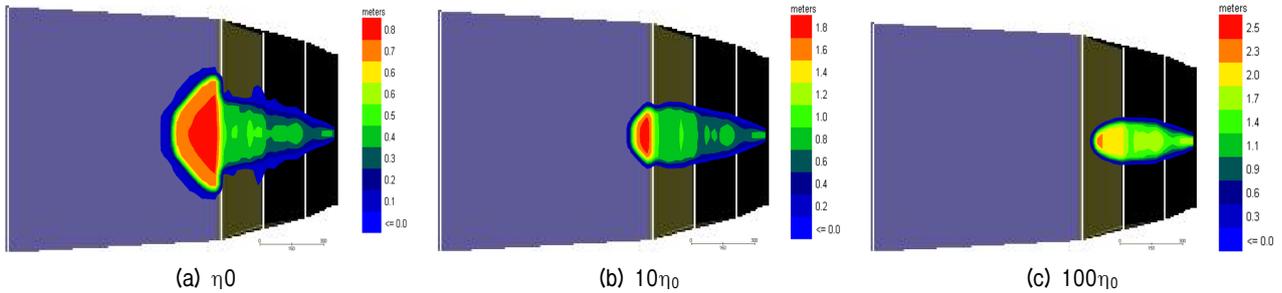


Fig. 7. Spreading range of debris flow according to viscosity

및 퇴적면적을 나타내었다. 점성이 증가함에 따라 퇴적 거리, 퇴적 폭, 퇴적면적은 작아진다. 이와 같이 점성과 토석류의 이동속도, 이동거리, 확산범위가 서로 반비례적인 결과를 보이는 것으로부터 점성은 토석류의 이동 특성과 퇴적 특성 자체에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

토석류의 이동에 따른 위험도를 분석하기 위해 퇴적 부에서 토석류의 충격력을 분석하였다. FLO-2D에서 토석류에 의한 충격력은 아래의 식 (9), (10), (11)을 바탕으로 산정할 수 있으나 정확한 충격력은 유체의 밀도, 충격의 각도 등과 같은 여러 요소에 의해 영향을 받는다 (FLO-2D, 2004).

$$P_i = k \rho_f V^2 \quad (9)$$

$$k = 1.261 e^{C_w} \quad (10)$$

$$F = P_i h \quad (11)$$

P_i 는 충격압으로 흐르는 유체의 밀도(ρ_f)와, 계수(k), 그리고 각 그리드의 최대 이동속도(V)를 통해 계산되며, 계수 k 는 토석류에서 물과 흙의 중량을 바탕으로 농도를 표현하는 중량농도(C_w)의 함수로 표현된다. 충격압(P_i)에 해당 그리드의 최대 유동심을 곱하면 단위면적에 대응하는 충격력(F)이 계산된다. 즉, 충격력은 최대 이동속도의 제곱과 유동심에 비례하여 계산되는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 점성의 변화에 따른 퇴적부에서의 충격력과 Table 3의 퇴적면적을 함께 나타낸 그래프

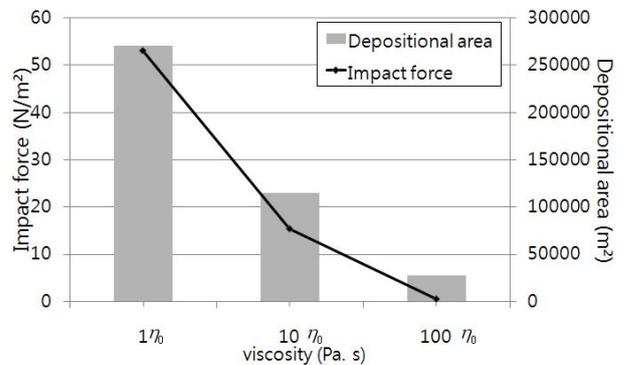


Fig. 8. Impact force and depositional area according to viscosity

로서 토석류의 피해에 큰 영향을 주는 충격력과 퇴적면적을 함께 나타내었다.

Fig. 8을 통해 산출된 결과를 살펴보면 점성이 증가할수록 충격력은 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 유동심은 증가하지만 이동속도가 크게 감소하기 때문이다. 즉, 충격력은 유동심에 비례하고, 이동속도의 제곱에 비례하기 때문이다. 점성이 증가할수록 충격력 뿐만 아니라 퇴적면적 또한 감소하는 것을 보아 점성이 클수록 토석류로 인한 피해는 작아질 것으로 판단된다.

3.2 항복응력에 따른 토석류의 이동 및 퇴적 특성

Fig. 9는 상부, 유역부 및 퇴적부에서 항복응력의 변화(τ_{y0} , $10\tau_{y0}$, $100\tau_{y0}$)에 따른 토석류의 정규화된 이동속도(velocity)를 나타낸 결과이다. 항복응력이 커질수록 이동속도가 미소하게 감소하나 뚜렷한 경향은 찾기 힘들다. 그러나 동일한 항복응력에서 사면경사가 증가함

에 따라 이동속도는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 즉, 항복응력보다 사면경사의 영향이 더 크게 나타난다.

Fig. 10은 항복응력의 변화에 따른 토석류의 정규화된 유동심(flow depth)을 나타내는 그래프이다. 항복응력이 증가함에 따라 유동심은 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, 퇴적부인 경사 6°인 사면 내에서 항복응력이 증가함에 따라 유동심이 크게 증가하였다. 그러나 유동심이 점성에 크게 의존하는 것에 비해(Fig. 6) 항복응력

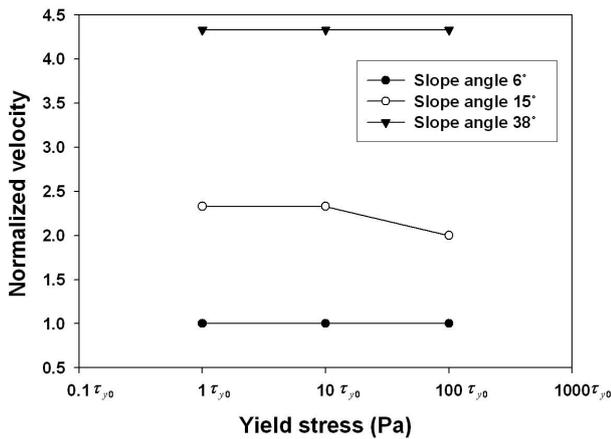


Fig. 9. Velocity of debris flow according to yield stress

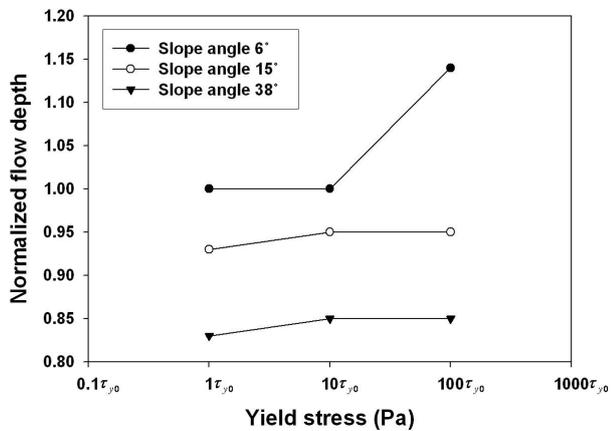


Fig. 10. Flow depth of debris flow according to yield stress

에는 상대적으로 작게 의존하는 것을 알 수 있다. 따라서 토석류의 이동 특성에 해당하는 이동속도는 항복응력과 뚜렷한 관계를 찾기가 힘들다.

Fig. 11은 항복응력의 변화에 따른 토석류의 이동범위를 나타낸 결과이다. Fig. 12는 Fig. 11에서 얻은 결과로부터 퇴적부에서의 퇴적단면을 정규화하여 나타낸 것이다. Fig. 11을 통해 항복응력이 커질수록 경사면에서의 흐름은 큰 변화가 없으나 퇴적부의 확산범위는 작아짐을 볼 수 있다. 또한 Fig. 12의 정규화된 단면을 통해 퇴적부에서의 퇴적면적은 작아지고, 유동심은 증가하는 것을 알 수 있다. 항복응력이 커질수록 초기 흐름이 발생하기 위해 더 많은 전단응력이 필요하고, 이로 인해 토석류 흐름의 정지에도 영향을 주어 흐름이 빨리 멈추게 된다. 즉, 항복응력에 따라 퇴적부에서의 퇴적 특성이 크게 차이가 난다. 이것으로부터 항복응력은 토석류의 발생과 정지에 영향을 미치는 인자로서 토석류의 이동 특성보다 퇴적 특성에 더 큰 영향을 주는 인자라는 것을 알 수 있다. Table 4는 Fig. 11에 나타난 이동범위를 통해 퇴적부에서의 이동 특성을 정량적으로 나타낸 표이다. 항복응력이 증가함에 따라 퇴적거리, 퇴적폭, 퇴적면적은 작아진다.

퇴적부에서 항복응력의 변화에 따른 충격력과 퇴적면적을 Fig. 13과 같이 나타내었다. 충격력이 점성에 반비례하는 것과 달리 항복응력이 증가함에 따라 충격력

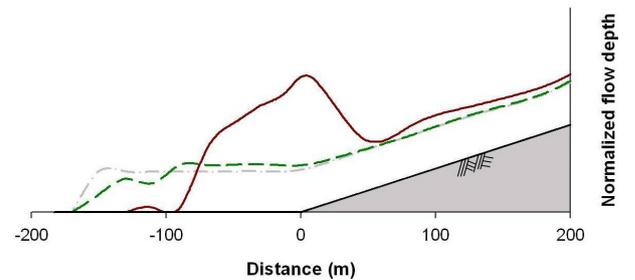


Fig. 12. Flow depth profiles at deposition part

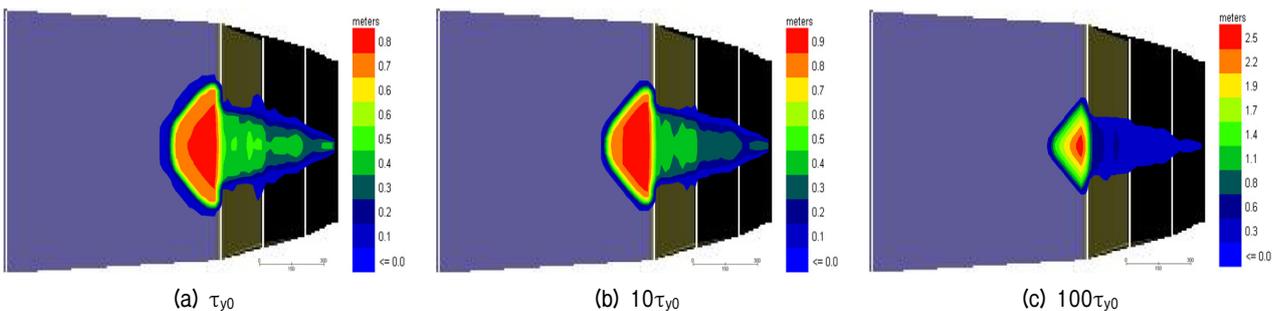


Fig. 11. Spreading range of debris flow according to yield stress

Table 4. Movement characteristics of debris flow according to yield stress

Yield stress (Pa)	Runout distance (m)	Average width (m)	Maximum width (m)	Depositional area (m ²)
τ_{y0}	520	520.8	660	270,800
$10\tau_{y0}$	300	496.0	640	248,000
$100\tau_{y0}$	220	260.0	420	109,200

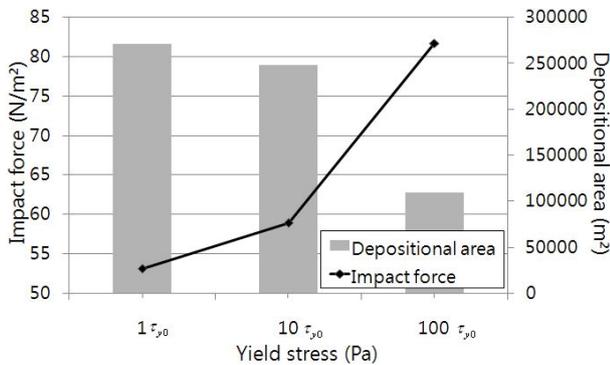


Fig. 13. Impact force and depositional area according to yield stress

은 증가한다. 이는 퇴적부의 이동속도의 변화에 비해 유동심의 변화가 더 커서 오히려 충격력이 증가하는 것으로 설명할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 토석류가 발생했던 ○○ 산사태의 데이터를 이용하여 토석류 해석 프로그램인 FLO-2D를 사용하여 토석류의 이동을 모의하고, 유동학적 인자인 점성과 항복응력에 따라 토석류의 이동 및 퇴적 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 점성이 증가함에 따라 이동속도는 비선형적으로 감소하고, 사면경사가 클수록 더 큰 변화를 보인다. 즉, 이동속도는 점성과 경사에 영향을 받는다. 유동심은 사면경사에는 큰 영향을 받지 않고 점성이 증가함에 따라 증가한다. 점성과 토석류의 이동속도, 이동거리, 확산범위가 서로 반비례적인 결과를 보이는 것으로 보아 점성은 토석류의 이동 특성과 퇴적 특성에 영향을 준다는 것을 알 수 있다.
- (2) 항복응력은 토석류의 발생과 정지에 영향을 미치는 요인으로 항복응력이 증가함에 따라 유동심은 증가하나 토석류의 이동 특성에 해당하는 이동속도는 항복응력과 뚜렷한 관계를 찾기가 힘들다. 항복응력이 증가함에 따라 퇴적거리, 퇴적 폭, 퇴적면적은

작아진다. 이것으로부터 항복응력은 전체적인 이동 특성보다는 퇴적 특성 자체에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

- (3) 점성이 증가함에 따라 충격력은 감소하나, 항복응력이 증가함에 따라 충격력은 증가하는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전사업의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2012M3A2A1050977)이며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. D. Rickenmann, D. Laigle, B.W. McArdell, and J. Hübl (2006), "Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events", Computational Geosciences, 10:241-264.
2. FLO-2D Software Inc., (2004), FLO-2D user's manual.
3. 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.
4. Iverson, R.M., Ried, M.E., and LaHusen, R.G. (1997), "Debris-Flow Mobilization From Landslides", Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Vol. 25:85-138.
5. Iverson, R.M. (2003), "The debris-flow rheology myth", In Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment (ed. Rickenmann & R. C. Chen), pp.303-314. Millpress, Rotterdam.
6. Jeong, Sueng-Won (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.
7. Jeong, Sueng-Won (2011), "Rheological Models for Describing Fine-laden Debris Flows: Grain-size Effect", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.27, No.6, pp.49-61.
8. Kang, Hyo-Sub and Kim, Yun-Tae (2012), "Effect of Fines on Rheological Characteristics of Soil", KGS Fall National Conference 2012 October 11-12, 2012/ Seoul/ Korea, 1171-1178
9. Kim, Sang-Kyu and Seo, Heung-Seok (1997a), "An Analysis of Debris Flow Movement Using Rheological Model", Journal of Korean Geotechnical Society (KGS), Vol.13, No.5, p133-143.
10. Kim, Sang-Kyu and Seo, Heung-Seok (1997b), "Rheological Characteristics of Debris Flows", Journal of Korean Geotechnical

Society (KGS), Vol.13, No.5, p125-131.

11. 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.
12. 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.
13. O'Brien, J.S. and Julien P.Y. (1988), "Laboratory analysis of mudflow properties", J. of Hyd. Eng, ASCE, 114(8), 877-887.
14. O'Brien, J.S, Julien, P.Y., and Fullerton, W.T. (1993), "Two-dimensional water flood and mudflow simulation", J. Hydr. Engrg., ASCE, 119(2), pp.244-261.
15. Oh, KyungDoo (2011), "Lesson of Umyeon Mountain", Seoul monthly technology magazine column, 2011, September.
16. Paik, JoongCheol and Kim, YoungIl (2011), "Runout characteristics of debris flow in Umyeon Mountain" River and Road in Mountain Area, Vol.4, 15-19.

(접수일자 2013. 1. 4, 심사완료일 2013. 5. 21)