유변물성에 따른 토석류 거동 특성 연구:

황령산, 우면산 지역을 중심으로

Debris Flow Behavioral Characteristic Based on Rheological Properties: A Case Study on Mt. Hwangnyeong and Mt. Umyeon

김형진* · 김윤태**

Kim, Hyeong-Jin*, and Kim, Yun-Tae**

Abstract

Debris flow, one of the major natural disasters in Korea, usually occurs because of heavy rainfall during the rainy season. Recently in Korea, rainfall, as well as the frequency of debris flow, has continually increased as a result of climate change. Therefore, it is necessary to study the characteristics of the debris flow behavior for hazard mitigation and damage assessment. In this study, vane-type rheometer tests were conducted to estimate the rheological properties (viscosity, yield stress) of two soil samples collected from Mt. Hwangnyeong and Mt. Umyeon. Several series of small-scale flume experiments were also performed to evaluate the characteristics of the debris flow behaviors (flow velocity, runout distance, and deposition volume) of these two sites. The results of the experiments show that front velocity, runout distance, and deposition volume of the debris flow gradually decrease with increase in viscosity and yield stress. Especially in the case of the Mt. Hwangnyeong sample, which has a high fine content, experimental results showed that the rate of increase in front velocity, runout distance, and deposition volume tended to high as viscosity and yield stress decreased compared to Mt. Umyeon.

Key words : Debris Flow, Vane-type Rheometer Test, Volumetric Sediment Concentration, Viscosity, Yield Stress

요 지

토석류는 우기 시 집중강우로 인해 유발되며, 기후변화로 인한 강우량 증가로 토석류의 발생 빈도가 증가하고 있다. 이에 따라 토석류로 인한 피해 저감과 피해 범위 평가를 위해 토석류 거동 특성에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 베인타입 레오미터 실험을 이용하여 황령산 및 우면산 지역에서 채취한 각 시료의 유변물성(점성, 항복응력)을 조사하였다. 또한 유변물성 및 토석류 거동은 제안된 식을 이용하여 함수비를 체적농도로 변환한 후 체적농도와와의 관계로 표현되었으며 소규모 토석류 수로 실험을 통해 2개 지역의 토석류 거동 특성(토석류 유출속도, 퇴적거리 및 퇴적부피)을 평가하였다. 실험 결과 점성 및 항복응력이 증가할수록 토석류의 유출속도, 퇴적 거리 및 부피가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 특히 세립분 함유량이 많은 황령산 시료의 경우 점성 및 항복응력이 감소함에 따라 토석류 거동의 증가량이 더 크게 나타나는 경향을 보였다.

핵심용어 : 토석류, 베인타입 레오미터 실험, 체적농도, 점성, 항복응력

1. 서 론

우리나라는 지형학적으로 약 70% 이상이 산지로 구성되어 있다. 이 때문에 매년 산사태로 인해 많은 재산 및 인명피해

가 발생하고 있다(Kim et al., 2002). 특히 2011년부터 2014년까지 발생한 산사태 유형 중 토석류가 많은 비율을 차지하였다. 토석류는 주로 짧은 시간에 강하게 내리는 극한 강우로 인해 가파른 경사를 가지는 산지 수로부에서 발생한다

*정회원, 부경대학교 해양공학과 석사과정(E-mail: khj_oho@naver.com)

Member, Graduate Student, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

**교신저자, 정회원, 부경대학교 해양공학과 교수(Tel: +82-51-629-6587, Fax: +82-51-629-6590, E-mail: yuntkim@pknu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University

(O'Brien and Julien, 1988). 실제 2011년 서울 우면산에서는 대규모 토석류가 발생하여 15명의 사망자가 발생하기도 하였다.

일반적으로 토석류 거동은 발생지역의 지형학적 특성 및 지반의 유변물성 등 다양한 영향 인자들에 의해 영향을 받는다. 토석류 거동을 예측하기 위한 연구는 산사태가 자주 발생하는 유럽 알프스 지역, 중국, 일본 등에서 현장 모니터링, 소형 수로 실험, 수치해석 등을 통해 활발히 진행되고 있으며, 우리나라에서도 2011년 우면산 산사태 이후 많은 연구가 이루어지고 있다(Berti et al., 1999; Rickenmann et al., 2003; Chen et al., 2005; Wendeler et al., 2008; Choi et al., 2017; Lee et al., 2019).

토석류 거동특성인 토석류의 속도, 퇴적거리, 퇴적면적, 퇴적깊이, 퇴적부피, 충격력 등은 흙의 종류(자갈, 모래, 세립분), 함수비, 초기부피 등에 의존한다(Kim et al., 2010; Lee et al., 2017; de Haas et al., 2015; Adams et al., 2019). Kim et al. (2017)은 슬럼프 콘 실험(Slump Cone Test)을 통해 함수비가 증가할수록 토석류 유속이 증가한다는 결과를 나타낸 바 있으며, Kim and Paik (2011)은 토석류의 퇴적깊이가 수로의 경사에 반비례하고, 체적농도에 비례한다는 실험 결과를 보였다. 그러나 기존 연구에서는 흙의 구성비(자갈, 모래, 세립분), 함수비, 초기부피의 변화에 따른 토석류의 거동특성을 분석하였을 뿐 지반의 유변물성(점성, 항복응력)에 따른 토석류의 거동특성 변화에 관한 연구는 전무한 실정이다. 흙의 유변물성은 함수비, 체적농도 등에 따라 변하게 되는데 흙의 종류, 모래 및 세립분의 함량과 같은 지반특성에 따라 변화의 정도가 다르다. Kang et al. (2017)은 토석류 재해가 발생한 지역의 시료를 채취하여 유변물성 분석을 수행한 바 있다. Kang et al. (2017)은 기존 토질분야에서 입자크기 제한으로 인해 제한된 연구를 할 수 밖에 없는 유변물성 연구의 한계점을 극복하기 위해 대형 베인 레오미터 실험 장비를 개발하여 토석류 발생지역(서울 우면산,

춘천 마적산, 용원 문수산)의 유변물성을 파악하는 연구를 진행하였다.

토석류 거동의 정확한 메커니즘을 규명하는데 지반의 유변물성 또한 토석류의 거동특성에 영향을 주는 요인으로 작용하기 때문에 토석류의 거동을 예측하기 위해서는 지반의 유변물성에 관한 연구 또한 필수적으로 수반되어야 한다. 특히 서울 우면산이나 부산 황령산 등과 같이 산지와 인접한 지역에 다수의 민가가 밀집되어 있는 경우 집중강우 등에 따른 토석류 발생 시 경제적인 피해 뿐만 아니라 대규모 인명 피해가 발생할 수도 있으므로 각 지역의 지반특성을 명확히 규명할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 황령산 및 우면산 지역의 시료를 채취하여 유변물성 특성에 따른 토석류 거동을 분석하고자 베인타입 레오미터 실험(Vane-type Rheometer Test) 및 소규모 토석류 수로 실험(Small-scale Debris Flow Flume Experiment)을 수행하였다. 본 연구실에서 개발된 베인타입 레오미터 실험 장비를 통해 대상 지역 시료의 체적 농도 변화에 따른 유변물성(점성, 항복 응력)을 산정하고, 소규모 토석류 수로 실험을 수행하여 유변물성에 따른 토석류 거동 특성(유출속도, 퇴적거리 및 퇴적부피)을 알아보고자 하였다.

2. 시료의 물리적 특성

Fig. 1은 부산의 황령산(Hwangnyeong Mt.)과 서울의 우면산(Umyeon Mt.)에서 시료를 채취한 위치를 나타낸다. 또한 Kang et al. (2017)의 우면산 시료 채취 위치도 함께 도시하였다. 시료 채취 위치는 Pradhan et al. (2018)과 Nguyen and Kim (2019)이 수행한 황령산 및 우면산 지역의 산사태 위험 지도를 참고하고, 산사태 취약 지역을 검토하여 선정하였다. Table 1은 Kang et al. (2017)의 시료를 포함한 각 시료에 대한 지반공학적 특성을 나타낸다. 황령산 시료의 경우 세립분 함유량이 약 72.6%인 반면 우면산 시료의 경우는 약

(a) Hwangnyeong Mt.

(b) Umyeon Mt.

Fig. 1. Location of Soil Samples

Table 1. Geotechnical Properties of Soil Samples

Type	Gravel (%)	Sand (%)	Silt and clay (%)	Liquid limit, LL (%)	Plastic index, PI (%)	Specific gravity, Gs
Hwangnyeong Mt.	7.2	20.2	72.6	48.8	11.6	2.63
Umyeon Mt.	10.0	65.5	24.5	33.3	8.4	2.68
Umyeon Mt.*	2.2	48.0	49.9	38.0	9.6	2.68
Munsu Mt.*	4.7	68.6	26.7	31.0	15.2	2.63
Majeok Mt.*	15.9	68.4	15.7	25.1	11.9	2.66

Source: Kang et al. (2017)

24.5%이다. Kang et al. (2017)이 수행한 우면산 시료의 세립 분은 약 49.9%로서 동일한 우면산이라 하더라도 시료채취의 고도에 따라 각 시료의 세립분 함량이 뚜렷한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이를 통해 동일한 산지에서도 채취 위치에 따라 세립분 함유량이 다를 수 있었다. 일반적으로 세립분 함유량이 클수록 액성한계가 증가하며, 이는 곧 유체 처럼 거동하기 위한 기본 함수비가 더 크다고 볼 수 있다. 즉, 동일한 산지에서도 토석류 발생 지반의 물리적 특성에 따라 토석류의 거동이 다를 수 있다는 것을 의미한다.

3. 실험 방법

3.1 베인타입 레오미터 실험

유변물성은 물질이 유동과 변형을 거칠 때 나타내는 독특한 성질로서 레오미터(Rheometer)를 이용하여 외력에 의한 유동성을 측정할 수 있다. 일반적으로 유변물성의 측정은 회전식 측정장비 혹은 모세관 점도계를 이용한다. 유동 물질의 유변물성 특성을 살펴보면 Fig. 2와 같이 대표적으로 5가지 형태로 나타나며, 토석류의 경우 Bingham 모델과 Herschel-Bulkley 모델이 주로 이용된다(Malet et al., 2003; Jeong, 2011). 본 연구에서는 Bingham 모델을 기반으로 유변물성을 산정하였다. Bingham 모델은 Eq. (1)과 같이 정의된다.

$$\tau = \tau_{c-B} + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서, τ 는 전단응력, τ_{c-B} 는 Bingham model의 항복응력, η 는 점성, $\dot{\gamma}$ 는 전단변형률속도를 나타낸다. 베인타입 레오미터 실험을 통해 산정된 전단응력과 전단변형률속도와 관계는 Fig. 2와 같이 표현할 수 있다. 이때 기울기는 점성, y절편은 항복응력으로 정의된다.

Herschel-Bulkley 모델은 항복응력 항이 추가된 power law 모델의 확장 형태로 Eq. (2)와 같이 정의된다.

$$\tau = \tau_{c-HB} + K \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

여기서, τ_{c-HB} 는 Herschel의 항복응력, K 는 유동변수, n 은

무차원 유동지수를 나타낸다.

Fig. 2. Relationship between Shear Stress and Shear Rate (Barnes et al., 1989)

기존의 유변물성 실험 장치의 경우 소형의 실험 장비 규모로 인해 실험할 수 있는 시료 크기에 제한이 있다. Kang et al. (2017)은 이러한 한계점을 극복하기 위해 대형 베인타입 레오미터 실험 장비(Vane-type Rheometer test Equipment)를 개발하였으며 본 연구에서는 이를 이용하여 실험을 수행하였다(Fig. 3). 실험 장비는 시료를 담은 원통형 컨테이너(Container), 십자 형태의 베인(Vane), 토크 센서(Torque Sensor) 및 모터(Motor)로 구성된 측정부와 회전속도 조절 장치(RPM Control Panel) 및 컴퓨터(Computer)로 구성된 제어부로 나뉜다. 베인의 직경(D_v)과 높이(H_v)는 각각 80 mm이며, 컨테이너의 직경(D_c)은 225 mm로 제작되었으며 이는 Nguyen and Boger (1983, 1985), Liddel and Boger (1996)에 의해 제안된 실험 장비 제작 시 베인과 컨테이너 사양 조건에 맞추어 제작되었고 베인 상단과 시료 상단까지의 수직거리(Z_1)와 베인 하단과 시료의 바닥까지의 수직거리(Z_2) 또한 제안된 사양조건에 맞게 베인 직경의 1.0배로 하였다. 또한 컨테이너 내부 벽면에 수직 막대를 설치하여 실험 진행시 시료의 전단을 유발하고 컨테이너 내부 벽면과 재료 사이의 미끄러짐을 최소화하고자 하였다. 본 실험을 통해 컨테이너에 담긴 시료의 베인 회전 속도에 따른 토크 값을 측정한다.

Fig. 3. Vane-type Rheometer Test Equipment (Kang et al., 2017)

후, 측정된 베인의 회전속도와 토크 값을 이용하여 전단응력과 전단변형률속도를 산정하였고, 산정된 전단응력과 전단변형률속도를 Bingham 모델에 적용하여 최종적으로 점성과 항복응력 값을 산정하였다.

3.2 소형 토석류 수로 실험

본 연구에 사용된 소규모 토석류 수로 실험 장비(Small-scale Flume Experiment Equipment)는 Fig. 4와 같이 수로 길이 2.0 m, 폭 0.15 m로 제작되었다. 또한 수로의 경사를 조절할 수 있게 제작되었으며, 설치된 경사계를 통해 경사조건을 확인할 수 있다. 수로 측면에는 줄자를 부착하여 토석류 높이를 측정할 수 있다. 실험조건에 따른 토석류의 퇴적특성을 알아보기 위해 제작된 퇴적부(Deposition Area)는 길이 1.5 m, 폭 1.0 m이다. 퇴적부에는 1 cm 간격으로 눈금을 표시하여 퇴적된 토석류의 퇴적거리 및 퇴적부피 등을 측정할 수 있다. 수로 상부에는 토석류 현상 재현을 위해 시료를 보관하는 보관 상자(Soil Box)가 연결되어 있으며, 수동 개폐 입구(Gate)를 통해 토석류 유출을 모의할 수 있다. 또한 토석류의 유출속도를 측정하기 위해 수로 측면과 정면에 카메라

를 설치하였으며, 각 시료별로 다양한 함수비 조건에서의 모의실험을 통해 토석류 거동(유출속도, 퇴적거리, 퇴적부피)을 관찰하였다. 함수비 이외에 초기부피와 수로경사는 각각 약 8,600 cm³와 30°로 모든 실험에서 동일하게 설정하였다.

4. 실험 결과

4.1 베인타입 레오미터 실험 결과

O'Brien and Julien (1988)은 Eqs. (3)과 (4)와 같이 항복응력과 점성을 체적농도 관계식으로 표현하였다. 여기서 체적농도는 Eq. (5)과 같이 전체 부피에 대한 퇴적물의 부피비로 표현된다.

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (3)$$

$$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (4)$$

$$C_v = \text{volume of the sediment} / \text{total volume of water and sediment} \quad (5)$$

Fig. 4. Small-scale Flume Experiment Equipment

τ_y 는 항복응력, η 는 점성, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 는 유변물성 계수이다.

중량농도(C_w)는 Eq. (6)과 같이 전체 무게에 대한 퇴적물의 무게비로 정의되며, Eq. (7)과 같이 체적농도와 비중(G_s)이 연계된 식으로 표현할 수 있다. 또한 Eq. (8)과 같이 함수비(w)와 연계된 식으로도 나타낼 수 있다(FLO-2D Software, Inc., 2009). Eqs. (7)과 (8)를 이용하여 Eq. (9)를 구할 수 있다. 즉 함수비와 체적농도간의 관계식을 통해 임의의 함수비에서 체적농도를 산정할 수 있다.

$$C_w = \text{weight of the sediment} / \text{total weight of water and sediment} \quad (6)$$

$$C_w = \frac{C_v G_s}{1 + (G_s - 1) C_v} \quad (7)$$

$$C_w = 1 - \left(\frac{w}{w + 100} \right) \quad (8)$$

$$C_v = \frac{1 - \frac{w}{w + 100}}{G_s - \left(1 - \frac{w}{w + 100} \right) (G_s - 1)} \quad (9)$$

Fig. 5는 베인타입 레오미터 실험을 통해 측정된 부산 황령산(Hwangnyeong Mt.) 및 서울 우면산(Umyeon Mt.)

시료의 유변물성 실험 결과를 나타낸다. 총 5단계의 함수비 변화에 따른 각 시료의 전단응력과 전단변형률속도 관계를 분석하였다. 실험 시 시료의 함수비는 시료를 완전 건조시킨 후 물을 첨가하여 실험 조건의 함수비를 갖추었고 실험 후 실험 시 사용된 시료를 재건조하여 함수비시험을 통해 함수비를 재 측정하였다. 이때 함수비 변화의 범위는 황령산의 경우 53%에서 65%, 우면산의 경우 34%에서 40%이다. 실험 결과, 함수비가 증가할수록 황령산 시료와 우면산 시료의 전단변형률 속도에 따른 전단응력은 감소하는 경향을 보였다. 또한, 세립분 함유량이 많은 황령산 시료의 경우 우면산 시료에 비해 더 높은 함수비에서도 더 높은 전단응력 값을 가지는 것으로 나타났다. 이를 통해 세립분 함유량에 따라 각 시료의 유변물성이 서로 차이가 난다는 것을 알 수 있다. 베인타입 레오미터 실험의 결과를 통해 전단응력과 전단변형률속도의 관계를 분석하고 Bingham 모델에 적용하여 점성 및 항복응력의 값을 산정하였다.

Fig. 6은 각 시료의 체적농도 변화에 따른 항복응력과 점성의 관계를 나타낸다. 황령산의 체적농도 범위는 약 0.37~0.42이며, 우면산의 체적농도 범위는 약 0.49~0.53으로 나타났다. Kang et al. (2017)은 실험을 통해 춘천 마적산, 용인 문수산 및 서울 우면산 풍화토 시료의 체적농도 범위를 조사한 결과 각각 0.56~0.63, 0.53~0.59, 0.44~0.48의 범위를 가진다는 실험 결과를 밝힌 바 있다. Fig 6에 본 연구결과와 함께 도시하였다. 체적농도가 증가할수록 점성과 항복응력은 증가하는 경향을 각각 나타내었으며 체적농도에 따른 유변물성 변화의 기울기는 본 연구와 Kang et al. (2017)의 연구

Fig. 5. Relationship between Shear Stress and Shear Rate with Varying Water Content

Fig. 6. Relationship between C_v and Rheological Properties Depending upon Fine Content

결과가 유사한 경향을 가지는 것으로 나타났다. Table 1에 도시한 바와 같이 본 실험에 사용된 황령산과 우면산 시료의 세립분 함유량은 각각 72.6%, 24.5%이며, Kang et al. (2017)의 연구에 사용된 시료의 세립분 함유량은 우면산의 경우 49.9%, 문수산의 경우 26.7%, 마적산의 경우 15.7%이다. 전체적인 분석 결과, 세립분 함유량이 적은 시료일수록 같은 체적농도에서 더 작은 점성과 항복응력을 가지는 경향이 나타났다. 즉, 토석류 발생 지역의 지반 조건에 따라 같은 강우가 발생하더라도 세립분 함유량이 낮은 지역의 토석류 발생 위험이 크다고 볼 수 있다. 그러나 본 연구와 Kang et al. (2017)의 우면산 지역 유변물성은 차이를 보였다. 2011년 우면산 토석류 발생 후 도심지에는 많은 흙이 퇴적되었다. Fig. 1에 도시한 바와 같이 Kang et al. (2017)의 경우 2011년 우면산에서 토석류로 인해 피해가 발생했던 도심지와 가까운 하류부에서 시료를 샘플링하였고 본 연구에서는 토석류 발생

시 토석류 거동을 분석하기 위해 산사태 민감도 지도를 통하여 토석류 발생 위험지점과 가까운 상류부에서 시료를 채취했다. 이에 따라 두 시료의 세립분 함유량은 차이를 보이는 것으로 나타났다. Kang et al. (2017)의 우면산 시료의 경우 49.9%, 본 연구의 우면산 시료는 24.5%의 세립분 함유량을 가진다. 두 시료의 세립분 함유량에 따라 점성 및 항복응력의 차이가 나타나는 것으로 보인다. 이를 통해 같은 산지 내에서도 자갈, 모래 및 세립분의 구성 비율에 따라 유변물성은 다르게 나타날 수 있다는 것을 알 수 있다.

4.2 소형 토석류 수로 실험 결과

Fig. 7은 황령산 및 우면산 시료의 체적농도에 따른 토석류의 유출속도(Front Velocity), 퇴적거리(Runout Distance) 및 퇴적부피(Deposition Volume)의 실험결과를 나타낸다. 소형 토석류 수로 실험 시 시료의 함수비 조건은 황령산의 경우

Fig. 7. Results of Debris Flow Characteristics According to Cv

60%, 65%, 70%이며 우면산은 40%, 41%, 43%, 48%이다. 소형 토석류 수로 실험 또한 실험 시 시료의 함수비는 베인타입 레오미터 실험과 같이 시료를 완전 건조 시킨 후 물을 첨가하여 실험 조건의 함수비를 갖추었고 실험 후 실험 시 사용된 시료를 재건조하여 함수비시험을 통해 함수비를 재 측정하였다. 함수비가 증가할수록 즉, 체적농도가 감소할수록 토석류의 유출속도, 퇴적거리 및 퇴적부피가 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 토석류의 유출속도, 퇴적거리 및 퇴적부피의 증가율은 우면산에 비해 황령산에서 더 크게 나타나는 경향을 보였다. 황령산의 경우 체적농도가 0.35에서 0.39로 증가할 때 토석류 유출속도는 224 cm/s에서 24 cm/s로 약 200 cm/s 감소하는 결과를 보였고 우면산의 경우 체적농도가 0.44에서 0.49로 변할 때 토석류 유출속도는 149 cm/s에서 24 cm/s로 약 125 cm/s 감소하였다. 이에 따라 세립분 함유량이 적은 지역이 세립분 함유량이 많은 지역보다 적은 강우(낮은 함수비)에서 토석류로 발전되지만 토석류로 발전된 이후에는 세립분 함유량이 많은 지역에서 함수비 변화에 따른 속도 증감률이 더욱 크게 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig 8은 토석류 실험 후 퇴적부에 퇴적된 황령산 및 우면산

시료의 퇴적 분포 특성을 나타낸다. 퇴적거리는 황령산 시료의 경우 체적농도가 0.35에서 0.39로 증가함에 따라 93 cm에서 29 cm로 약 64 cm 감소하였고, 우면산 시료의 경우 체적농도가 0.44에서 0.49로 변화할 때 퇴적거리가 50 cm에서 36 cm로 약 14 cm 감소하는 것으로 나타났다. 두 시료의 퇴적형상을 보면 황령산 시료는 폭이 좁고 퇴적거리는 길게 퇴적되는 형상을 보였으나, 우면산의 경우 퇴적거리는 짧고 상대적으로 폭은 넓게 퇴적되는 형상을 보였다. 이는 앞서 언급한 토석류 유출 속도와와의 관계를 통해 설명할 수 있다. 함수비에 따른 토석류 유출속도 증가율이 세립분 함유량이 많은 황령산이 더 크기 때문에 퇴적거리 증가율 또한 세립분 함유량이 적은 우면산에 비해 큰 것으로 나타났다. 퇴적부피 결과 또한 유출속도와 퇴적거리의 관계와 경향이 비슷하게 나타났다. 체적농도가 증가함에 따라 황령산의 시료의 경우 약 5,050 cm³에서 2,200 cm³로 약 2,850 cm³ 감소하였고, 우면산 시료의 경우 약 4,800 cm³에서 3,100 cm³로 약 1,700 cm³ 감소하는 것으로 나타났다. 토석류 유출속도와 퇴적거리 및 퇴적부피와의 관계를 Fig. 9에 나타내었다. 이를 통해 토석류의 거동에서 토석류의 유출속도와 퇴적거리, 퇴적부피는 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8. Results of Deposition Characteristics According to Water Content

Fig. 9. Relationship between Front Velocity and Deposition

4.3 유변물성에 따른 토석류 거동 특성

Fig. 10은 황령산 및 우면산 시료의 체적농도-유변물성(점성, 항복응력)-토석류 거동 특성(유출 속도, 퇴적거리, 퇴적부피)의 관계를 나타낸다. 그래프에서 각 시료의 유변물성은 소형 토석류 수로 실험조건으로 사용된 체적농도에서의 점성 및 항복응력을 나타낸다. 예를 들어, 우면산 시료의 경우 체적농도 0.47(함수비 43%)에서 점성은 1.69 Pa · s,

항복응력은 33.54 Pa이다. 이에 대응하는 토석류의 유출속도는 약 69 cm/s이고, 퇴적거리는 약 42 cm, 퇴적부피는 약 4,140 cm³이다. 같은 방법으로 각 조건에서의 관계를 분석해보면 두 지역 모두 체적농도가 감소할수록 점성 및 항복응력이 감소하고 그에 따라 토석류의 유출속도, 퇴적거리 및 퇴적부피가 증가하는 경향을 보였다. 특히 세립분 함유량이 적은 우면산 지역이 황령산에 비해 높은 체적농도에서 오히려

(a) Volumetric sediment concentration - viscosity - debris flow behavior

(b) Volumetric sediment concentration - yield stress - debris flow behavior

Fig. 10. Relationship between Rheological Properties and Debris Flow Behavior According to Cv

려 점성 및 항복응력이 작게 나타났으며 이는 세립분 함량이 적은 우면산 지역에서 토석류의 거동이 발현될 수 있는 위험도가 더욱 크다고 할 수 있다. 하지만 점성 및 항복응력의 변화에 따른 유출속도, 퇴적거리 및 퇴적부피의 변화는 우면산 시료보다 황령산 시료에서 더 크게 나타났다. 즉, 세립분 함량이 많은 지반특성을 가지는 지역이 세립분 함량이 적은 지역에 비해 같은 체적농도에서 더 높은 점성 및 항복응력이 나타나지만 유변물성 변화에 따른 토석류 거동특성 변화는 더 민감한 결과를 보였다. 이를 통해 세립분 함량이 적은 지역이 세립분 함량이 많은 지역에 비해 높은 체적농도(낮은 함수비)에서 점성과 항복응력이 더 작으므로 같은 강우가 왔을 때 토석류가 발생할 위험이 더 크다고 할 수

있다. 하지만 세립분 함유량이 많은 지역이 점성 및 항복응력의 변화에 따라 토석류의 거동에 더욱 큰 영향을 받으므로 세립분 함유량이 많은 지역이 세립분 함유량이 적은 지역에 비해 토석류로 발전할 가능성은 낮지만 세립분 함유량이 많은 지역에서 토석류가 발생하게 되면 강우가 지속될수록 토석류로 인한 피해 증가율이 클 것으로 예상된다. 하지만 실내실험은 이상적인 수로형태 및 시료조건에서 실험이 수행되므로 실내실험 결과를 단순히 실제 토석류 현상에 접목하기에는 문제가 있다. 그러므로 실내 실험 결과의 검증 및 토석류 거동을 보다 정확하게 예측하기 위한 수치해석적 연구가 수반되어야 할 것으로 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 베인타입 레오미터 실험 및 소규모 토석류 수로 실험을 통해 황령산 및 우면산 지역의 유변물성에 따른 토석류 거동 특성을 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 황령산 및 우면산 지역의 시료를 채취하여 함수비 변화에 따른 베인타입 레오미터 실험을 수행한 결과 전단응력과 전단변형률 속도는 선형적인 관계를 나타내었다. 실험결과를 통해 각 함수비에 따른 점성과 항복응력 산정한 후 체적농도와와의 관계를 분석하였고 체적농도가 증가할수록 점성과 항복응력이 증가하는 경향을 보였다. 체적농도는 함수비와 반비례하는 관계를 가지므로, 강우 등으로 인해 함수비가 증가하게 될 경우 흙의 점성 및 항복응력은 감소한다는 것을 알 수 있다.
- (2) 동일한 체적농도에서 황령산과 우면산 시료의 점성 및 항복응력은 서로 다른 범위를 가지는 것으로 나타났다. 세립분 함유량이 적은 지역일수록 같은 체적농도에서 점성과 항복응력이 낮게 나타나는 경향이 있으며, 이를 통해 각 시료의 유변물성은 세립분 함유량에 크게 의존한다는 것을 알 수 있다.
- (3) 소형 수로 실험 결과, 체적농도가 증가할수록 유출속도, 퇴적거리 및 퇴적부피 등 토석류의 거동이 감소하는 경향을 보였으며, 체적농도 증가에 따른 토석류 거동의 감소율은 황령산이 더 높게 나타났다. 퇴적 분포 양상은 황령산의 경우 퇴적거리가 길고 좁게 퍼지는 반면, 우면산의 경우 퇴적거리가 짧고 넓게 퍼지는 경향을 보였다. 이는 황령산이 우면산에 비해 체적농도에 따른 유출속도의 증감율이 크기 때문에 퇴적분포에도 영향을 끼치는 것으로 보이며, 이를 통해 토석류의 거동에서 토석류의 유출속도와 퇴적거리, 퇴적부피는 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있다.
- (4) 유변물성과 토석류 거동 특성과의 관계를 분석한 결과 세립분 함유량이 적은 우면산 지역이 황령산 지역에 비해 높은 체적농도에서 낮은 유변물성을 보였으며, 유변물성 변화에 따른 토석류 거동의 변화는 세립분 함유량이 많은 황령산 지역에서 더 크게 나타났다. 이를 통해 세립분 함유량이 적은 지역이 세립분 함유량이 많은 지역에 비해 같은 강우에서 토석류가 발생할 수 있는 가능성이 더 크다고 할 수 있지만, 토석류가 발생하게 되면 강우가 지속될수록 세립분 함유량이 많은 지역에서 토석류로 인한 피해 증가율이 클 것으로 예상된다.

본 연구는 황령산 및 우면산 지역에서 부분적으로 시료를

채취하여 실내시험을 통해 세립분 함유량에 따른 유변물성과 토석류 거동의 관계를 비교하여 분석한 것으로 유변물성과 토석류 거동 관계를 통해 토석류 거동을 예측하기 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 하지만 실내실험 특성 상 이상적인 수로형태 및 시료 조건에서 실험이 수행되므로 실내실험 결과를 단순히 실제 토석류 현상에 접목하기에는 문제가 있다. 그러므로 실내 실험 결과의 검증 및 토석류 거동을 보다 정확하게 예측하기 위한 수치해석적 연구가 수반되어야 할 것으로 보인다. 또한 본 연구에서는 유변물성 및 토석류 거동에 영향을 주는 영향인자를 세립분 함유량과 함수비로 설정하였으나 이외에도 수로 경사, 토석류의 초기부피 등 토석류의 거동에 영향을 줄 수 있는 다양한 조건들이 존재하므로 조건을 다양하게 설정하고 추가적인 실험을 수행한다면 더욱 세밀하게 토석류 거동을 분석할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단을 통해 과학기술정보통신부의 기초연구실지원사업으로부터 지원받아 수행되었습니다 (2018R1A4A1025765).

References

- Adams, K., Wasklewicz, T., de Hass, T., Lecce, S., Gares, P. (2019). Reproducibility of debris-flow fan physical modeling experiments. *7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, pp. 1-8. doi:10.25676/11124/173214
- Barnes, H.A., Hutton, J.H., and Walters, K. (1989). *An introduction to rheology*. Elsevier science Ltd, pp. 11-36.
- Berti, M., Genevois, R., Simoni, A., and Tecca, P.R. (1999). Field observations of a debris flow event in the Dolomites. *Geomorphology*, Vol. 29, No. 3-4, pp. 265-274.
- Chen, J., He, Y.P., and Wei, F.Q. (2005). Debris flow erosion and deposition in Jiangjia Gully, Yunnan, China. *Environmental Geology*, Vol. 48, No. 6, pp. 771-777.
- Choi, S.K., Lee, J.M., and Kwon, T.H. (2017). Effect of slit-type barrier on characteristics of water-dominant debris flows: Small-scale physical modeling. *Landslides*, Vol. 15, No. 1, pp. 111-122.
- de Haas, T., Braat, L., Leuven, J.R., Lokhorst, I.R., and Kleinhans, M.G. (2015). Effects of debris flow composition on runout, depositional mechanisms, and deposit morphology in laboratory experiments.

- Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, Vol. 120, No. 9, pp. 1949-1972.
- FLO-2D Software, Inc. (2009). *FLO-2D reference manual*.
- Jeong, S.W. (2011). Rheological models for describing fine-laden debris flows: Grain-size effect. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 6, pp. 49-61.
- Kang, H.S., Jeong, J.H., and Kim, Y.T. (2017) Rheological properties of weathered soil of debris flow disaster area with volumetric concentration of sediment. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp.195-206.
- Kim, H.T., Kim, G.H., Lee, H.J., and Park, D.K. (2002). The risk analysis of debris flow occurrence using GIS. *Proceedings of 2002 Conference*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 2183-2186.
- Kim, J.H., Lee, Y.S., and Park, K.B. (2010). A study on model experiment for evaluation of debris flow's impact force characteristics. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 26, No. 11, pp. 5-15.
- Kim, J.W., Kwon, S.H., and Shin, H.S. (2017). A numerical study on debris flow using rheological-mechanical laboratory test considering geotechnical characteristics. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 6, pp. 193-200.
- Kim, Y., and Paik, J. (2011). Experimental investigation of effects of sediment concentration and bed slope on debris flow deposition in culvert. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 31, No. 5B, pp. 467-474.
- Lee, J.S., Kang, H.S., Suk, J.W., and Kim, Y.T. (2019). Development of hazard level-based rainfall threshold for prediction of rainfall-induced landslide occurrence in Korea. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 5, pp. 225-236.
- Lee, K.S., Cho, S.H., Kim, J.H., and Yoo, B.S. (2017). Estimation of debris flow impact forces on mitigation structures using small-scale modelling. *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 27, No. 3, pp. 191-205.
- Liddel, P.V., and Boger, D.V. (1996). Yield stress measurements with the vane. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 63, No. 2-3, pp. 235-261.
- Malet, J.P., Remaitre, A., Maquaire, O., Ancey, C., and Locat, J. (2003). Flow susceptibility of heterogeneous marly formations. Implications for torrent hazard control in the Barcelonnette basin (Alpes-de-Haute-Provence, France). *Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Davos, Switzerland, pp. 351-362.
- Nguyen, D.Q., and Boger, D.V. (1983). Yield stress measurement for concentrated suspensions. *Journal of Rheology*, Vol. 27, No.4, 321. doi:10.1122/1.549709
- Nguyen, D.Q., and Boger, D.V. (1985). Direct yield stress measurement with the vane method. *Journal of Rheology*, Vol. 29, No. 3, 335. doi:10.1122/1.549794
- Nguyen, V.B.Q., and Kim, Y.T. (2019). Rainfall-earthquake-induced landslide hazard prediction by monte carlo simulation: A case study of MT. Umyeon in Korea. *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 73-86.
- O'Brien, J.S., and Julien, P.Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 877-887.
- Pradhan, A.M.S., Lee, S.R., and Kim, Y.T. (2018). A shallow slide prediction model combining rainfall threshold warnings and shallow slide susceptibility in Busan, Korea. *Landslides*, Vol. 16, pp. 647-659.
- Rickenmann, D., Weber, D., and Stepanov, B. (2003). Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. *Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Davos, Switzerland, pp. 883-894.
- Wendeler, C., Mcardell, B.W., Volkwein, A., Denk, M., and Gröner, E. (2008). Debris flow mitigation with flexible ring net barriers: Field tests and case studies. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, Vol. 60, No. 9, pp. 23-31.

Received	April 16, 2020
Revised	April 20, 2020
Accepted	May 14, 2020