광산폐석의 유변학적 특성과 토석류 흐름특성 분석

정승원*

Jeong, Sueng Won*

Rheological Characteristics and Debris Flow Simulation of Waste Materials

ABSTRACT

Abandoned mines often cause environmental problems, such as alteration of landscape, metal contamination, and landslides due to a heavy rainfall. Geotechnical and rheological tests were performed on waste materials corrected from Imgi waste rock dump, located in Busan Metropolitan City. Debris flow mobility was examined with the help of 1-D BING model which was often simulated in both subaerial and subaqueous environments. To determine flow curve, we used a vane-penetrated rheometer. The shear stress (τ) - shear rate ($\dot{\gamma}$) and viscosity (η) - shear rate ($\dot{\gamma}$) relationships were plotted using a shear stress control mode. Well-known rheological models, such as Bingham, bilinear, Herschel-Bulkley, Power-law, and Papanastasiou concepts, were compared to the rheological data. From the test results, we found that the tested waste materials exhibited a typical shear thinning behavior in τ - $\dot{\gamma}$ and η - $\dot{\gamma}$ plots, but the Bingham behavior is often observed when the water contents increased. The test results show that experimental data are in good agreement with rheological models in the post-failure stage during shearing. Based on the rheological properties (i.e., Bingham yield stress and viscosity as a function of the volumetric concentration of sediment) of waste materials, initial flowing shape (5 m, 10 m, and 15 m) and yield stress (100 Pa, 200 Pa, 300 Pa, and 500 Pa) were input to simulate the debris flow motion. As a result, the runout distance and front velocity of debris flow are in inverse propositional to yield stress. In particular, when the yield stress is less than 500 Pa, most of failed masses can flow into the stream, resulting in a water contamination.

Key words : Debris flow, Mobility, Rheology, Yield stress, Plastic viscosity

초 록

휴·폐광산지역은 복합지질재해지역으로 집중호우에 의해 토사재해와 산성광산배수를 발생시킨다. 본 연구는 폐석적치장 전반에 걸쳐 토사재해가 관측된 임기광산에 대해 지반공학·유변학적 시험을 수행하고 얻어진 시험결과를 토대로 1-D 토석류 수치해석을 수행함으로써 토석류의 확산성을 조사하였다. 모래와 자갈로 구성된 광산폐석 시료의 유변학적 특성을 조사하기 위해 베인관입형 레오미터(Vane-penetrated rheometer)를 사용하였으며, 전단응력 제어를 통한 전단응력(τ)-전단속도($\dot{\gamma}$)와 점도(η)-전단속도($\dot{\gamma}$) 간의 상관관계를 얻었다. 또한 광산폐석 시료에 대해 잘 알려진 유변학적 모델들(Bingham, Herschel-Bulkley, Power-law, bilinear 및 Papanastasiou 모델)을 적용함으로써 수치해석에 필요한 유변학적 매개변수(항복응력과 소성점도)를 결정하였다. 실험결과에 따르면, 체적농도에 무관하게 전형적인 전단담화(shear thinning) 거동이 관측되었으며, 함수비가 증가할수록 Bingham 유체처럼 거동하는 것으로 나타났다. 또한 사용된 모든 유변학적 모델들은 파괴 후 거동에 적합한 모델들로 밝혀졌다. 토석류 흐름특성을 조사하기 위해 실험결과를 토대로 토석류 크기(5 m, 10 m 및 15 m)와 항복응력(100 Pa, 200 Pa, 300 Pa 및 500 Pa)을 선정하여 1-D BING을 통해 수치해석을 수행하였다. 그 결과, 토석류 이동거리와 이동속도는 항복응력의 크기에 반비례한 것으로 나타났으며, 토석류 항복응력이 500 Pa 이하인 경우 대부분의 토사는 계곡부까지 흘러갈 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 집중호우 기간에 산악지역에 방치된 광산폐석은 토사재해에 취약하고 2차적으로 인근 수계로 유입되어 환경적 문제를 야기시킬 수 있는 것으로 나타났다.

검색어 : 토석류, 유변학, 휴·폐광산, 항복응력, 소성점도

* 정회원·교신저자·한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources · suengwon@hotmail.com)

Received February 12, 2014/ revised March 26, 2014/ accepted June 13, 2014

1. 서론

산사태의 한 종류인 토석류는 발생지로부터 상당한 거리를 빠른 속도로 흘러내린다. 토석류는 발생부의 지반붕괴 또는 계곡부에 쌓인 과거 침식부에서 시작된다. 토석류의 이동거리, 이동속도 및 퇴적두께를 예측하는 것은 산악지역뿐만 아니라 도시계획 및 설계에 있어 매우 중요한 방재요소이다. 지난 20년간 토석류를 사전예측하고 피해를 최소화하기 위한 많은 연구가 있었다(Hunger, 1995; Scotto di Santolo and Evangelista, 2009). 토석류 예측방법은 오랜 시간 토석류 체적-이동거리-사면경사들 간 상호관계에 따른 경험적 방법에 의존하여 왔다(예를 들어, Fahrboschung 해석, Locat and Lee, 2002). 토석류는 토질역학 지반공학 이론으로는 제한된 해석만이 가능하였기에 유체역학에 기초한 수리학적 모델을 개발하고 이를 통한 역해석을 수행하거나 지질공학 이론을 통한 실제 토석류 발생지역의 지형학적 특성만을 고려한 흐름해석을 수행하여 왔다. 기존의 개발모델들은 토석류 거동을 표현하기 위해 시간과 단면에 따라 유동특성이 변하는 부정류-부등류(unsteady-non uniform flow) 수학적 모델로 개발되었다. 이들 모델들은 평균심도를 고려한 수리학적 모델들로 생브낭 방정식(Saint-Venant equation)과 유사하다(Jiang and LeBlonde, 1992, 1993). 이러한 수학적 모델을 사용하여 토석류 해석을 수행하기 위해 반드시 유체거동 입력변수가 필요하다. 하지만 수치해석에 요구되는 입력변수들은 토석류를 뉴턴유체, 완전소성유체 및 입상체들로 가정하고 과거 발생이력을 가진 토석류에 맞도록 임의적으로 선택하여

사용되고 있다. 토석류는 사면을 따라 다양한 입자크기를 가진 혼합물이 빠르게 흘러내리는 것으로 토석류 선단부는 상대적으로 농도가 높으나 후미에는 농도가 낮다. 이러한 이유로 토석류를 세립토와 조립토 등이 물과 혼합되어 슬러리처럼 흘러내리는 점성 거동(viscous behavior)으로 간주한다. 최근에는 토석류를 구성하는 물질들에 대한 토질역학적-유변학적 연구를 통해 토석류를 지배하는 유변학적 매개변수(항복응력과 점도)를 결정하고자 하는 노력이 있었다. 유변학적 매개변수를 결정하기 위해 지구환경분야에서 다양한 점도계(viscometer)와 레오미터(rheometer)가 개발되었다. 현재까지 가장 널리 사용되는 유변물성시험장치는 플레이트-플레이트(plate-plate), 콘-플레이트(cone-plate), 동축 실린더(coaxial cylinder) 타입 등이다. 하지만 이들 시험장치들은 점토 혹은 점토보다 작은 균질한 입자크기를 가진 재료에 적합한 시험기로 토석류처럼 입자크기가 크고 다양한 경우에 부적합하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 입자크기를 가진 토사재해 지역을 대상으로 토석류 해석에 필요한 유변학적 매개변수를 결정하고 토석류 흐름특성을 분석하고자 한다.

현재까지 한국형 토석류 연구는 자연사면 풍화토에 대해 제한적으로 수행되었다. 토석류는 자연사면과 인공사면에서 모두 발생한다. 본 연구는 인공사면에서 발생가능한 대형 토석류를 예측하기 위해 폐광산지역을 선정하였다. 국내에는 5,000 여 개의 크고 작은 광산개발지역이 있으며 이중 대략 80%가 개발 이후 적절한 방재처리없이 방치된 휴폐광산지이다. 버려진 광산폐석은 대부분 실트이상 자갈크기로 다양한 입자크기로 존재하며 식생도입이 상당히

Fig. 1. Rainfall-Induced Mass Movements in Waste Rock Dumps

어렵다. 휴·폐광산지역은 하절기 집중호우에 노출되어 있으며 자연 침식량과 토사재해로 인한 주변환경에 상당한 악영향을 미치고 있으며 집중호우로 인해 산성광산배수(acid mine drainage)를 발생시키고 주변 수계를 오염시킨다. 따라서 휴·폐광산은 토사재해와 수질오염을 야기시키는 근원지로 물리화학적 재해방지 및 대응책이 필요한 곳이다. 본 연구에서는 임기광산에서 발생한 토사재해와 토석류 위험성 평가를 하고자 한다(Fig. 1). 임기광산 폐석적치장은 과거 식생도입부와 비식생부로 구분된다. 적치사면으로부터 침식 작용으로 적치사면 전반에 걸쳐 상당한 침식골이 노출되어 있으며 강우에 따른 낮은 pH와 산성침출수가 배출되어 수계로 흘러 들어가고 하천바닥을 적갈색 침전물을 발생시킨다(Fig. 2). 따라서 본 연구에서는 광산폐석의 유변학적 특성을 분석하고, 유변학적 모델들의 적용성을 검토한 후 검증된 유변학적 매개변수를 사용하여 1-D 토석류 해석을 수행함으로써 토석류 확산가능성과 위험성을 토론하고자 한다. 하지만 임기광산 폐석적치장으로부터 발생하는 산성광산배수의 처리문제와 수질오염에 대해서는 고려하지 않는다.

2. 항복응력과 소성점도 결정방법

건설재료, 토석류, 하수처리 등 다양한 지구과학분야에서 항복응

력과 점도를 결정하기 위한 노력이 있었다(Schatzmann et al., 2009; Sosio and Crosta, 2009; Scotto di Santolo and Evangelista, 2009; Boniello et al., 2010). 유변학(또는 유동학, rheology)에 있어 점도(viscosity)는 ‘흐름에 대한 저항’을 의미한다. 흐를 수 있는 물질들의 유변학적 특성은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. Figs. 3(a)~3(c)는 각각 흐름곡선(flow curve), 항복응력(yield stress)과 소성점도(plastic viscosity) 결정방법 및 점도-전단속도(shear rate) 간 상관관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 모든 물체는 흐름에 저항하려는 성질을 가지고 있다. 흙과 물이 혼합된 경우 비뉴턴 유체(non-Newtonian fluid)처럼 거동하며 항복응력을 가진다(Coussot and Piau, 1994; Coussot et al., 2002). 흐름곡선은 전단응력과 전단속도 간 상관관계를 나타낸 것으로 Bingham, 전단담화(shear thinning), 전단농화(shear thickening) 및 뉴턴 거동을 말하며 흐를 수 있는 모든 물질에 대해 적용된다(Fig. 3(a)). Fig. 3(b)는 유변학적 매개변수 산정방법을 나타낸 것이다. 겔보기 항복응력(τ_{ya})을 기준으로 하여 항복 전 유체저항을 의사뉴턴점도(pseudo-Newtonian viscosity)라 명명하고, 항복 후 유체저항을 소성점도라고 명명한다. 점도의 경우 겔보기 항복응력과 Bingham 항복응력(τ_y -절편값)의 차이는 미미하나 입자크기가 커질수록 그 차이가 커진다. 토석류의 유동성을 평가할 때 세립토를 다량 함유한

Fig. 2. Imgi Waste Rock Dumps: (a) Erosion and (b) Sediments Flowing Into Mountain Stream

Fig. 3. Flow Characteristics: (a) Flow Curves, (b) Determination of Viscosity and Yield Stress, and (c) Viscosity as a Function of Shear Rate (Modified from Jeong, 2011)

물질의 Bingham 항복응력은 겔보기 항복응력과 거의 유사한 값으로 간주한다. 만약 흐를 수 있는 물질이 비뉴턴 유체라고 할지라도 주어진 전단속도에 대해 유체는 Bingham, 전단담화 및 전단농화 형태로 분류된다(Jeong et al., 2010). 여기서 전단담화와 전단농화는 점도가 전단속도에 따라 증가 또는 감소하는 현상을 말한다(Fig. 3(c)). 점토는 일반적으로 항복응력을 가진 전단담화로 해석하였다(Jeong, 2010). 점토를 다량 함유한 세립토 위주의 토석류 물질들은 완전소성유체인 Bingham 유체로 고려하여 항복응력과 소성점도를 결정한다. 토석류 해석에 적합한 유변학적 모델은 Bingham, Herschel-Bulkley, 멍수법칙(power-law), 이중선형(bilinear)과 Papanastasiou (또는 수정 Bingham) 모델 등이 있다. 이들의 구성 방정식은 아래와 같다.

Bingham

$$\tau = \tau_y + \eta_h \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Herschel-Bulkley

$$\tau = \tau_y + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

멍수법칙

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

이중선형(Locat, 1997)

$$\tau = \tau_{ya} + \eta_l \cdot \dot{\gamma}^n + \left(\frac{\tau_c \cdot \dot{\gamma}_o}{\dot{\gamma} + \dot{\gamma}_o} \right) \quad (4)$$

Papanastasiou

$$\tau = \left[\eta + \tau_y \frac{1 - \exp(-m\dot{\gamma})}{\dot{\gamma}} \right] \dot{\gamma} \quad (5)$$

여기서, τ = 전단응력, $\dot{\gamma}$ = 전단속도, η = 점도, τ_y = 항복응력, η_h = 소성 점도, η_l = 의사뉴턴 점도, K = 유동변수, τ_{ya} = 겔보기 항복응력, $\dot{\gamma}_o$ = 참조 전단속도, m = 유동변수(Papanastasiou, 1987) 그리고 n = 유동지수. $n < 1$ 인 경우, 유체의 거동은 전단담화에 해당하며, $n > 1$ 인 경우, 전단농화를 의미한다. 점토의 경우 $n \ll 1$ 이며, 입자크기가 커질수록 $n \rightarrow 1$ 인 경향이 나타난다(Jeong, 2006; Jeong et al., 2009). 다만 Bingham, Herschel-Bulkley, Papanastasiou (1987)와 이중선형 모델은 항복응력을 가지지만, 멍수법칙 모델은 점도의 변화에만 의존한다.

3. 재료 및 방법

집중호우로 인한 도십지와 산악지 토석류의 위험성을 평가하기 위해서는 토석류 발생지역에서의 토질 및 지반특성을 분석하고, 토석류 수치해석을 수행하기 위한 항복응력과 소성점도를 우선적으로 결정해야 한다. 따라서 지반공학적 유변학적 해석결과에 따라 재해현장에 적합한 방재시설 설계·배치할 수 있다. 본 연구에서는 현재 휴·폐광산으로 분류된 임기광산에 대해 지반공학·유변학적 특성을 분석하고 이를 토대로 1-D 토석류 수치해석을 수행함으로써 향후 발생가능한 토석류 재해에 대해 토의하고자 한다.

3.1 시험재료

본 연구는 국내 산지에 광산개발 후 적절한 광해방지대책없이 방치된 폐광적치사면에 대한 사면거동과 토석류 위험성을 평가하기 위해 필요한 유변학적 특성을 조사하고자 한다. 연구대상지역은 1992년 폐광된 임기광산 남석광산 적치사면으로 부산광역시 기장군 철마면 임기리에 위치한다. 광산적치 상부는 자연 식생도입이 어렵고 잦은 토사재해가 발생하였기에 사면안정성을 검토한 바 있다(Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources,

Fig. 4. Materials Tested: (a) Sample and (b) Grain Size Distribution

Table 1. Geotechnical Properties of Imgi Waste Materials (from KIGAM, 2012)

G_s	w (%)	γ_t (t/m ³)	γ_d (t/m ³)	D_{10}	c_u	w_L (%)	w_p
2.637	6.9	1.7	1.59	0.0064	406	24.5	-

Note: G_s = Specific gravity, w = water content (%), γ_t = total unit weight (t/m³), γ_d = dry unit weight (t/m³), D_{10} = effective grain size (mm), c_u = uniformity coefficient, w_L = liquid limit (%), w_p = plastic limit (%)

2012, 2013). 또한 하부 적치사면에는 광산적치사면의 폐석에 함유된 중금속으로 인해 수계에서 낮은 pH와 높은 금속농도를 갖고 있다. 또한 집중호우 시기에 황화광물이 공기 및 물에 노출되고 금속성분을 함유한 산성 침출수(산성광산배수)가 발생한 것으로 알려져 있다(Youm et al., 2002; Cheong et al., 2004, 2007; Ji and Cheong, 2005).

본 연구에서는 임기광산 폐석적치장 상부와 하부에서 4번체 (<4.75 mm)를 통과한 폐석미분 시료를 채취하였다. Figs. 4(a) and 4(b)는 현장에서 채취된 광산폐석 시료와 체분석 시험을 통한 입도분포곡선이다. 지반공학적 특성을 알아보기 위하여 단위중량, 비중, 입도분석 및 액소성한계 시험을 수행하였다. 광석폐석더미는 통일분류법(USCS)에 따르면 실트질 모래(SM)로 실트 3%, 모래 67%, 자갈 30%이다. 현장 건조단위중량은 1.594 t/m³, 비중은 2.6, 투수계수는 2×10^{-4} cm/sec, 현장 함수비는 7%, 그리고 액성한계는 25%였다. Table 1은 광산폐기물 폐석미분에 대한 지반공학적 실험결과이다.

3.2 시험방법

광산폐석의 유변학적 특성을 분석하기 위해서 베인관입형 레오미터(Vane-penetrated measuring rheometer, RheolabQC)를 사용

하였다. 과거 유변학적 시험에 사용된 시험기를 ‘점도계(viscometer)’라고 명명하는데 이것은 대상물질의 점도(viscosity)를 얻기 위한 시험기이기 때문이다. 본 연구에 사용된 시험기는 ‘레오미터(Rheometer)’로 지구과학 분야에서 ‘유변물성시험장치’라고 명명하며 주로 항복응력(τ_y)과 점도(η)를 함께 측정하기 위해 사용된다. 특히 본 시험기는 0.2~2 cm의 입자크기에 적합한 시험기이다. 따라서 자연사면에서 다양한 입자크기를 가지고 유체처럼 거동하는 토석류의 유변학적 매개변수를 산정하기에 적합한 시험기이다(Sosio and Crosta, 2009). 본 시험기는 때때로 콘크리트의 유변학적 특성을 결정할 목적으로 사용되기도 한다(Schatzmann et al., 2009). 베인대신 다양한 형태의 불타입을 시료에 관입하여 회전 때론 토크를 측정하는 볼관입식 시험기(Ball-measuring rheometer)를 사용하기도 한다. 시험기는 베인, 시료 용기, 컴퓨터 저장시스템으로 구성된다. 베인의 크기는 20 mm × 40 mm이며, 시료 용기의 반지름은 58 mm, 높이는 48 mm, 그리고 체적은 500 ml이다(Fig. 5). 시험기의 전단응력(τ)과 전단속도($\dot{\gamma}$)의 측정가능한 범위는 각각 $100 \leq \tau \leq 8000$ Pa과 $0.001 \leq \dot{\gamma} \leq 100$ s⁻¹이다. 점도의 시험방법은 전단속도 제어법(controlled shear rate)와 전단응력 제어법(controlled shear stress)이 있으며, 본 연구에서는 전단응력 제어를 통한 시험을 수행하였다. 응력 또는 속도제어 방식에 따라 100~50,000개의 토크 또는 전단속도에 대해 구간별로 도시할 수 있다. 시험자가 원하는 반죽질기 상태에 대해 시료 용기에 담고 베인날을 시료용기 중심부에 관입시킨 후 제어모드를 결정하면, 자동으로 회전속도에 따른 토크를 읽는다(Fig. 5(b)).

항복응력과 점도를 결정하는 방법은 유동물질의 흐름곡선(flow curve) 결정시험과 크리이프(creep) 시험방법을 통해 가능하다(Torrance, 1987; Locat and Demers, 1988; Coussot et al., 2002; Jeong, 2011). 본 연구에서는 흐름곡선에서 겉보기 항복응력과 소성점도를 결정하는 방법을 선택하고 크리이프 시험방법에 대해

Fig. 5. Vane-Measuring Rheometer System: (a) Geometry and Measurement of Torques and Shearing Speed and (b) Rheometer used (Rheolab QC)

서는 다루지 않는 것으로 한다. 흙의 기본적인 물성실험은 ASTM (American Society for Testing and Materials)과 BNQ (Bureau de Normalization du Quebec) 시험방법을 따랐다. 시험시료는 시험 전 화학적 선처리없이 자연건조하였다. 유변학적 매개변수는 온도에 영향을 받는다. 따라서 시험이 진행되는 동안 일정한 온도상태(21°C)를 유지하고 시료의 함수비를 점진적으로 증가시켜 원하는 물성상태의 흐름곡선 결정시험을 수행하였다. 실험의 시작과 끝에는 시료의 함수비 변화와 스웨덴 타입 폴콘 시험기(60°-10 g 또는 60°-60 g 콘 사용)를 이용한 재성형 비배수전단강도(Leroueil et al., 1983)를 계산하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 광산폐석의 유변학적 특성

베인관입형 레오미터를 사용하여 다양한 물성상태에서 유변물성시험을 수행하였다. Fig. 6은 광산폐석미분에 대한 유변학적 실험결과로써 (a) 전단응력과 전단속도 간 상관관계 및 (b) 점도와 전단속도 간 상관관계를 나타낸 것이다. 연구대상시료는 각기 다른 함수비에 대해 시험되었다. 시험조건은 전체 시료의 무게에 대한 흙 시료의 무게비로 정의되는 체적농도(Volumetric Concentration

of Solid, C_{vs})로 구분하였다. 폐석미분의 체적농도는 52%~65%로 총 7개의 시료를 준비하였다. 실험결과에 따르면, 흐름곡선은 정해진 체적농도에 관계없이 전형적인 전단담화(shear thinning)거동을 보인다(Fig. 6(a)). 즉, 유동지수(n)는 1보다 훨씬 적다($n \ll 1$). 하지만 함수비 상태가 높아질수록(즉, $C_{vs} = 65\% \rightarrow 52\%$) 항복영역(겉보기 항복응력, Fig. 3(b)) 이후 완전소성 거동에 가깝다. 폐석미분의 체적농도가 52%~61%인 경우, 대표적인 Bingham 모델형태의 거동을 보인다. 여기서 겉보기 항복응력이 관측되는 구간은 함수비 상태에 따라 다르다. 즉, 낮은 함수비 조건($C_{vs} = 65\%$)에서는 5 sec 전후에서 항복응력이 관측되고, 가장 높은 함수비 조건($C_{vs} = 52\%$)에서 1 sec 전후에서 항복응력이 관측되었다. Fig. 3에서 보인 바와 같이, 점도와 전단속도 간 상관관계에서 선형 또는 비선형 형태로 뉴턴, Bingham, 전단담화 및 전단농화 거동으로 구분된다. Fig. 6(b)는 폐석미분 시료에 대한 실험결과를 점도와 전단속도로 나타낸 것이다. 전단이 시작되는 시점은 대략 $0 \sim 0.001 \text{ s}^{-1}$ 이다. 정상상태(steady state)에 도달하기 위해 베인이 관입 후 1회 회전이 마치는 구간까지 대략 10~20 sec가 소요되며, 전단속도가 $0.002 \sim 0.2 \text{ s}^{-1}$ 구간 사이이며 이때의 점도는 $200 \sim 6,000 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 이다. 전단속도가 $0.2 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 사이는 파괴에서 파괴 후 상태로 발전하는 단계(전이영역)이며 전단속도가 1 s^{-1} 인 경우부터 파괴 후 거동영역(post-failure stage)에 속한다. 즉, 파괴 후 거동은 앞서 나타난 Fig. 3(c)와 같이 Bingham과 전단담화 사이의 거동을 보인다. 베인이 1회 완전 회전이 이루어지면 전단면이 생성되고 베인에 의해 전단부와 비전단부는 구분된다. Fig. 5(b)에서처럼 함수비가 높아질수록 전단부 주변부에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 가장 높은 함수비 조건에서는 전단부와 전단면 이후 완전히 분리된 영향권이 육안으로 선명하게 관측된다.

4.2 유변학적 모델의 적용성

토석류 유변학에서는 다양한 유변학적 모델들이 사용된다. 가장 널리 사용되는 모델들은 Bingham, Hershel-Bulkley, 멍수법칙(Power-law)과 이중선형(bilinear) 모델 등이다. 앞서 소개한 바와 같이 광산폐석 시료에 대한 유변학적 모델들의 적용성을 살펴보고자 한다. Fig. 7은 체적농도가 63%인 함수비 상태로 가장 낮은 시험조건에 대한 결과를 5가지 유변학적 모델들의 적합성을 검토한 것이다. Bingham 모델은 항복 이후 결정되는 소성구간을 기준으로 하여 기울기는 소성점도라 하고, y-절편은 항복응력으로 정의한다. 따라서 Bingham 모델의 경우, 함수비가 낮을수록 적용성이 낮고 함수비가 높을수록 적용성이 높다. Fig. 7(a)에서 보이듯, 베인이 완전히 한번의 회전이 되기 전의 상태이므로 파괴 전(pre-failure) 및 파괴(failure) 시점에 대한 전단거동을 예측하기 어렵다. Fig. 7(b)는 Hershel-Bulkley와 멍수법칙 모델을 적용한 예이다. 두

Fig. 6. Rheology of Imgi Waste Materials: (a) Shear Stress and Shear Rate and (b) Viscosity and Shear Rate Relationship

Fig. 7. Rheological Models for the Volumetric Concentration of Sediment (C_{vs}) of 65%: (a) Bingham, (b) Herschel-Bulkley and Power-law, (c) Bilinear, (c) Modified Bingham Model with Different m Values

모델 역시 Bingham 모델과 마찬가지로 파괴 후 거동에 적합한 모델들이다. 다만, Herschel-Bulkley 모델의 경우 항복응력이 존재하지만, 멱수법칙은 모델 특성상 항복응력을 표현하지 못한다. 따라서 멱수법칙 모델은 정상상태에서만 제한적으로 적용되었다. Fig. 7(c)는 Locat (1997)가 제안한 이중선형 모델의 적용한 결과이다. 이중선형 모델의 가장 큰 장점은 파괴 전과 파괴 후를 구분하여 표현할 수 있다는 점이다(Fig. 3(b)). 그림에서 나타내었듯, 전단속도가 1 s^{-1} 에 해당하는 시점에서 전단응력은 대략 $1,800 \text{ Pa}$ 를 나타낸다. 파괴 시점 전과 후에 결정된 점도는 각각 $1,600 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 과 $200 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 로 대략 8배의 차이를 보인다. Fig. 7(d)는 Papanastasiou (1987)에 의해 소개된 유변학적 모델이며 Bingham 모델의 수정된 형태이다. 수정 Bingham 모델은 유동변수 m 의 값에 따라 상이한 거동을 보이는데 주어진 그래프에서는 m 을 0.3, 0.5, 1.0을 적용하여 적용성을 살펴보았다. 변수 0.3~1 사이에서 상대적인 적합성이 높으나 파괴후 시점에서는 m 값이 증가할수록 완전소성에 대한 적합성이 높은 것을 알 수 있다. 참고로 점토의 경우, 유동변수 m 은 0.1~2 사이의 값을 가진다(Jeong, 2006). 여기서 소개된

모든 유변학적 모델들은 파괴 후 시점인 정상상태에서 유변학적 특성을 분석하기에 적합하다. 그리고 이중선형과 수정 Bingham 모델은 파괴 전과 후의 거동을 함께 살펴보기에 적합한 것을 알 수 있다. 따라서 산사태 발생시점과 관련된 파괴시 전단거동특성을 조사하기 위해서는 Bingham과 Herschel-Bulkley 모델이 부적합하며, 토석류처럼 유체가 중력현상으로 흘러 내리는 확산거동을 해석하기 위해서는 모든 유변학적 모델을 사용할 수 있다. Fig. 8은 각기 다른 함수비 조건에 대한 폐석미분배에 대해 상기 적용된 Bingham, Herschel-Bulkley, 멱수법칙, 이중선형 및 수정 Bingham 모델들을 사용하여 모델의 적용성을 살펴보았다. Fig. 8은 첫 번째 열은 Bingham 모델을 사용한 경우이고, 두 번째 열은 Herschel-Bulkley와 멱수법칙을 적용한 것이며, 세 번째와 네 번째 열은 각각 이중선형과 수정 Bingham 모델을 적용한 결과이다. 결론적으로 앞서 체적농도 63%의 결과와 마찬가지로 함수비 상태에 관계없이 동일한 결론에 도달함을 알 수 있다(Fig. 8). 적용된 유변학적 모델의 결과는 Table 2와 같다.

Fig. 8. Rheological Models for the Volumetric Concentration of Sediment: (a-d) $C_{vs} = 61\%$, (e-h) $C_{vs} = 60\%$, (i-j) $C_{vs} = 59\%$, (m-p) $C_{vs} = 55\%$, and (q-t) $C_{vs} = 53\%$. The First Column of Every Row is the Bingham, and the Second, the Third and the Fourth Columns are the Same as $C_{vs} = 61\%$

Table 2. Rheological Properties of Imgi Waste Materials

C_{vs}	Bingham			Herschel-Bulkley				Power law			bilinear				mB
	τ_y	η_h	r^2	τ_{HB}	K	n	r^2	K	n	r^2	τ_b	$\eta_{p,N}$	r^2	γ_o	m
65	2892.5	209.2	0.962	2892.0	177.91	1.098	0.928	2645.2	0.258	0.978	2892.5	1617.1	0.971	2.055	0.1
								868.5	0.959	0.937		555.9	0.942	8.343	0.5
												1039.1	0.941	3.485	1.0
63	1807.1	40.4	0.900	1807.0	36.97	1.067	0.886	1543.5	0.172	0.986	1807.1	392.5	1.000	5.132	0.1
								528.0	1.013	0.890		407.6	0.999	4.921	0.5
												368.2	0.995	5.512	1.0
61	948.4	15.5	0.793	948.0	14.84	2.194	0.689	802.8	0.154	0.888	948.4	1387.6	0.989	0.691	0.3
								312.3	0.767	0.966		1185.9	0.972	0.810	0.5
												929.7	0.955	1.037	1.0
60	661.7	7.3	0.925	660.0	6.77	1.049	0.901	547.5	0.140	0.998	661.7	392.5	1.000	1.718	0.5
								277.4	0.488	0.870		407.6	0.997	1.653	0.8
												368.2	0.997	1.833	1.0
59	315.9	6.5	0.932	290.0	10.51	0.933	0.945	248.8	0.202	0.998	315.9	187.3	0.997	1.747	0.5
								126.7	0.548	0.925		187.2	0.998	1.748	0.8
												190.4	0.995	1.718	1.0
55	232.8	1.8	0.969	200.0	10.56	0.631	0.986	163.3	0.174	0.997	232.8	110.4	0.975	2.143	0.5
								71.7	0.477	0.972		106.0	0.987	2.233	0.8
												67.5	0.883	3.541	1.0
53	132.9	1.7	0.978	100.0	10.90	0.612	0.998	85.0	0.241	0.985	128.2	686.2	1.000	0.187	1.0
								81.9	0.256	0.991		495.5	0.975	0.260	3.0
												431.3	0.980	0.298	10.0

Note: C_{vs} = Volumetric concentration of sediment (%); τ_y , τ_{HB} , and τ_b = Bingham, Herschel-Bulkley, and bilinear yield stress (Pa); η_h and $\eta_{p,N}$ = plastic and pseudo-Newtonian viscosity (Pa·s); K and n = power law index; mB = modified Bingham model; and m = regulation parameter

4.3 체적농도와 유변학적 매개변수(항복응력 및 소성점도) 간 상관관계

앞서 살펴본 바와 같이 동일한 시료라고 할지라도 적용하는 모델에 따라 다양한 유변학적 매개변수들이 존재한다. 이들 가운데 토석류 유변학에 있어 가장 널리 사용되는 것이 항복응력과 소성점도이다. 하지만 항복응력과 소성점도 역시 모델에 따라 다양한 값으로 나타내기 때문에 모델 적합성에 대한 이해와 경험적 선택이 요구된다. 그리고 입자크기에 따라 토석류 흐름해석에 항복응력/소성점도(τ_y/γ_h)를 결정하는 것이 중요하다(Jeong et al., 2010). 항복응력은 토석류의 이동거리를 결정하고 소성점도는 토석류의 이동속도를 결정한다. 이러한 점 때문에 다양한 방법을 통해 토석류의 항복응력을 찾기 위한 연구가 진행되고 있다(Quan Luna et al., 2011; Wu et al., 2013). 토석류 거동을 해석하기 위한 항복응력은 뉴턴(Newtonian) 거동과는 확연한 차이를 보인다. 따라서 비뉴턴 유체(non-Newtonian)에 대해 현재까지 가장 널리 사용되는 항복응력은 모델의 간편성에 기인한 Bingham 항복응력이다. 본

연구에서 다루지 않았으나, 동일한 시료에 대해 항복응력과 비배수 전단강도를 비교함으로써 간편법을 통한 항복응력을 추정할 수 있다. 점도에 대해 Bingham 항복응력과 소성점도를 액성상태에 따라 조사한 선행 연구결과가 지상 및 해저에서 발생하는 산사태 해석에 사용되고 있다(Imran et al., 2001; Locat and Lee, 2009; Jeong 2010; Jeong, 2011).

점도의 경우 일반적으로 가장 널리 사용되는 방법은 유변학적 매개변수를 액성지수의 함수로써 표현하는 것이다(Locat, 1997; Jeong, 2006). 하지만 본 연구에서처럼 특정지역에 대한 정밀해석이 요구되는 경우와 소성지수를 표현할 수 없는 경우 함수비 또는 시험토의 체적농도를 사용한다(Coussot, 1994; Scotto di Santolo et al., 2010, 2012). 본 연구는 후자의 경우에 해당한다. Fig. 9는 체적농도와 유변학적 매개변수 간 상관관계를 나타낸 것으로 (a)는 항복응력-소성점도 간 상관관계이고, (b)는 점도 및 항복응력을 체적농도의 함수로 도시한 것이다. 얻어진 이들의 상관관계는 아래와 같다.

$$\eta_h = 0.003 \cdot \tau_y^{1.6} \quad (6)$$

$$\eta_h = (C_{vs}/55.2)^{33} \quad (7)$$

$$\tau_y = (C_{vs}/39.7)^{17} \quad (8)$$

여기서, C_{vs} 는 시료의 체적농도(%)이다.

4.4 토석류의 흐름특성 분석

토석류의 유동성을 평가하기 위해 1-D BING 모델을 이용하여 흐름해석을 수행하였다. 1-D BING 모델은 라그랑지안(Lagrangian) 모델이며 미국 사우스캐롤라이나 대학교 Imran 박사에 의해 지상 및 해저산사태 유동해석을 위해 개발된 모델이다(Imran et al., 2001). 현재까지 다양한 지형에 대해 토석류의 위험성 평가에

활용되고 있다(Locat et al., 2004, 2009; Jeong, 2010). 해석에 필요한 매개변수는 체적농도에 따른 Bingham 항복응력과 소성점도를 선택하였다. 실제 광산폐석 시료는 Fig. 8에서 보인 것처럼 함수비가 증가할수록 뚜렷한 파괴 후 거동이 관측된다. 따라서 본 연구에서는 항복응력을 100 Pa, 200 Pa, 300 Pa 및 500 Pa로 나누어 적용하였으며, 소성점도는 $\tau_y/\eta_h = 1$ (Locat, 1997)을 기준으로 계산하였다(Table 3). Fig. 10은 흐름해석을 수행하기 위한 임기광산 지형과 토석류 초기 형상이다. Fig. 10(a)는 Fig. 1의 A-A' 단면에 해당하며, 삽입된 Fig. 10(b)는 흐름해석을 수행하기 위한 가정된 초기 포물선 형태의 토석류 물질이다. 포물선은 총 21개의 점들로 구성된다(그림에서는 간략히 표시됨). 토석류 크기는 현장조건을 고려하여 포물선의 높이(a)를 1 m, 밑변의 크기(b)를 5 m, 10 m와 15 m로 가정하였다.

Fig. 11은 Bingham 항복응력 100 Pa, 200 Pa, 300 Pa 및

Fig. 9. Rheological Relationship between C_{vs} (%) and Parameters: (a) Yield Stress (τ_y , Pa) and Viscosity (η_h , Pa·s) and (b) Viscosity and Yield Stress as a Function of C_{vs} (%)

Table 3. Geotechnical and Rheological Condition for Debris Flow Simulation

Initial shape	a	b	τ_y	η_h	L_f	H_f	V_{fr}
<p>Height = a Length = b</p>	1	5	100	0.1-1.0	78.7	0.145	0.510
			200	0.1-1.5	46.0	0.090	0.040
			300	1.0	37.1	0.101	0.025
			500	1-2	25.9	0.119	0.020
		10	100	0.1-1	116.9	0.077	0.007
			200	0.1-1.5	77.7	0.120	0.084
			300	1.0	62.3	0.128	0.052
			500	1-2	47.1	0.146	0.028
		15	100	0.1-1.0	133.1	0.121	0.057
			200	0.1-1.5	106.7	0.149	0.145
			300	1.0	84.7	0.149	0.075
			500	1-2	47.1	0.146	0.028

Note: τ_y = Bingham yield stress (Pa); η_h = plastic viscosity (Pa·s); L_f = runout distance (m), H_f = thickness (m), and V_{fr} = front velocity of failed masses (m/sec)

Fig. 10. Profile used for Mobility Simulation using BING. Insert Shows the Initial Shape of the Flowing Material use in Modeling with BING

Fig. 11. Runout Distance of Imgi Waste Materials Governed by Bingham Viscosity and Yield Stress: (a-b) $\tau_y = 500\text{ Pa}$, (c-d) $\tau_y = 300\text{ Pa}$, (e-f) $\tau_y = 200\text{ Pa}$, and (g-h) $\tau_y = 100\text{ Pa}$

Fig. 12. Velocity of Failed Masses with the Volumetric Concentration of Sediments

500 Pa에 대한 확산과 토석류 선단부 최대이동속도의 수치해석 결과이다. Fig. 11(a)는 500 Pa에 대한 결과이며, 초기 0.2 min에서 5 min 사이의 확산이 어떻게 진행되는지 알 수 있다. 이때 최대 이동거리와 이동속도는 각각 47 m와 0.03 m/sec이며, 퇴적층 두께는 0.15 m로 나타났다. 따라서 체적농도 59%~60%에 해당하는 광산폐석은 다른 토석류에 비해 상대적으로 이동거리와 속도가 상당히 작음을 알 수 있다. Figs. 11(c-d), 11(e-f), 11(g-h)는 항복응력을 각각 300 Pa, 200 Pa 및 100 Pa로 적용한 경우이다. Fig. 11(g-h)에서처럼, 극한강우로 인해 광산폐석이 완전소성유체처럼 거동할 것으로 간주하여, 항복응력이 100 Pa 또는 이보다 작은 값에 해당할 것이다. 항복응력이 100 Pa인 경우 이동거리와 이동속도는 각각 117 m 및 0.007 m/sec이며, 퇴적층의 두께는 0.08 m로 나타났다. 다만 항복응력이 100 Pa로 주어질 때, 다른 경우에 비해 이동속도에 있어 큰 차이를 보인다. 이것은 항복응력이 100 Pa보다 큰 값을 적용한 경우 대부분의 토석류 흐름이 일정한 경사에서 흐르기 때문이다(Fig. 10). 반면, 토석류 흐름이 일정한 급경사 구간을 지나 완경사 구간(110~130 m, Fig. 10)에 들어오면 갑작스런 경사변화로 인해 파 차오름(wave runup) 현상이 발생되고 이로 인해 항복응력 200 Pa일 때 보다 작은 이동속도를 보이게 된다. 결과를 종합적으로 분석해 볼 때 항복응력이 작아질수록 이동거리와 이동속도가 증가함을 알 수 있다(Table 3). 토석류 선단부 이동속도의 경우, 아주 작은 항복응력 100 Pa을 제외한 나머지 경우는 이동속도는 항복응력의 크기에 반비례하는 것을 알 수 있다.

Fig. 12는 토석류가 진행되는 시간에 따른 토석류 이동속도의 변화를 나타낸 것이다. 토석류 초기 발생크기에 따라 포물선의 밑면크기를 5 m, 10 m, 15 m로 구분하고 항복응력을 각각 100~500 Pa로 적용한 예이다. Fig. 12(a)에 나타난 바와 같이, $\tau_y = 100$ Pa일 때, 0.04 min 경과시 토석류의 최대 이동속도는 8 m/sec로 나타났고, 0.1 min 경과시 2.2 m/sec이며, 그리고 1 min 이상 경과할 경우 0.04 m/sec 이하의 속도를 보이고 있다. 여기서 1 min 경과시 토석류가 정상상태에 진입하는 시간으로 판단된다. 항복응력이

100 Pa → 200 Pa → 300 Pa → 500 Pa로 증가될 때 초기 토석류 속도는 현저한 감소경향을 보이지만, 0.1 min 이후 정상상태 도달까지 항복응력에 따른 영향이 초기에 비해 작다는 것을 알 수 있다. Figs. 12(b) and 12(c)는 토석류 초기 크기를 증가시킨 경우이다. 토석류의 초기 이동속도는 시작부의 토석류 크기가 증가할수록 점진적으로 감소하며, Fig. 12(a)와 마찬가지로 0.1 ~ 1 min 경과시 토석류가 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있다. 따라서 항복응력은 토석류 초기 선단부 이동속도에 큰 영향을 미치지만, 전체 이동속도에 미치는 영향은 상대적으로 미미하다. 결론적으로 항복응력은 토석류의 이동거리를 결정하는 중요한 인자임에는 분명하지만 소성점도에 따라 얼마만큼 영향을 받는지는 불분명하다.

본 연구는 토사재해와 산성광산배수로 인해 심각한 재난이 우려되는 휴·폐광산지역을 대상으로 폐광석 시료에 대한 유변물성 특성을 분석하고 실제 지형학적 특성을 고려하여 수치해석을 수행함으로써 토석류의 위험성에 대한 평가를 하고자 하였다. 하지만, 본 연구에서는 토석류 항복응력이 얼마만큼 감소하고 어떤 형태로 변화하는지에 대한 지반공학적 메커니즘 규명에 대해 고려하지 않았다. 특히 수치해석에서는 토석류 부상량(sediment entrainment), 침식, 계곡부 토층두께, 입자파쇄 효과 등을 고려하지 않았다. 토석류 유동성은 흐르는 동안 이질층 간 전단부의 입자파쇄 효과를 고려해야 한다. 예를 들어, 잘 알려진 1990년 홍콩 Tsing Shan 토석류의 경우 토석류 퇴적층의 총 체적이 20,000 m³인데 반해 사면붕괴 지점의 체적은 400 m³로 대략 50배의 체적변화가 발생하였다(Hung, 2005). 이러한 경우, 사면 붕괴부에 대한 체적만을 고려한 수치해석은 토석류 위험성을 과소평가할 수 있다. 또한 항복응력과 점도의 변화는 토석류 부상량, 침식, 입자크기, 입도분포, 토층두께 등에 의존하며 토석류의 이동속도와 이동거리에 영향을 미친다. 따라서 토석류 위험성 평가에 영향을 미치는 지반공학적, 지질공학적, 수리학적, 유동변형학적 인자들에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

5. 결론

휴·폐광산지역은 물리화학적 지반재해 발생지역으로 강우에 따른 토사재해와 산성광산배수로 주변 수계로 유입되어 환경적 문제를 야기시킨다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 가지고 있는 임기광산에 대해 지반공학·유변학적 시험을 수행하고 측정된 유변학적 매개변수들을 토대로 극한강우에 기인한 토석류 위험성을 평가하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 광산폐석의 유변학적 매개변수들(항복응력과 소성점도)을 결정하기 위해 베인관입형 레이미터를 사용하였으며, 전단응력 제어기를 통해 전단응력-전단속도 및 점도-전단속도 간 상관관계를 도출하였다. 세립토 위주의 풍화토에서 얻어진 유변특성과 마찬가지로 광산폐석 시료는 전형적인 전단담화 거동을 보였다. 하지만 함수비가 증가할수록 또는 체적농도가 감소할수록 시료는 전단담화에서 Bingham 소성모델에 가까운 유동특성으로 바뀌는 것을 알 수 있다. 특히 체적농도가 큰 경우(예를 들어, $C_{vs} = 60\% \sim 65\%$)에 파괴 전(pre-failure), 파괴(failure) 및 파괴 후(post-failure) 거동의 구분이 확연하게 관측되었다. 베인이 1회전되기 전 단계는 파괴 전 거동에 해당하고, 대략 전단속도가 1 s^{-1} 에 전단면이 발생하고, 그 이후 파괴 후 거동을 보였다. 따라서 레이미터는 파괴 전, 파괴시점 및 파괴 후 전단거동을 조사하기에 적합한 시험기라고 판단된다.
- (2) 시험시료에 대해 Bingham, Herschel-Bulkley, 멍수법칙(Power-law), 이중선형(bilinear) 및 Papanastasiou(수정 Bingham 모델) 모델의 적합성을 조사하였다. 파괴 전 거동을 적합한 모델은 이중선형(bilinear) 및 Papanastasiou 모델이지만, 적용된 유변학적 모델들은 모두가 파괴 후 토석류 거동에 적용할 수 있는 것으로 나타났다. 다만 멍수법칙 모델의 경우 항복응력을 표현할 수 있고, 이중선형과 Papanastasiou 모델은 다수의 매개변수들로 구성되며 이들을 결정하기 위해서는 다소 복잡한 절차와 경험적 판단이 요구된다. 이러한 점들을 고려하여 본 연구에서는 가장 간편하고 쉽게 결정할 수 있는 Bingham 모델을 통한 항복응력과 소성점도를 선택하여 수치해석에 필요한 매개변수로 사용하였다.
- (3) 1-D BING 모델을 사용하여 토석류 유동성을 평가하였다. 항복응력은 100 Pa, 200 Pa, 300 Pa 및 500 Pa로 나누고, 소성점도는 경험적 방정식인 항복응력/소성점도(τ_y/η_n)의 상관관계를 바탕으로 본 연구에서 얻어진 시험결과를 반영하였다. 지형적 특성과 토사재해 크기(5 m, 10m, 15m)에 따른 토석류의 이동거리, 이동속도 및 토층두께를 조사하였다. 수치해석 결과에 따르면, 토석류 이동거리와 이동속도는 항복응력

의 크기에 반비례하는 것으로 나타났다. 토석류의 이동속도는 초기 시작부에서 큰 값을 보이지만 0.1~1 min 경과시 정상상태에 도달하는 것으로 나타났다. 토석류 크기와 항복응력을 각각 10 m와 500 Pa로 가정한 경우, 퇴적층의 두께는 0.15 m이고 이동거리는 대략 50 m인 것으로 나타났다. 따라서 이보다 작은 모든 경우 붕괴된 토사의 대부분이 계곡부에 도달하는 것으로 나타났다. 또한 토석류의 크기가 커질수록 유동성은 훨씬 큰 것으로 나타났다.

- (4) 토석류가 흘러내리는 동안 토석류 항복응력은 시간에 따라 점진적 감소가 예상된다. 본 연구에서는 초기 토석류 항복응력이 얼마만큼 감소하고 어떤 메커니즘으로 변화하는지에 대한 것을 고려하지 않았다. 또한 토석류 부상량, 하부침식, 계곡부 토층두께, 입자파쇄 효과 등을 고려하지 않았다. 따라서 실제 토석류의 위험성을 과소평가하지 않기 위해 지반공학적, 지질공학적, 수리학적, 유동변형학적 인자들에 대한 토석류 전이과정 메커니즘(transition from slide to flow)관련 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발(12-3212)”과 “실시간 모니터링 기반의 산사태재해 조기탐지 융합시스템 개발(14-3215)” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 그리고 토석류 수치해석은 “국제지각시추사업(13-9102-1)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Beniello, M. A., Calligaris, C., Lapasin, R. and Zini, L. (2010). “Rheological investigation and simulation of a debris flow event in the Fella watershed.” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 989-997.
- Cheong, Y. W., Ji, S. W. and Yim, G. J. (2004). “The acid rock drainage and hydraulic characteristics of the waste rock dump.” *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 5, No. 4, pp. 13-24 (in Korean).
- Cheong, Y. W., Jo, Y. D., Lee, H. S., Yim, G. J., Ji, S. W. and Yang, J. E. (2007). “An experimental study with lysimeter for the vegetating on mine waste dump.” *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 44, No. 5, pp. 411-417 (in Korean).
- Coussot, P. (1994). “Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel.” *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, No. 4, pp. 535-559.
- Coussot, P. and Piau, J. M. (1994). “On the behavior of fine mud suspensions.” *Rheologica Acta*, Vol. 33, pp. 175-184.

- Coussot, P., Nguyen, G. D., Huynh, H. T. and Bonn, D. (2002). "Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids." *Journal of Rheology*, Vol. 46, pp. 573-589.
- Hungr, O. (1995). "A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, pp. 610-623.
- Imran, J., Parker, G., Locat, J. and Lee, H. (2001). "1D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 127, pp. 959-968.
- Jeong, S. W. (2006). *Influence of physico-chemical characteristics of fine-grained sediments on their rheological behavior*, PhD Thesis, Laval University, Quebec, Canada.
- Jeong, S. W. (2010). "Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows." *Geosciences Journal*, Vol. 14, pp. 359-369.
- Jeong, S. W. (2011). "Rheological models for describing fine-laden debris flows: Grain-Size Effect." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 6, pp. 49-61 (in Korean).
- Jeong, S. W., Leroueil, S. and Locat, J. (2009). "Applicability of power law for describing the rheology of soils of different origins and characteristics." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 46, pp. 1011-1023.
- Jeong, S. W., Locat, J., Leroueil, S. and Malet, J. P. (2010). "Rheological properties of fine-grained sediments: The Roles of Texture and Mineralogy." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, pp. 1085-1100.
- Ji, S. W. and Cheong, Y. W. (2005). "Experiment of reactive media selection for the permeable reactive barrier treating groundwater contaminated by acid mine drainage." *Economic and Environmental Geology*, Vol. 38, No. 3, pp. 237-245 (in Korean).
- Jiang, L. and Leblond, P. H. (1992). "The coupling of a submarine slide and the surface waves which it generates." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 97, pp. 12731-12744.
- Jiang, L. and Leblond, P. H. (1993). "Numerical modeling of an underwater Bingham plastic mudslide and the waves which it generates." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 98, No. C6, pp. 10303-10317.
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) (2012). *Development of practical technologies for countermeasures for hazards in steep slope and abandoned mine areas*, Ministry of Knowledge Economy, GP2012-022-2012(1), p. 375 (in Korean).
- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) (2013). *Development of practical technologies for countermeasures for hazards in steep slope and abandoned mine areas*, Ministry of Science, ICT and Future Planning, GP2012-022-2013(2), p. 359 (in Korean).
- Leroueil, S., Tavenas F. and LeBihan, J. P. (1983). "Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, pp. 681-705.
- Locat, J. (1997). "Normalized rheological behaviour of fine muds and their flow properties in a pseudoplastic regime." *Proc. 1st Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation*, San Francisco, ASCE, New York, pp. 260-269.
- Locat, J. and Demers, D. (1988). "Viscosity, yield stress, remoulded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, pp. 709-806.
- Locat, J. and Lee H. J. (2009). "Submarine mass movements and their consequences: An Overview." Sassa, K. and Canuti, P. (eds.), *Landslides-Disaster Risk Reduction*, Springer-Verlag, (ch. 6), pp. 115-142.
- Locat, J. and Lee, H. J. (2002). "Submarine landslides: Advances and Challenges." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39, pp. 193-212.
- Locat, J., Lee, H. J., Locat, P. and Imran, J. (2004). "Numerical analysis of the mobility of the Palos Verdes debris avalanche, California, and its implication for the generation of tsunamis." *Marine Geology*, Vol. 203, pp. 269-280.
- Papanastasiou, T. C. (1987). "Flows of materials with yield." *Journal of Rheology*, Vol. 31, pp. 385-404.
- Quan Luna, B. Blahut, J., van Westen, C. J., Sterlacchini, S., van Asch, T. W. J. and Akbas, S. O. (2011). "The application of numerical debris flow modeling for the generation of physical vulnerability curves." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 2047-2060.
- Schatzmann, M., Bezzola, G. R., Minor, H. E., Windhab, E. J. and Fischer, P. (2009). "Rheometry for large-particulated fluids: Analysis of the Ball Measuring System and Comparison to Debris Flow Rheometry." *Rheologica Acta*, Vol. 48, pp. 715-753.
- Scotto di Santolo, A. and Evangelista, A. (2009). "Some observations on the prediction of the dynamic parameters of debris flows in pyroclastic deposits in the Campania region of Italy." *Natural Hazards*, Vol. 50, pp. 605-622.
- Scotto di Santolo, A., Pellegrino, A. M. and Evangelista, A. (2010). "Experimental study on the rheological behaviour of debris flow." *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 2507-2514.
- Scotto di Santolo, A., Pellegrino, A. M., Evangelista, A. and Coussot, P. (2012). "Rheological behaviour of reconstituted pyroclastic debris flow." *Geotechnique*, Vol. 62, No. 1, pp. 19-27.
- Sosio, R. and Crosta, G. B. (2009). "Rheology of concentrated granular suspensions and possible implications for debris flow modeling." *Water Resources Research*, Vol. 35, p. W03412.
- Torrance, J. K. (1987). "Shear resistance of remoulded soils by viscometric and fall-cone methods: A Comparison for the Canadian Sensitive Marine Clays." *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, pp. 318-322.
- Wu, Y. H., Liu, K. F. and Chen, Y. C. (2013). "Comparison between Flo-2D and Debris-2D on the application of assessment of granular debris flow hazards with case study." *Journal of Mountain Science*, Vol. 10, No. 2, pp. 293-304.
- Youm, S. J., Yun, S. T., Kim, J. H. and Park, M. E. (2002). "Neutralization of acid rock drainage from the Dongrae pyrophyllite deposit: A Study on Behavior of Heavy Metals." *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, Vol. 7. No. 4, pp. 68-76 (in Korean).