풍화토와 점성토 위주의 토석류 거동과 유동특성

Debris Flow Mobility: A Comparison of Weathered Soils and Clay-rich Soils

정 승 원¹ Jeong, Sueng-Won

Abstract

The risks of debris flows caused by climate change have increased significantly around the world. Recently, landslide disaster prevention technology is more focused on the failure and post-failure dynamics to mitigate the hazards in flow-prone area. In particular, we should define the soil strength and flow characteristics to estimate the debris flow mobility in the mountainous regions in Korea. To do so, we selected known ancient landslides area: Inje, Pohang and Sangju debris flows. Firstly we measured physical and mechanical properties: liquidity index and undrained shear strength by fall cone penetrometer. From the test results, we found that there is a possible relationship between liquidity index and undrained shear strength, $C_{ur}=(1.2/I_L)^{3.3}$, in the selected areas, even though they were different in geological compositions. Assuming that the yield stress is equal to the undrained shear strength at the initiation of sliding, we examined the flow characteristics of weathered soils in Korea. When liquidity index is given as 1, 1.5 and 3.0, the debris flow motion of weathered soils is compared with that of mud-rich sediments, which are known as low-activity clays. At $I_L = 1$, it seems that debris flow could reach approximately 250m after 5 minutes. As liquidity index increased from 1 to 3, the debris flow propagation of weathered soils is twice than that of low-activity clays. It may be due to the fact that soil masses mixed with the ambient water and then highly fragmented during flow, thereby leading to the high mobility. The results may help to predict the debris flow propagation and to develop disaster prevention technology at similar geological settings, especially for the weathered soils, in Korea.

요 지

기후변화에 따른 토석류 발생과 그로 인한 피해가 세계적으로 증가 추세에 있다. 토석류 연구는 역학적 관점에서 파괴 후(post-failure) 거동에 해당하며 지반강도와 유동특성을 분석함으로써 특성화할 수 있다. 본 연구는 국내의 토석류 발생지역인 상주(화강암 풍화토), 인제(편마암 풍화토), 포항(이암 및 셰일) 지역을 대상으로 지반의 물성-전단강도 상관관계와 토석류의 유동특성을 평가하였다. 본 연구지역을 대상으로 스웨덴 낙하 콘(Swedish Fall cone) 시험장치를 이용하여 지반의 물성 및 지반강도 사이에 일정한 상관관계가 있음을 밝혔다. 실험결과에 따르면, 인제, 상주, 포항 지역에서 채취된 시료에 대해 액성지수(I_L)와 비배수 전단강도(C_{ur}) 사이에 $C_{ur}=(1.2/I_L)^{3.3}$ 의 관계식이 성립한다. 토석류 흐름을 지배하는 항복응력은 재성형 비배수 전단강도에 상응하는 것으로 간주하고, Bingham 모델과 액성지수-항복응력 관계식을 이용하여 토석류의 유동성을 조사하였다. 유동해석은 국내 풍화토와 낮은 활성점토를 구분하여 적용하였다. 이때 액성지수는 액성한계를 기준으로 $I_L = 1, 1.5, 3.0$ 으로 구분하여 비교분석하였다. 동일한 액성지수($I_L=1$)에 대해, 토석류의 발생 5분 경과 후 최대 이동거리는 250m에 다다른다. 액성지수가 3으로 증가 될 경우, 토석류의 이동거리를 5분까지 살펴본 결과, 국내 풍화토는 낮은 활성점토에 비해 2배 이상 큰 유동성이 있음을 알 수 있었다. 본 유동성 평가기술은 토석류 피해저감기술 전략수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords : Debris flow, Post-failure behavior, Swedish fall cone, Undrained shear strength, Bingham model, Yield stress

¹ 정회원, 한국지질자원연구원, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Tel: +82-42-868-3911, Fax: +82-42-868-3414, suengwon@hotmail.com, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 7월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

우리가 살고 있는 지구는 기후변화에 기인한 자연재해가 광범위하게 발생하고 있다(Petley, 2012). 토석류(debris flow)는 지질재해의 한 종류로 도심지와 산악지 등에서 발생하고 있으며 적지 않은 인명과 재산 피해를 동반한다. 토석류는 산사태의 한 종류로 슬라이딩(활동)으로 생긴 토사와 계곡부 바닥에 쌓여있던 흙과 암석이 물과 함께 빠른 속도(최대 20~30m/sec)로 흘러내려가는 현상을 말한다(Hungr, 2009; Hungr et al., 2001, 2012). 토석류는 지진, 강우, 해빙 등으로 사면내 지반의 전단강도가 급격하게 감소하는 경우에 발생한다(Fig. 1). 국내의 경우 하절기 국지성 폭우에 의한 불안정사면에서 토석류가 빈번하게 발생한다. 토석류는 일반적으로 시작부(source), 이동부(transport) 및 퇴적부(deposition)로 나눈다. 사면의 붕괴는 원호형 사면붕괴(rotational slope failure) 형태와 퇴행성 사면붕괴(retrogressive slope failure) 거동을 동시에 보이는 경우가 많다. 국내의 경우, 활동의 시작부는 30° 이상의 가파른 경사를 보인다. 토석류는 흙, 바위, 물의 혼합체로 거석과 유목 등을 포함하는 경우가 많기 때문에 퇴적부에 있는 사회기반시설에 직간접적인 피해를 초래한다. 특히 거석(boulder)을 다량 함유한 토석류는 제어가 쉽지 않은 흐름속도 때문에 위험성이 클 수 밖에 없다. 소규모 활동을 통한 산사태는 하류로 이동하면서 계상침식을 통해 퇴적토사의 체적이 급격히 증대된다(Hungr, 2005). 따라서 토석류는 계곡형 토석류(channelized debris flow)와 사면형 토석류(open slope debris flow)가 주된 흐름유형으로 나타난다. 알프스 산맥(스위스, 이탈리아, 프랑스)과 국내 강원도 인제지역에서 발생한 토석류는 계류내 퇴적된 토석이 원인이 되는 경우가 많다. 산사태의 변화형이 아니라 포화상태의 계류내 토석(사태물질)이 흘러내리거나 산비

Fig. 1. Characteristics of landslides and debris flow mobility

탈이 깎이는 구곡침식(gully erosion) 등이 토석류의 원인이 되는 경우이다(Remaitre et al., 2008).

토석류는 다른 지질재해(낙석, 이류, 활동 등)에 비해 훨씬 큰 유동성을 가지며, 많은 양의 붕적토를 멀리 운반시킨다. Fig. 1은 산사태 발생과 유동특성을 나타낸 것으로 지반의 파괴(failure)와 파괴 후(post-failure) 단계로 구분된다. 파괴단계에서는 특정 변형률내에서 지반의 전단강도 특성에 의존한다. 파괴 후 단계에서는 하부면 마찰효과(frictional effect)와 점소성효과(viscous-plastic effect)에 따른 흐름특성에 의존한다(예, Hungr, 1995; Locat et al., 2004; Jeong, 2006). 현재까지 토석류 흐름 특성은 유동화(fluidization)의 관점에서 많은 연구가 수행되고 있다(Huynh et al., 2005; Jeong et al., 2004; Khaldoun et al., 2009). 이러한 점에서 사면의 안정성 판단여부는 지질학적, 지반공학적인, 수리학적, 그리고 유변학적 특성에 대한 이해가 요구된다.

토석류는 파괴-파괴 후 거동에 대한 해석과 지수함수-강도특성을 고려한 실험적·수치적 연구가 병행되어야 한다. 과학기술자와 의사결정자가 손쉽게 사용할 수 있는 수치해석 모델을 제시하기 위해서 지반공학의 물리·화학적 특성과 유동학적 특성들 간의 상관관계를 명확히 밝혀야 한다. 또한 점토광물은 유변학적 특성에 영향을 미치기 때문에 국내 풍화토 지층에 존재하는 낮은 활성점토(일라이트, 카올리나이트 등)와 높은 활성점토(몬모닐로나이트 등)의 물성-지반강도 특성 간 상관관계를 밝혀야 한다. 경험적으로 얻어진 상기 상관관계는 세립토 위주의 토석류 거동을 해석하는데 사용된다. 특히 지반의 강도함수는 토석류 해석에서 대표적인 입력변수이다. 예비위험분석 차원에서 개략적인 토석류의 이동성을 예측하고자 할 때 항복응력과 소성점도 간 상관관계식으로부터 전단강도 특성을 얻는다. 이러한 점들을 고려하여 본 연구는 국내 풍화토 지반의 토석류의 강도특성과 유동특성을 조사하고자 한다. 구체적인 방법으로는 (1) 입자크기가 지반공학적인·유동학적 특성에 미치는 영향이 크다는 점을 반영하여 보편화된 토질정수를 산정하여 수치해석을 비롯한 시뮬레이션에서 보다 쉽게 운영할 수 있도록 도울 수 있는 방법을 제시하고자 하며; (2) 서로 다른 기원의 토질에 대해 기본적인 지반공학적인·유변학적 특성을 비교분석하고자 하며; (3) 전단이 발생하는 동안 침투수의 유입으로 인한 사면에서의 파괴 후 거동과 광범위한 유동성을 연관지어 그 변형과정을 이해하고자 하며; (4) 흙의 반죽질기에 따른 한계

항복응력(critical yield stress)과 점도(viscosity)의 비를 이용하여 토석류 유동성을 평가하고자 하며; (5) 큰 유동성을 야기하는 파괴 후 거동관련 입력매개변수를 조사하고자 한다.

2. 토석류의 유동성과 평가기법

토석류가 가진 주된 특징은 사면붕괴 후에 전개되는 사태물질의 유동성이다. 토석류의 유동성은 유변학적 특성들에 의해 결정되기 때문에 사면내 지반의 전단강도와 전단변형률(또는 시간) 간의 특성을 먼저 이해할 필요가 있다. Fig. 2는 지반의 전단강도와 전단변형률 사이의 관계이다. 그림에서 보인 바와 같이 산사태의 파괴단계 전후 지반내 큰 변형이 발생하고, 파괴후 단계를 거쳐 지반의 전단강도는 급격한 감소를 보인다. 파괴활동면을 따라 흙의 함수비는 증가하고 밀도는 감소한다(Fig. 2). 완전 교란된 흙의 전단강도는 재성형 비배수 전단강도이며, 토석류 발생시 지반의 비배수 전단강도는 잔류전단강도(또는 항복응력)에 상응하는 것으로 간주한다. Locat (1997)에 따르면, “토석류 사태물질은 ‘유

Fig. 2. Landslides mechanism: undrained shear strength (yield stress) vs strain (displacement) relationship

Fig. 3. Debris flow mechanism: residual shear strength (yield stress) vs strain (displacement) relationship

변학의 항복응력(yield stress)’에 의존하며 액성지수(liquidity index)의 함수로 표현된다”. 즉, 흙의 상태에 따라 강도의 변화가 생기며 흐름특성이 달라진다(Fig. 3). 따라서 토석류의 물성특성을 알고 전단강도를 결정할 수 있다면, 토석류의 항복응력을 추정할 수 있다. 흙의 상태에 따른 유변학적 특성(항복응력과 소성점도)은 토석류의 유동성(이동거리와 이동속도)에 직접적으로 영향을 주기 때문이다(Imran et al., 2001).

2.1 토석류와 유변학

토석류의 흐름특성은 ‘유변학적 특성’에 의존적이다. 토석류 유변학(debris flow rheology)에서 중요한 매개변수는 항복응력(yield stress)과 소성점성(plastic viscosity)이다. 토석류 흐름이 물리적·화학적 특성에 크게 의존하기 때문에 점토광물을 함유한 세립토에 대해 다양한 현상학적 모델링을 적용함으로써 일반화된 토석류의 흐름특성을 결정해야 한다. 특히 토석류의 흐름은 입자 크기와 광물학적 조성에 따른 유동성 재검토가 필요하다. 이러한 이유로 토석류의 유동성을 분석하기 위해서는 유변학적 특성들을 선행조사해야 한다. 가장 간편한 유동학적 모델들로는 소성모델로 알려진 Bingham, 이중선형(bilinear), Herschel-Bulkley, 멍수법칙(Power-law) 모델 등이 있다. Bingham 모델은 가장 간단한 소성모델이며, 세립토 위주의 토석류 유동성 평가에 사용된다(Jeong, 2011). 여기서 얻어진 Bingham 항복응력은 토석류의 유동패턴을 연구하기 위한 매개변수로서 사용된다(Locat et al., 2004; Malet et al., 2003; Remaitre et al., 2005). Fig. 4는 흐름곡선으로, 전단응력과 전단변형률 속도 간의 관계를 도시한 것이다. 흐름곡선은 점성에 의해 영향을 받는 항복 전(before yielding), 항복응력이 결정되는 항복영역(yielding surface), 소성지배 영역인 항복 후(post-yielding)로 구분한다(Fig. 4a). 항복 전 전단거동은 상대적으로 작은 변형률속도에 해당하며, 일반적으로 $1s^{-1}$ 보다 작다. 항복 후 전단거동은 완전소성 흐름 특성인 점도의존적 거동을 가진다. 유동특성은 전단유동화(shear thinning) 거동을 보인다(Jeong, 2006). 흐름 특성을 판별하는 또 다른 방법은 점도(viscosity, η_h)와 전단응력(shear stress, τ)간의 상관관계를 살펴보는 것이다(Fig. 4b). 유변학적 특성은 유변물성시험장치(rheometer 또는 viscometer)를 통해 가능하며, 시험장치는 실린더, 콘-플레이트, 플레이트-플레이트, 볼 회전형, 베인형 시험기

Fig. 4. Rheological characteristics: (a) shear stress vs shear rate and (b) viscosity vs shear stress (after Jeong, 2006)

등이 있다. Fig. 4b 에서 처럼, 점도는 상대적으로 낮은 전단변형률속도에서 뉴턴거동을 보이며, 멱수법칙 영역을 거쳐 상대적으로 높은 전단변형률속도에서 다시금 선형거동(예, Bingham 소성유체거동)을 보인다. 토석류의 거동은 파괴 후 거동으로 상대적으로 높은 전단변형률속도에 해당하며 Bingham 완전소성모델이 적용되는 경우가 많다.

2.2 항복응력 및 소성점도 결정

유변물성시험장치는 전단응력 또는 전단변형률속도를 제어할 수 있는 시스템으로, $0.1 \sim 1,000s^{-1}$ 의 회전력과 $1 \sim 10,000Pa$ 의 응력제어가 가능하다. 실린더식 회전시험기의 경우, 최대 1,000rpm까지 시험이 가능하며 이것은 유체가 100m/sec 이상의 속도로 흐르는 것과 같다. 흙의 함수비 또는 부유물질농도(%)를 고려하여 충분히 포화시킨 후 시험을 통해 흐름곡선을 작성한다. 점토와 실트질이 다량 함유된 세립토의 경우 유변학적 실험결과와는 Fig. 4와 유사하다(Locat and Demers, 1988). 또한 세립토는 겔보기 항복응력을 가진 전단담화거동을 보

인다(Jeong, 2011). 항복응력과 소성점도는 구성방정식(식 (1))과 같다.

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

여기서, τ = 전단응력, τ_c = 항복응력(Pa), η_h = 점도(Pa·s), $\dot{\gamma}$ = 전단변형률속도(s^{-1}).

유체가 Bingham 거동을 보일 때, 항복응력(τ_c)-소성점도(η_h)-액성지수(I_L) 간 상관관계는 아래와 같다(Locat, 1997).

$$\eta_p = 0.52 \tau_c^{1.12} \quad (2)$$

$$\eta_p = \left(\frac{9.27}{I_L} \right)^{3.3} \quad (3)$$

염분농도에 따라 액성지수와 항복응력 간의 관계식은 아래와 같이 표현된다.

$$\tau_c = \left(\frac{5.81}{I_L} \right)^{4.55} \quad (\text{염분농도 } S = 0g/L) \quad (4)$$

$$\tau_c = \left(\frac{12.05}{I_L} \right)^{3.13} \quad (\text{염분농도 } S = 30g/L) \quad (5)$$

토석류는 흙과 물이 혼합된 유체이며 ‘토석류 유변학’적 이해가 요구된다(Barnes, 1999; Coussot and Piau, 1994; Jeong et al., 2012; Perret et al., 1996; Torrance, 1987). 토석류 유동해석을 수행할 때 편의상 항복응력과 소성점도의 상관관계를 사용한다(Locat and Demers, 1988; Locat et al., 2004; Jeong, 2010). 항복응력과 소성점성은 점토질을 함유한 토석류의 경우 1/1,000의 상관관계를 보인다(Locat, 1997). 실트질과 모래질을 다량 함유한 토석류의 경우 각각 1/100, 1/10의 상관관계를 가진다(Jeong et al., 2010). 지상 및 해저에서 발생하는 토석류는 상기 관계식을 적용할 수 있다(예를 들어, 캐나다 퀘벡 St-Vianney, 노르웨이 Rissa, 노르웨이 Storegga 해저산사태).

2.3 토석류의 유동성 평가기법

앞서 살펴본 것처럼, 토석류 흐름은 동일한 지질 및

지형조건하에서 유변학적 특성에 영향을 받기 때문에 문제를 단순화하는 작업이 필요하다. 유동모델의 주된 구성방정식은 Bingham, Herschel-Bulkley, Papanastasiou (1987), 멱수법칙(Power-law), 이중선형(bilinear) 등이며 (Imran et al., 2001; Locat et al., 2004), 이들의 공통점은 항복응력을 가진 점소성모델이란 점이다(Jeong, 2011). 유체의 흐름은 점소성유체로 가정하기 때문에, 흐를 수 있는 층(전단변형을 일으키는 영역)과 흐르지 않는 층(유수의 모든 부분에서 유속은 일정하고 흐름방향은 수평인 상태를 보이는 플러그 흐름)으로 구분한다(Coussot et al., 2002). 이러한 이유로 유변학적 관점에서 토석류를 해석하고자 할 때 주의 깊게 살펴볼 것이 바로 항복응력의 결정이다. 1D 또는 2D 유동모델의 경우, 지배방정식은 대부분 천수방정식이다. 토석류 해석시 정수압은 깊이에 따라 일정하며, 저항력은 흐름과 경계면에 작용하는 것으로 가정한다. 가소성 유체특성에 기반을 둔 수치적 모델은 점토질이 다량 함유된 토석류의 흐름을 재현할 수 있다(Elvershoi et al., 2005). 이러한 이유로 항복응력과 소성점도의 결정이 중요하다. 토석류 유동 해석에 필요한 매개변수는 Table 1과 같다.

항복응력은 일반적으로 두 가지 방법으로 결정한다. 첫 번째는 유변물성시험장치를 통한 실험적 방법이다. 다른 하나는 지형학적 특성을 고려하여 항복응력을 예측하는 방법이다. 후자의 경우는 Johnson and Rodine (1984)이 제시한 방법으로 토석류가 Bingham 유체거동을 보일 때 가능하며, 구성방정식은 아래와 같다.

$$\tau_{ya} = \gamma' \cdot H_f \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

여기서, γ' = 수중단위중량(해저산사태의 경우 대략 $<15\text{kN/m}^3$, 지상산사태의 경우 대략 $<20\text{kN/m}^3$), α = 사면경사각, H_f = 퇴적층 두께로 평균 토심깊이(critical flow thickness)이다(Jeong, 2010).

전단응력은 식 (4~5)에 대입하여 토석류의 토심깊이를 결정한다. 해저 산사태(즉, 염분농도 $S = 30\text{g/L}$, Locat and Lee, 2002)의 경우, 토심깊이는 다음과 같다.

$$H_f = \frac{(12.05 / I_L)^{3.13}}{\gamma' \cdot \sin \alpha} \quad (9)$$

Johnson and Rodine(1984)이 제시한 관계식과 상기 경험식들(식 1~5)을 종합하면 토석류 유동성 평가를 위한 개략적인 파라메트릭 해석이 가능하다(Locat et al., 2004).

지상의 경우, 상대적으로 높은 사면경사각($\alpha=15\sim 50^\circ$)에서 토석류가 발생하지만, 해저의 경우, 상대적으로 아주 낮은 사면경사각($\alpha=1\sim 3^\circ$)에서도 토석류가 발생한다(Jeong, 2010). Jeong et al.(2010)에 따르면, 세립토 위주로 구성된 토석류의 흐름특성을 확인하기 위해 완전소성모델을 고려한 BING-1D Debris Flow를 이용하여 유동성 해석을 수행하였다. 유동모델은 유체가 무한사면에서 시간에 따른 유동형태, 유동거리 및 속도의 변화를 계산한다. 이때 ‘활동(slide)-흐름(flow)’ 단계를 이어주는 이행(transition, Fig. 2)은 파괴에서 파괴 후 단계로 전개되는 과정이며 토석류 유동성의 크게 영향을 미친다.

본 연구는 국내 토석류 발생지역의 유동성 평가를 위한 국내 풍화토의 지반강도 특성분석 및 유동특성모델 관계식을 제시하는 것이다. 세부 연구목표는 1) 토석류 발생지역의 지반공학적, 지질공학적 및 지형학 특성 분석, 2) 토석류 발생지역 토질의 물리적·공학적 특성 분석, 및 3) 토석류의 유동학적 특성을 분석하는 것이다.

3. 시험재료 및 방법

국내 지질 및 지형특성을 고려한 토석류의 유동특성 모델을 제시하기 위해서는 우선적으로 국내 토석류 발생지역에서의 지반강도특성을 분석하고, 이들의 물성·지반공학적 특성 간 상관관계를 살펴봄으로써 국내 토석류 유동성을 대표할 수 있는 토석류 유동특성 방정식을 제안하고자 한다. 이를 위해 상주, 인제, 포항 3곳의 과거 토석류 발생지역을 대상으로 현장답사, 자료수집 및 시료 채취 등의 작업을 수행하였으며, 이를 바탕으로 사태물질 분류와 지역별 토석류 특성분석, 액성지수와

Table 1. Physical and mechanical properties for debris flow mobility

	Unit weight	Thickness	Slope angle	Cohesion	Friction angle	Yield stress	Plastic viscosity	Liquidity index
Symbol	γ	h	α	c	ϕ	τ_c	η_h	I_L

비배수 전단강도 관계식 규명, 각 지역별 토석류 위험성 평가하고, 마지막으로 국내 풍화토에 대한 유동특성모델 제안식과 모델의 한계점에 대해 토의하고자 한다.

3.1 시료

본 연구는 국내 토석류 발생지역 상주, 인제, 및 포항 3곳을 연구대상지역으로 선정했다. 조사대상지는 각기 화강암 풍화토, 편마암 풍화토, 및 이암 풍화토 지역이다(한국지질자원연구원, 2003, 2009; Kim et al., 2006; Lee et al., 2009). 연구대상지역의 토석류 특성은 Table 2와 같다. 연구대상지역에서 토양샘플 채취시 표토의 잡초나 기타 유기물 등 이물질을 제거한 후 No. 4체(4.75mm)를 사용하여 모래보다 큰 입자크기에 대한 시료를 현장에서 분리하였고, 실내에서는 No. 200체(0.075mm)를 사용하여 조립토와 세립토(<0.075mm)분을 분리하였다. 따라서 연구대상지역에서 50kg의 토양시료를 채취하였다(Fig. 5). 채취한 시료는 비닐팩에 밀봉 후 실험실로 운반, 저장했다. 모든 물성실험과 강도특성 실험용 시료는 자연건조를 원칙으로 하였다. 지반공학적인 특성은 Table 3과 같다.

상주지역은 화강암과 석영반암으로 이루어져 있으며, 석영반암은 조성광물이 풍화에 강한 이유로 고지대를

Table 3. Geotechnical properties of studied soils

		Inje	Pohang	Sangju
Void ratio*	e	—	1.24	0.97
Porosity*	n (%)	50.6	73.5	78.4
Unit weight*	γ_t (g/cm ³)	—	1.5	1.55
Saturated unit weight*	γ_{sat} (g/cm ³)	—	1.72	1.82
Dry unit weight*	γ_d (g/cm ³)	1.31	1.17	1.33
Permeability*	k (cm/sec)	1.26×10^{-2}	4.32×10^{-3}	5.65×10^{-3}
Strength parameters*	c' (kg/cm ²)	—	0.046	0.047
	ϕ' (°)	—	36	36

*=mean value.

형성하고 있고 암반으로 구성되어 있어 산사태는 주로 화강암 지역에서만 발생하였다. 대부분 입도조성이 양호한 토층으로 점토를 함유한 모래질 지반이다. 간극비와 간극률은 0.97 및 78.35이며, 습윤밀도와 포화밀도는 각각 1.55g/cm³ 및 1.82g/cm³ 이고, 건조밀도는 1.33g/cm³ 이다. 투수계수는 평균 5.56×10^{-3} cm/sec 이다. 전단저항각과 점착력은 각각 36° 및 0.047kg/cm² 인 것으로 나타났다. 인제지역의 구성암석은 대보화강암과 호상편마암이다. Park et al.(2011)에 의해 따르면, 입도분석결과와 자

Table 2. Debris flow characteristics of weathered soils in Korea

Research area		Inje (Gneissic)	Pohang (Mudstone)	Sangju (Granitic)
Field Report	Occurrence	July 2006	July 1998	August 1998
	Rainfall (mm)	420~722	150.3 (2 days)	522 (4 days)
	Size	—	~500 landslides	~1,000 landslides
Debris flow	Length (m)	31~40	21~30	21~30
	Width (m)	6~10	6~10	6~10
	Depth (m)	—	≤0.5	—
Geology		Daebo Granite, Banded Gneiss	Mudstone, shale	Granite, Quartz porphyry

Fig. 5. Sampling of debris flow materials: (a) Sangju, (b) Inje, (c) Pohang

갈이 3.96%, 모래가 90.3%, 실트와 점토가 5.73%로 구성되어 있다. 모래질이 풍부한 흙에 속하며, 간극률과 건조밀도는 각각 50.64%와 1.31g/cm³이며, 투수계수는 1.26×10⁻²cm/sec 이다. 포항지역은 제3기충인 이암으로 주로 이루어져 있고, 층리가 잘 발달되어 수분을 흡수하면 손으로도 잘게 부서지는 특성을 갖고 있다. 대부분 입도조성이 양호한 토층으로 다른 연구지역에 비해 포항지역 토질시료는 몬모릴로나이트 함량에 상대적으로 높다. 간극비와 간극률은 1.24 및 73.48이며, 습윤밀도와 포화밀도는 각각 1.50g/cm³ 및 1.72g/cm³ 이고, 건조밀도는 1.17g/cm³ 이다. 투수계수는 4.32×10⁻³cm/sec 이다. 전단저항각과 점착력은 각각 36° 및 0.046kg/cm² 이다.

3.2 시험 방법

흙의 액성지수와 비배수 전단강도 간 상관관계를 규명하기 위해서 낙하 콘 시험장치를 사용한다. 본 연구에서는 스웨덴 낙하 콘 시험기(Swedish fall cone, 60°, 60g 콘)를 통해 액성한계 및 비배수 전단강도를 결정하였다(CAN/BNQ 2501). Hansbo (1957)가 제안한 관입깊이와 비배수 전단강도 간 상관관계식은 다음과 같다.

$$C_u = 9.8K \frac{M}{P^2} \quad (10)$$

여기서, C_u = 비배수 전단강도(kPa), K = 콘계수, M = 콘의 무게(g), P = 콘의 관입깊이(mm). Leroueil et al. (1996) and Wood (1985)에 따르면, 재성형 점토는 30° 콘에 대해 $K = 0.8$, 60° 콘에 대해 $K = 0.27$ 값을 가진다.

Fig. 6. Relationship between liquidity index and undrained shear strength: effect of clay minerals

Leroueil et al.(1983)은 동부 캐나다 예민점토에 대한 액성지수와 비배수 전단강도 간 경험적 관계식을 제안한 바 있다. Fig. 6은 기본적인 점토광물(일라이트, 카올리나이트, 몬모릴로나이트)에 따른 액성지수와 비배수 전단강도 간 상관관계는 아래식과 같다.

$$C_{ur} = \frac{1}{(I_L - 0.21)^2} \quad (11)$$

여기서, C_{ur} = 재성형 비배수 전단강도(kPa), I_L = 액성지수.

스웨덴 낙하 콘 시험장치에서 얻어진 액성지수가 1이 되면(즉, 액성한계일 때), 비배수 전단강도는 1.6 kPa의 값을 가진다. 액성지수 1을 기준으로 높거나 낮은 경우의 전단강도는 점토광물의 구조적 변화와 관련하여 광물학적 특성에 의존한다. 토석류 해석에 필요한 유변학적 특성들은 입자크기, 광물학적 특성, 염도 등에 영향을 받는다(Bardou et al., 2006; Boivin et al., 2004; Jeong et al., 2009, 2012). Fig. 6에서 보인 바와 같이, 몬모릴로나이트 점토광물은 염분농도가 낮을 경우 토립자 사이의 작은 유로로 인해 투수성이 낮다(Terzaghi et al., 1996). 염분농도를 인위적으로 높일 경우, 몬모릴로나이트는 낮은 팽윤성을 띄며 투수성은 높아진다. 높은 염분농도에서는 간극비는 작아지고 입자구조는 면모화하는 경향을 띄기 때문이다(Petrov and Rowe, 1997). 높은 활성점토가 아닌 경우(즉, 상대적으로 낮은 함유량의 몬모릴로나이트를 가진 셰립토의 경우), 토질의 유변학적 특성은 때때로 해저점토와 유사한 거동을 보이며, 이때 주의 깊은 유변학적 관찰이 요구된다(Jeong, 2006).

4. 결과 및 고찰

4.1 토질시험결과

본 연구에서는 토석류 발생지역을 대상으로 흙 시료를 채취하고 기본적인 지반공학적 실내시험을 수행하였다. Table 4는 연구대상지역에 대한 실험 결과이다. Fig. 7은 낙하 콘 시험에 의한 액성한계 실험결과이다. 이것은 Fig. 8에서 보인 Casagrande 방법에 의한 액성한계 실험결과와 다소 차이를 보였다. 실험결과에 따르면 개인적 오차가 다소 크게 나타남을 알 수 있다. 특히 인제의 경우 토질시료에 모래질이 다량 함유되어 실험오차가 매우 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 개인적

Table 4. Test results

	Inje	Pohang	Sangju
Water content (%)	13.9	10.4	19.6
Specific gravity	2.6	2.5	2.6
% Passing #200	30.1	95.1	72.1
Liquid limit (%)	29.7	54	34.9
Plastic limit (%)	22.1	37.3	20.9

Fig. 7. Liquid limit determination using fall cone penetrometer

오차를 최소화하기 위해 액성한계는 낙하 콘 시험방법에 의한 것을 기준으로 하였다. 유기물 농도가 상대적으로 적다하더라도 노건조에 의한 실험은 흙의 물리적 성질에 큰 영향을 미치므로 자연건조에 의한 실험방법을 적용하였다. 세립토의 경우, 상주(화강암 풍화토) 72.1%,

Fig. 8. Comparison of liquid limits using casagrande method and fall cone method

인제(편마암 풍화토) 30.1%, 포항(이암 풍화토) 95.1%로 이암풍화토가 가장 많은 세립토를 함유하고 있는 것으로 조사되었다. 비중은 세 시료 모두 2.5~2.6 사이의 값으로 나타났다. 분석결과에 따르면, 상주와 포항은 점토질 실트와 점토를 많이 함유한 흙의 입도분포를 보였다. 하지만 인제의 경우 모래질 함유량이 높아 전형적인 모래의 특성을 보였다.

상주, 인제, 포항지역의 물성특성은 소성도표(액성한계와 소성지수의 관계)를 통해 확인할 수 있는데, 인제와 상주 지역은 CL로 분류되며, 세립분이 12% 이상이며 A선($I_p = 0.9(w_L - 8)$) 위에 위치한다. 따라서 대상 흙은 압축성과 소성이 상대적으로 낮음을 의미한다($w_L < 50\%$). 반면 포항 지역의 경우 CH와 OH 경계면 사이 또는 OH에 가깝게 나타난다. 즉, 세립분이 12% 이상, A선 아래에 위치하며, 상대적으로 높은 소성을 보였다.

4.2 액성지수와 비배수 전단강도

CAN/BNQ 표준시험방법을 의거하여, 낙하 콘을 사용하여 액성한계와 재성형 비배수 전단강도를 산정하였다. 본 시험방법은 미주, 유럽지역에서 검정된 시험방법으로 불교란 점토시료에 대한 전단강도를 산정하기 위해 사용된다(Leroueil et al., 1983).

그림 9에서 얻어진 액성지수와 비배수 전단강도 사이의 관계식은 다음과 같다.

$$C_{ur} = \left(\frac{1.2}{I_L} \right)^{4.2} \quad (\text{인제}) \quad (12)$$

Fig. 9. Relationship between liquid limit and undrained shear strength: (a) Inje, (b) Pohang, (c) Sangju

$$C_{ur} = \left(\frac{1.1}{I_L} \right)^{2.8} \quad (\text{포항}) \quad (13)$$

$$C_{ur} = \left(\frac{1.2}{I_L} \right)^{2.5} \quad (\text{상주}) \quad (14)$$

시험결과에 따르면, 기준으로 국내 풍화토 지반과 점토를 비교할 경우, 액성지수가 1에 가까울수록 비배수 전단강도는 큰 차이가 없다. 하지만, 흙이 유체화될 때 (i.e., $I_L > 1$) 그 차이가 확연하다. Fig. 10에서 인제, 상

Fig. 10. Relationship between liquid limit and undrained shear strength: a proposed equation from weathered soils

주, 포항에서 결과에 대한 종합적인 상관관계식은 다음과 같다.

$$C_{ur} = \left(\frac{1.2}{I_L} \right)^{3.3} \quad (\text{풍화토: 인제, 상주, 포항지역 대표}) \quad (15)$$

식 (15)의 재성형 비배수 전단강도(C_{ur})를 식 (4)의 항복응력(τ_c)과 같다고 가정하면,

$$\tau_c = \left(\frac{1.2}{I_L} \right)^{3.3} \quad (\text{염분농도 } S = 0\text{g/L}) \quad (16)$$

여기서 항복응력(τ_c)은 물질의 상 변화에 유변적이다. 위 식을 식 (9)와 같이 표현하면 다음과 같다.

$$H_f = \frac{(1.2/I_L)^{3.3}}{\gamma' \sin \alpha} \quad (17)$$

토석류가 발생하기 쉬운 지반을 완전 포화되었다고 가정하고 수중단위중량, 사면경사각, 액성상태 또는 비배수 전단강도 값이 주어지면 토석류의 흐름에 해당하는 토심두께를 결정할 수 있다. 또한 과거 토석류가 발생지의 최대 유동거리와 토석류 퇴적층의 토심두께를 알고 있다면, 해당지역에서 토석류 사태물질의 걸보기 항복응력을 구할 수 있다. 상기 유동특성 방정식은 국내 화강암, 편마암, 및 이암 위주 풍화토 지반에서 세립토

위주의 특성을 보이는 토석류 발생시 토석류 유동성 평가에 제한적으로 적용이 가능한 모델이다.

4.3 지질 및 지형특성을 고려한 토석류의 유동성

토석류가 발생한 지역의 지질과 지형특성은 유동성을 평가하는 기초적 자료로 활용된다. 기본적인 기하학과 경계조건이 정해지면 항복응력과 소성점도의 결정하고 유동특성을 분석한다. 토석류 모델은 Bingham, Herschel-Bulkley, Papanastasiou, 맥수법칙, 이중선형 유체와 같은 비뉴턴 유체(Non-Newtonian fluid)로 표현되며, 가장 많이 사용되는 모델은 Bingham 소성모델이다. Jeong et al.(2010)은 무한사면에서 흐를 수 있는 세립토 위주의 해저 토석류에 대한 유동성평가를 수행하였다.

해저 산사태의 경우(사면경사각 $\alpha = 10^\circ$ 미만), 토석류의 길이와 밀도는 각각 $100 \sim 700\text{m}$ 와 $1,000 \sim 1,700\text{kg/m}^3$ 로 가정하고, 유체밀도는 $1,000\text{kg/m}^3$, 항복응력은 $1,000\text{Pa}$ 로 하였다. 이때 소성점도는 식 (2)를 통해 주어진다(예, $\eta_h = 1\text{ Pa}\cdot\text{s}$). 초기 형상을 포물선형으로 간편화(예, 천해근사법)하고 시간에 따른 토석류 흐름과 확산범위를 확인할 수 있다. 결과는 시간에 따른 토석류의 이동거리와 시간에 따른 토석류의 이동속도로 나타낸다. 토석류 시작부의 토층두께가 주어진 시간범위 내(대략 몇 분 후) $1 \sim 10\text{m}$ 의 퇴적층을 이루면서 $3,000 \sim 10,000\text{m}$ 이상까지 흘러갈 수 있다. 토석류는 사면붕괴 이후 최대 이동속도를 가진다. 시간이 경과되면서 점차적으로 이동속도는 줄어드는 경향을 보이게 되며, 결국 계곡 하부에 퇴적된다. 사면경사가 급한 경우, 속도의 증가와 감

Fig. 11. Debris flow propagation and velocity dependent on liquidity index

소 경향이 더욱 뚜렷하여 초기 가속도 변화의 중요성을 알 수 있다. 하지만 경사가 다소 완만한 경우 토석류의 이동속도는 천천히 감소하는 경향을 보이며 최종 목적지에 도달하게 된다. Locat et al.(2009)에 따르면, 뉴턴의 운동법칙에 근거한 가속도는 초기에 가장 큰 값을 보이고 시간에 따라 줄어든다.

Fig. 11은 상기 완전소성모델을 지상에서 발생하는 토석류에 적용한 결과이다. 풍화토의 지반강도특성을 고려한 토석류의 흐름특성을 살펴보기 위해 해석조건을 간편화하였다. 즉, 동일한 지형학적 조건에서 액성지수와 비배수 전단강도 간 상관관계를 이용하여 토석류 흐름특성을 비교분석하고자 한다. 앞서 토석류 발생지역 토질시료에 대해 낙하 콘 시험장치를 이용하여 물성 및 강도 특성을 조사하였다. 실험결과에 따르면, 상주, 인제, 및 포항 지역에서 채취된 시료에 대해 액성지수와 비배수 전단강도 사이에 $C_{ur}=(1.2/I_L)^{3.3}$ 의 관계(식 15)가 성립한다. 초기 토석류의 길이와 두께는 100m와 20m로 가정하였으며, 점도보정계수는 0.0001, 포물선의 Node 수는 21개로 동일하게 적용하였다. 시간의 경과를 0.0004284, 최종 시간은 30 분으로 하였다. 동일한 사면 경사각(10° 미만), 사태물질의 밀도(1,500kg/m³), 토석류 주변부의 밀도는 1kg/m³이다. 액성지수, $I_L = 1, 1.5, 3.0$ 인 조건에서, 연구대상토질에 따라 항복응력은 1,600, 600, 300, 130, 20 Pa로 구분된다. 그 결과는 Table 5와 같다. 이때 적용된 소성점도는 항복응력과의 상관관계(식 (2))를 통해 각각 1.6, 6, 3, 1.3, 0.2 Pa·s의 값을 가진다.

토석류 항복응력은 재성형 상태의 비배수 전단강도에 해당하는 것으로 간주하여 액성지수와 토질조건(낮은 활성점도와 풍화토)별 토석류의 유동성 해석을 수행하였다(Fig. 12). 이때 액성지수는 액성한계상태를 기준으로 $I_L = 1, 1.5, 3.0$ 으로 구분하여 적용하였다. 동일한

Table 5. Rheological parameters for debris flow simulation

Fluid	Density (kg/m ³)	Yield stress (Pa)	Plastic viscosity (Pa · s)	Liquidity index	Condition
Bingham	1,500	1600	Eq. 4	1	All
		600		1.5	Low-activity clays
		300		1.5	Weathered soils
		130		3.0	Low-activity clays
		20		3.0	Weathered soils

액성지수(i.e., $I_L=1$)에 대해, 토석류의 발생 5분 경과 후 최대 이동거리는 250m에 다다른다. 액성지수가 3으로 증가 될 경우, 토석류의 이동거리를 5분까지 살펴본 결과, 국내 풍화토는 낮은 활성점도에 비해 2배 이상 큰 유동성이 있음을 알 수 있었다. 따라서 국내 산사태 취약지층의 풍화토가 물과 혼합되면 입자이탈과 분리 등

Fig. 12. Debris flow mobility: comparison between clay-rich and weathered soils

Fig. 13. Debris flow velocity with time: (a) low-activity clays and (b) weathered soils

의 파쇄화(fragmentation) 현상이 두드러짐을 나타낸다. 이로 인한 토석류 유동성과 충격력이 더욱 커질 것으로 예상된다. Fig. 13은 흐름 시간별 토석류 선단 유동속도에 대해 낮은 활성점토(점토)와 국내 풍화토를 비교한 결과이다. $I_L = 1.5$ 일 경우 두 토석류 간 큰 변화를 찾을 수 없지만, $I_L = 3$ 이상의 값이 주어지면, 그 변화가 확연함을 알 수 있다. 점토의 경우 이동속도가 최대치에 도달한 다음 속도가 빠르게 평형상태를 도달하고자 한다. 하지만, 국내 풍화토의 경우, 이동속도가 최대치 도달 이후 점진적인 감소 경향을 보인다. 또한 $I_L = 5$ 의 경우, 국내 풍화토는 점토 위주의 흐름에 비해 전반적으로 훨씬 큰 유동속도를 가진다. Fig. 14는 Fig. 13에서 얻어진 결과를 토대로 평형상태에 도달할 때까지 걸리는 유동시간, 최대치에 도달하는데 걸리는 유동시간, 최대유동속도 및 최대유동속도 발생시점까지 이동거리를 액성지수에 대한 함수로 나타낸 것이다. 예를 들어, 액성지수 $I_L = 5$ 일 때, 한계평형상태에 도달하는데 걸리는 시간은 풍화토 점토에 비해 2.5배 정도이며, 최대속도에 도달하는데 걸리는 시간 역시 3배 정도이다. 총괄적으로 국내 풍화토의 유동성은 점착력이 높은 점토에 비해 큰 흐름특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 본 유동성 평가기술은 토석류 피해저감기술 전략수립에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 산사태 발생지역의 DB구축을 통한 향후 동일지역 또는 비슷한 지질학적 특성을 가진 지역에서의 토석류 방지대책을 위한 시간과 비용을 절감할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 토석류 유동모델의 한계점

지상 및 해저 토석류의 흐름특성은 비슷한 기하학적 특성과 경계조건을 가진다(Imran et al., 1999). 차이점은 지상 및 해저의 환경적 요인으로 인한 사태물질의 밀도이다. 또 다른 차이는 수로형 토석류가 흐르는 사면경사각과 만곡부의 편구배 정도의 차이이다. 지상의 경우 상대적으로 높은 사면경사각과 상대적으로 작은 편구배를 가진다. 반면 해저의 경우, 이와 반대 특성을 가지며, 해저의 구불구불한 수로형에서 상당한 코리올리 효과(Coriolis effect)이다(Imran et al., 1999). 지상 및 해저 토석류 흐름특성을 분석하기 위한 수행된 수치모델은 비선형 점소성모델이다. 이와 같은 유동성 평가방법은 저탁류(turbidity current)의 이동성과 진흙을 다량 함유한 해저 산사태의 흐름특성을 수치적으로 해석하고자 할 때 많이 활용된다. 하지만 토석류의 흐름특성 분석은 보완해야 할 점들이 많다. 1D 층적분 모델로써 토석류의 확산(spreading)을 재현할 수 없고, 토석류와 물 경계면 사이에서 발생하는 저항력(resistive drag)을 고려하지 않는다. 또한 지상 및 해저라는 환경적 요인에 관계없이 수막현상(hydroplaning)이 발생하는데 수치적으로 재현하기 쉽지 않다. 해저의 경우 토석류 발생초기 포물선의 뒷면에 발생하는 소용돌이 현상을 고려할 수 없다. 상기 점소성모델은 모래질을 다량 함유된 토석류의 거동해석이 어렵고, 흐름상 간극수압의 변화를 고려하지 않았다(Iverson, 1997). 마지막으로 토석류의 난류영역의 흐

Fig. 14. Flow characteristics between low-activity clays and weathered soils

를특성을 배제된 오로지 층류영역(laminar regime)에 제한적으로 적용하였다. 이러한 토석류 유동특성모델의 취약점을 극복하기 위한 노력이 요구된다.

토석류의 유동성에 대한 위험성 평가방법으로 지형학적 특성모델을 사용하고 있지만, 수치해석을 위한 대부분의 입력변수들은 현장에서 얻어진 값이나 실내 실험값이 아닌 임의의 값 또는 역해석에 의존하는 경우가 다반사이다. 이러한 이유로 국내 산사태 위험지역의 토석류 유동특성모델의 정립과 충격력 평가방법 제안을 위한 추가적인 연구가 필요하다. 이러한 많은 취약점에도 불구하고, 본 연구에서 수행된 토석류 위험성 평가법은 토석류의 이동거리, 이동속도 및 퇴적층의 형상에 대한 정보를 간략하고 쉽게 얻을 수 있다. 국내 토석류 취약지역에 대한 지반의 물성과 강도특성을 간편화 작업을 통해 예비차원의 토석류 유동분석과 토석류 방재 대응책을 마련할 수 있을 것으로 기대한다.

6. 결 론

본 연구에서는 국내의 토석류 발생지역인 상주, 인제, 및 포항 지역을 대상으로 풍화토의 토질특성과 강도특성을 분석하여 토석류의 유동성을 비교분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 토석류 발생지역 토질시료에 대한 현장 및 실내에서 적합한 낙하 콘 시험장치를 이용하여 비배수 전단강도(C_u)를 측정하였다. 실험결과로 따르면, 상주(화강암 풍화토), 인제(편마암 풍화토), 및 포항(이암 풍화토) 지역에서 채취된 풍화토에 대해 각각 $C_u=(1.2/I_L)^{4.2}$, $C_u=(1.1/I_L)^{2.8}$, 및 $C_u=(1.2/I_L)^{2.5}$ 의 관계식이 성립한다. 해성 점토와 비교하여 액성지수가 1.5미만일 경우 해성 점토의 비배수 전단강도에 상응하지만, 액성지수가 2이상일 경우 큰 차이를 보인다. 예를 들어, 액성지수가 3일 경우, 10배 정도의 비배수 전단강도 차이를 보인다.
- (2) 인제, 상주, 및 포항 지역의 종합적인 분석결과를 통해 $C_u=(1.2/I_L)^{3.3}$ 의 관계식을 얻었다. 항복응력(τ_c)은 토석류 유동해석의 기본 입력매개변수로 비배수 전단강도에 상응하는 값이다(즉, $\tau_c=(1.2/I_L)^{3.3}$). 해석상 필요한 소성점도는 항복응력과 관계식으로부터 결정되며 낮은 활성점도일 때 1/1,000의 값을 가진다.

- (3) 무한사면에서 액성상태에 따라 유체가 자유로이 흘러내릴 수 있는 조건하에서 유동특성 분석을 수행하였다. 액성지수 $I_L = 1, 1.5, 3.0$ 로 기준으로 토석류의 이동거리를 5분까지 살펴본 결과, 각각 낮은 활성점도(해성 점토)의 경우 250, 450, 950m, 국내 풍화토의 경우 250, 650, 2,000m에 달하는 유동성을 보였다. 특히 동일한 액성지수에 대해 국내 풍화토는 낮은 활성점도에 비해 토석류 발생 후 2배 이상의 훨씬 큰 유동성을 가진다.
- (4) 분석결과에서 따르면, 토석류 최대 유동속도(V_{peak})와 평형상태에 도달할 때까지 걸리는 유동시간(T_{ss})은 액성지수의 함수이다. 낮은 활성점도와 국내 풍화토의 유동성을 비교할 경우, 액성지수가 높아질수록 최대유동속도와 유동시간은 큰 차이를 보인다. 낮은 활성점도와 비교하여 국내 풍화토의 유동성은 액성지수가 5일 때 최대속도에 도달하는 걸리는 시간은 3배 정도이며, 평형상태에 도달하는데 걸리는 시간은 2.5배 정도이다. 결론적으로 국내 풍화토는 낮은 활성점도에 비해 상대적으로 높은 유동성을 가지고 있고 그만큼 토석류 충격력이 크다는 것을 의미한다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 자체연구사업인 “토석류의 유동성 평가를 위한 지반강도 특성 및 유동 특성 모델 연구(11-7622)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Bardou, E., Bowen, P., Boivin, P., and Banfill, P. (2006). "Impact of small amounts of swelling clays on the physical properties of debris flow-like granular materials: Implications for the study of alpine debris flow", *Earth surface processes and landforms*, Vol. 32, pp.698-710.
2. Barnes, H. A. (1999). "The yield stress-a review or 'παντ ρε ι'-everything flows?", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol.81, pp.133-178.
3. Boivin, P., Bardou, E., and Pfeifer, H. R. (2004). Role and behaviour of clay minerals in alpine debris flows, *EosTrans. AGU*, 85, Fall Meet. Suppl., Abstract, H43G-03.
4. CAN/BNQ, 1986a, Soil-determination of sensitivity of cohesive soils by Swedish fall cone penetrometer method, Canadian Standards Association and Bureau de normalization du Quebec, CAN/BNQ 2501-110-M-86.
5. CAN/BNQ, 1986b, Soil-determination of liquid limit by the

- Swedish fall cone penetrometer method and determination of plastic limit, Canadian Standards Association and Bureau de normalization du Quebec, CAN/BNQ 2501-092-M-86.
6. 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.
 7. Coussot, P. and Piau, J.-M. (1994), "On the behavior of fine mud suspensions", *Rheologica Acta*, Vol.33, pp.175-184.
 8. Elverhøi, A., Issler, D., De Blasio, F. V., Ilstad, T., Harbitz, C. B., and Gauer, P. (2005), "Emerging insights into the dynamics of submarine debris flows", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.5, pp.633-648.
 9. Hansbo, S. (1957), "A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test", *Royal Swedish Geotechnical Institute, Proceedings*, Vol.14, pp.5-47.
 10. 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.
 11. Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M., and Hutchinson, J. N. (2001), "Review of the classification of landslides of the flow type", *Environmental and Engineering Geoscience*, VII, pp.221-238.
 12. Hungr, O., McDougall, S., and Bovis, M. (2005), "Entrainment of material by debris flows", In: *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, M. Jakob and O. Hungr (eds), Praxis, Springer Berlin Heidelberg, pp.135-158.
 13. Hungr, O. (2009), "Numerical modelling of the motion of rapid, flow-like landslides for hazard assessment", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.13(4), pp.281-287.
 14. Hungr, O., Leroueil, S., and Picarelli, L. (2012), "Varnes classification of landslide types, an update, Landslides and engineered slopes: Protecting society through improved understanding", Eberhardt et al. (eds.), Taylor & Francis Group, London, pp.47-58.
 15. Huynh, H. T., Roussel, N., and Coussot, P. (2005), "Aging and free surface flow of a thixotropic fluid", *Physics of Fluids*, Vol.17, pp.033101.
 16. Imran, J., Parker, G., and Pirmez, C. (1999), "A nonlinear model of flow in meandering submarine and subaerial channels", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.400, pp.295-331.
 17. Imran, J., Harff, P., and Parker, G. (2001), "A numerical model of submarine debris flows with graphical user interface", *Computers & Geosciences*, Vol.27(6), pp.717-729.
 18. Iverson, R. M. (1997), "The physics of debris flows", *Reviews of Geophysics*, Vol.35(3), pp.245-296.
 19. Jeong, S. W., Locat, J., and Leroueil, S. (2004), "A preliminary analysis of the rheological transformation due to water infiltration as a mechanism for high mobility of submarine mass movements", *57th Canadian Geotechnical Conference*, Quebec, Session 7G, pp.15-22.
 20. Jeong, S. W. (2006), *Influence of physico-chemical characteristics of fine-grained sediments on their rheological behavior*, PhD Thesis, Laval University, Quebec, Canada.
 21. 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(9), pp.1011-1023.
 22. 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(10), pp.1085-1100.
 23. Jeong, S. W. (2010), "Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows", *Geosciences Journal*, Vol.14(4), pp.359-369.
 24. 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. (Korean).
 25. Jeong, S. W., Locat, J., and Leroueil, S. (2012), "The effect of salinity and shear history on rheological characteristics of illite-rich and Na-montmorillonite-rich clay", *Clays and Clay Minerals*, Vol.60(2), pp.108-120.
 26. Jeong, S. W., Locat, J., and Leroueil, S. (2012), "Fluidization process in submarine landslides: physical and numerical considerations", *Marine Georesources & Geotechnology*, In press.
 27. Johnson, A. M., Rodine, J. R. (1984), "Debris flows". *Slope Instability*. In: Brunsden, D., and Prior, D. B. (eds.), Wiley, Chichester, pp.257-361.
 28. Khaldoun, A., Moller, P., Fall, A., Wegdam, G., De Leeuw, B., Meheust, Y., Fossum J. O., and Bonn, D. (2009), "Quick clay and landslides of clayey soils", *Physical Review Letters*, Vol.103, 188301.
 29. Kim, K. S., Song, Y. S., Cho, Y. C., Kim, W. Y., and Jeong, G. C. (2006), "Characteristics of rainfall and landslides according to the Geological condition", *The Journal of Engineering Geology*, Vol.16, pp.201-204. (Korean).
 30. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2003), Study on landslide hazard prediction, Ministry of Knowledge Economy, 00-J-ND-01-B-15, 339p. (Korean)
 31. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2009), Development of practical technologies for countermeasures for hazards in steep slope and abandoned mine areas, Ministry of Knowledge Economy, GP2009-020-2009(1), 315p. (Korean)
 32. Lee, C. J. and Yoo, N. J. (2009), "A study on debris flow landslide disasters and restoration at Inje of Kangwon province, Korea", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.9, No. 1, pp.99-10 (Korean).
 33. 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.
 34. Leroueil, S. and Le Bihan, J. P. (1996), "Liquid limits and fall cones", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.33, pp.796-798.
 35. 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.
 36. Locat, J. and Demers, D. (1988), "Viscosity, yield stress, remoulded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, pp.799-806.
 37. Locat, J. and Lee, H. J. (2002), "Submarine landslides: advances and challenges", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, pp.193-212.
 38. 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.
 39. Locat, J., Lee, H., ten Brink, U. S., Twichell, D., Geist, E., and Sansoucy, M. (2009), "Geomorphology, stability and mobility of the Currituck slide", *Marine Geology*, Vol.264, pp.28-40.

40. 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*, Rickenmann, D., and Chen, C. L. (eds.), Millpress, Rotterdam, pp.351-362.
41. Papanastasiou, T. C. (1987), "Flows of materials with yield", *Journal of Rheology*, Vol.31, pp.385-404.
42. Park, K. B., Chae, B. G., Kim, K. S., and Park, H. J. (2011), "Analysis of rainfall infiltration velocity for unsaturated soils by an unsaturated soil column test: comparison of weathered gneiss soil and weathered granite soil", *Korea Society of Economic and Environmental Geology*, Vol.44, pp.71-82. (Korean).
43. Perret, D., Locat, J., and Martignoni, P. (1996), "Thixotropic behavior during shear of a fine-grained mud from Eastern Canada", *Engineering Geology*, Vol.43, pp.31-44.
44. Petley, D. N. (2012), "Landslides and engineered slopes: Protecting society through improved understanding, Landslides and engineered slopes: Protecting society through improved understanding", Eberhardt et al. (eds.), Taylor & Francis Group, London, pp.3-13.
45. Petrov, R. J., and Rowe, R. K. (1997), "Geosynthetic clay liner (GCL)-chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.34, pp.863-885.
46. Remaitre, A., Malet, J.-P., Maquaire, O., Ancey, C., and Locat, J. (2005), "Flow behaviour and runout modelling of a complex debris flow in a clay-shale basin Flow behaviour and runout modeling", *Earth surface processes and landforms*, Vol.30, pp.479-488.
47. Remaitre, A., van Asch, Th. W. J., Malet, J.-P., and Maquaire, O. (2008), "Influence of check dams on debris-flow run-out intensity", *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, Vol.8, pp.1403-1416.
48. Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G. (1996), *Soil mechanics in engineering practice*, 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc., NewYork.
49. 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.
50. Wood, D. M. (1985), "Some fall cone tests", *Geotechniques*, Vol.35(1), pp.64-68.

(접수일자 2012. 7. 10, 심사완료일 2012. 12. 17)