

세립토 위주의 토석류에 관한 유변학적 모델: 입자크기 효과

Rheological Models for Describing Fine-laden Debris Flows: Grain-size Effect

정 승 원¹ Jeong, Sueng-Won

Abstract

This paper presents the applicability of rheological models for describing fine-laden debris flows and analyzes the flow characteristics as a function of grain size. Two types of soil samples were used: (1) clayey soils - Mediterranean Sea clays and (2) silty soils - iron ore tailings from Newfoundland, Canada. Clayey soil samples show a typical shear thinning behavior but silty soil samples exhibit the transition from shear thinning to the Bingham fluid as shear rate is increased. It may be due to the fact that the determination of yield stress and plastic viscosity is strongly dependent upon interstructural interaction and strength evolution between soil particles. So grain size effect produces different flow curves. For modeling debris flows that are mainly composed of fine-grained sediments (<0.075 mm), we need the yield stress and plastic viscosity to mimic the flow patterns like shape of deposition, thickness, length of debris flow, and so on. These values correlate with the liquidity index. Thus one can estimate the debris flow mobility if one can measure the physical properties.

요 지

본 연구는 토석류의 유동성과 관련하여 세립토의 흐름특성, 유변학적 모델들의 적용가능성 및 액성상태 의존성 유변학적 특성들을 비교분석하였다. 입자크기에 따른 유변학적 특성을 살펴보고자 점토질이 풍부한 지중해 해저점토와 실트질이 풍부한 캐나다 동부 뉴펀들랜드 와부시 호수에서 채취한 광미에 대한 물성특성을 분석하였다. 점토질이 풍부한 세립토의 경우 전형적인 전단담화(shear thinning) 거동을 보이는 반면, 실트질 광미의 경우는 전단담화와 Bingham 유체 거동을 함께 보인다. 후자의 경우, 전단변형률속도를 높임에 따라 Bingham 유체처럼 거동하였다. 이러한 현상학적 차이는 입자크기에 따른 유동특성곡선의 차이에서 기인한 것이다. 항복응력과 소성점도의 결정은 전단변형에 의한 유동 입자들의 구조적 변화와 응력상태와 관련되기 때문이다. 세립토(< 0.075mm)를 다량 함유한 토석류의 유동성을 역해석하고자 할 때, 퇴적형상(흐름 양상, 퇴적층의 모양, 두께 및 길이 등)은 항복응력과 소성점도에 의해 결정된다. 항복응력과 소성점도는 액성지수의 함수로 나타낼 수 있으므로, 토석류의 발생가능지역에서 액성상태에 따른 토석류의 유동성을 평가할 지표로 활용할 수 있다.

Keywords : Debris flow mobility, Fine-grained sediment, Flow characteristics, Rheological model, Yield stress

1. 서 론

토석류(debris flow)의 유동성은 유동화된 토질들의 이동거리와 속도와 관련된다(Imran 등, 2001; Locat 등,

2004). 토석류의 최대 이동거리와 속도들은 주로 토석류의 토질특성, 유동화에 영향을 미치는 내부·외부인자 및 지형학적 특성에 의해 좌우된다. 이들 유동관련 특성들은 유변학에서 다루는 항복응력(yield stress)과

¹ 정희원, 한국지질자원연구원, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, suengwon@hotmail.com)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

점도(viscosity)를 통해 해석할 수 있다. 토석류 발생관련 유동성을 해석할 경우, 동일한 구조적·지질학적 조건하에서 이동속도는 점도에, 이동거리는 항복응력에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 하지만 이들의 유변학적 매개변수를 결정하는 일은 쉽지 않다. 1920년대 E.C. Bingham 교수의 혁신적 업적 이후로 수많은 유변학적 모델(rheological model)들이 소개되고 있으나, 토석류의 흐름 특성(flow characteristics)을 결정하는데 적용할 간편한 유동특성모델을 제시하기란 여전히 어려운 일이다(Barnes, 1999). 이런 점에 착안하여, 본 연구는 세립토를 다량 함유한 토석류의 이동성에 중요한 영향을 미치는 인자들인 항복응력과 점도를 구하는 방법 및 유동모델의 적용성에 대해 토의하고자 한다. 연구대상재료들은 일라이트 위주의 점토를 가진 지중해 연안에서 채취한 해저점토시료와 광미의 처분장에서 얻어진 고른 입도분포를 가진 실트질 광미들을 대상으로 얻어진 유변학적 결과들에 대해 분석하고자 한다. 광미의 경우 캐나다 동부 지방에서 선광과 제련과정 중 유용한 광물을 회수하고 남은 저품위 불용광물을 선택하였다. 두 시료를 비교분석함은 일반적인 토석류의 흐름 특성이 세립토의 영향을 받는 것으로 알려져 있으나(Locat, 1997), 세립토 내 점토질을 다량 함유한 경우와 실트질이 다량 함유된 경우의 유동학적 특성들이 달라짐에 그 이유가 있다(Jeong 등, 2010). 본 연구는 유동곡선 및 유동특성모델, 연구대상재료와 시험방법, 유변물성 측정시험기의 원리 및 단계별 실험분석방법, 결과 및 토의 순으로 구성하고자 한다.

2. 유동곡선 및 유동특성모델

토석류의 유동성뿐만 아니라 천연재료(벤토나이트, 키크

샌드 등) 및 산업용 재료(치약, 페이트, 폴리머 등)들의 유변학적 특성을 알아보기 위해 일반적으로 이들의 유동곡선을 조사한다. Fig. 1에서 보이듯, 유동곡선(flow curve)은 일반적으로 다섯 가지 형태를 가진다: (1) Bingham, (2) 전단담화(shear thinning - 유변학적 용어는 학문적 배경에 따라 면찰담화, 유동담화, 유동전단화 등으로 다양한 표현으로 사용된다. 본 연구에서는 전단담화로 통일하고자 한다), (3) 의가소성(pseudoplastic), (4) 전단농화(shear thickening) 및 (5) 뉴턴(Newtonian) 타입 등으로 표현할 수 있다. 이들 가운데 토석류가 세립토 위주의 유동거동을 보인다고 가정할 경우 Fig. 1(b)에서 점선으로 보인 바와 같이 일반적으로 의가소성 또는 전단담화 형태의 유동거동을 보이는 것으로 알려져 있다. 실험적으로 얻어진 유변학적 특성들은 토석류의 현상학적 특성들을 역해석하는데 활용되며, 흔히 사용되는 유변학적 모델은 Bingham 또는 Herschel-Bulkley 모델 등이다. Fig. 1(b)에서 보이듯 유동곡선은 두 점성영역으로 나누어 설명할 수 있으며, 상대적으로 낮은(항복 전) 전단변형률에서의 점도(의사뉴턴점도, Jeong 등, 2010)와 상대적으로 높은(항복 후) 전단변형률에서의 점도(소성점도)로 구분된다. 이들이 만나는 중간의 영역(그림에서 사각형)은 항복영역(Papanastasiou, 1987)이라고 불리기도 하나, 본 연구에서는 겉보기 항복응력(apparent yield stress)이라고 명명하기로 한다. 실제 점성토에 대한 유동학적 해석에 의하면 Bingham 항복응력과 겉보기 항복응력은 거의 유사한 값을 가진다(Locat와 Demers, 1988; Jeong, 2006; Jeong 등, 2010, Fig. 2(b)). ‘만물은 흐른다(Everything is flow)’란 철학적인 의미에서 출발한 논쟁을 말하지 않더라도 대략 최근 20년간의 항복응력의 존재와 필요성에 대한 논쟁은 끊이지 않았지만, 토석류의 유동성 해석에 대해서는 항복응력 그 자체가 가지는 의미는

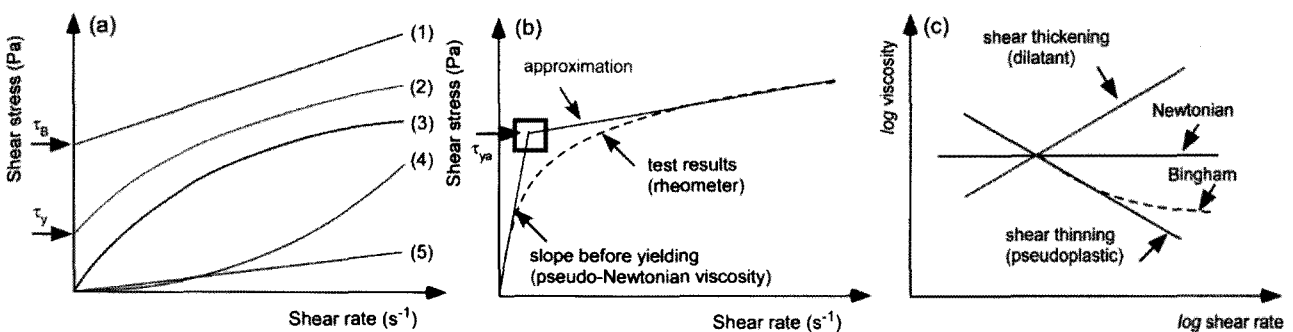


Fig. 1. Rheological characteristics of fine-grained sediments: (a) flow curves, (b) general behavior of muds and bilinear model to determine the rheological properties, and (c) log viscosity versus log shear rate to examine flow behavior.

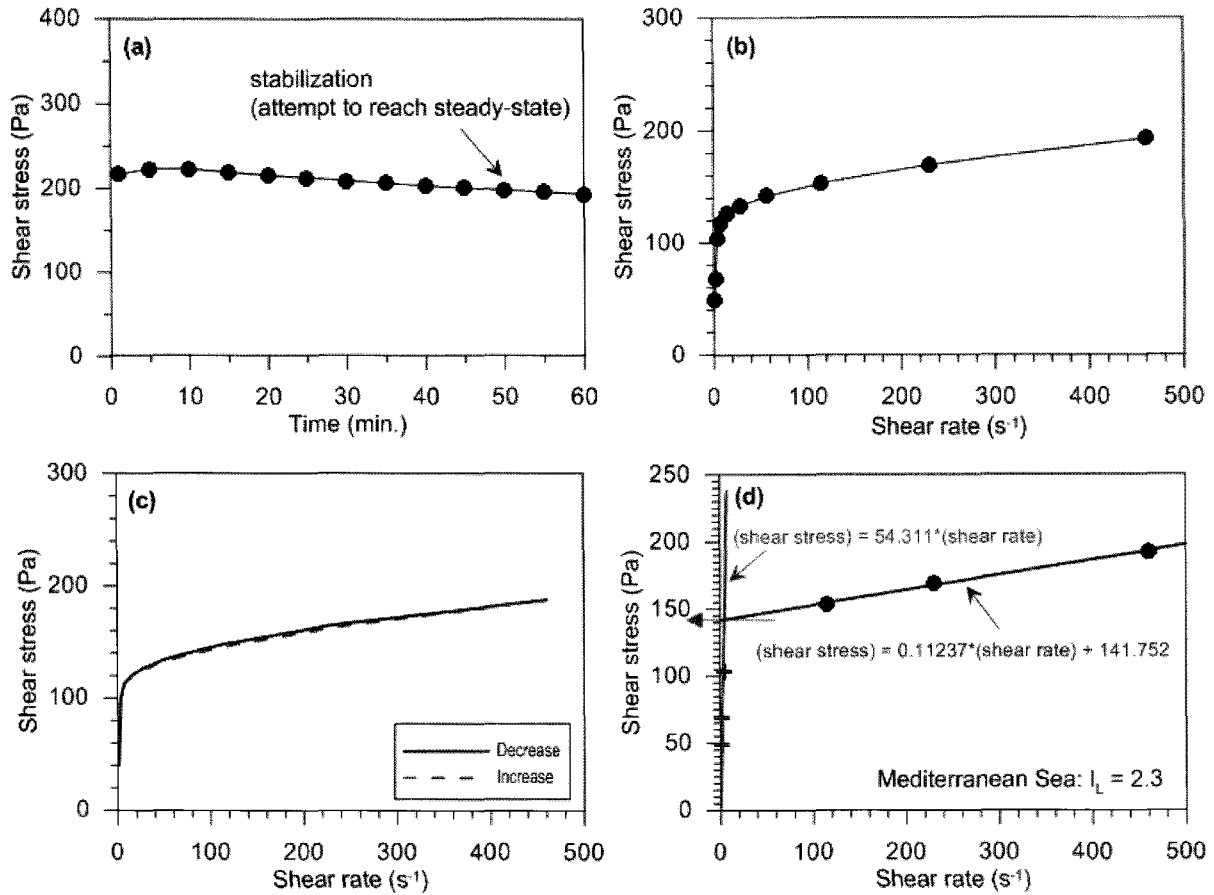


Fig. 2. Determination of yield stress and plastic viscosity: Mediterranean Sea sample, $l_L = 2.3$. (a) Stabilization, (b) flow curve, (c) hysteresis loop, and (d) yield stress, pseudo-Newtonian viscosity and plastic viscosity.

크다고 판단되며 주요한 인자로 인식되고 있다(Coussot 등, 2002; Coussot, 2007). 하지만 본 연구에서는 항복응력의 필요성, 연구대상재료들의 실험준비과정, 현상학적 특성 및 실험적 모순 등에 대해서는 다루지 않기로 한다. Fig. 1(c)는 유동곡선의 결과를 로그그래프 형태로 해석한 것으로 점도와 전단변형률속도 간의 관계를 보인 것이다. 뉴턴유체(Newtonian fluid)의 경우 전단변형률속도에 대해 일정한 값을, 전단담화와 전단농화 유체의 경우 전단변형률속도에 대해 점진적인 증감을 각각 보인다. Bingham 유체의 경우 항복 이후 점도가 점진적으로 수렴하려는(즉, 점선으로 표시된 뉴턴 형태의 거동) 경향을 보이게 된다.

잘 알려진 바와 같이 토석류의 이동성은 항복응력에 대한 최종 이동거리와 점도에 의한 최초 이동속도 등에 의해 토석류의 퇴적형상을 결정하게 된다. 이들 토석류의 유동성을 해석하기 위하여 자주 이용하는 모델들은 Bingham, 이중선형(bilinear), 크로스(Carreau), Herschel-Bulkley 및 Papanastasiou (1987, 때때로 '수정 Bingham 모델'로 알려져 있음), 멱수법칙(power-law) 모델 등이

다. 본 연구에서 비교분석하고자 하는 유변학적 모델들은 다음과 같다.

[1] Bingham

$$\tau = \tau_c + \eta_h \cdot \dot{\gamma}$$

[2] 이중선형(bilinear)

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

[3] 크로스(Carreau)

$$\frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2}$$

[4] Herschel-Bulkley

$$\tau = \tau_c + K \cdot \dot{\gamma}^n$$

[5] Papanastasiou (1987): modified Bingham

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

[6] 멱수법칙(power law)

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n$$

여기서, τ = 전단응력, $\dot{\gamma}$ = 전단변형률속도, η = 점도, τ_c = 항복응력, η_h = 소성점도, η_l = 의사뉴턴점도, η_0 = 점도(zero viscosity), η_∞ = 무한점도(infinite viscosity), K = 유동변수, λ = 시간의 차원을 갖는 상수 인자(Cross-type 유동모델), τ_{ya} = 겉보기 항복응력, $\dot{\gamma}_0$ = 참조전단변형률 (reference shear rate), n = 무차원 유동지수, 그리고 m = 무차원 유동변수.

연구대상재료들에 대해 앞서 소개된 유변학적 모델들을 통해 흐름 특성을 분석하고 역해석을 수행하여 지형학적 특성에 의한 유동성과 비교하게 된다. 본 연구의 마지막 부분은 여섯 가지 유변학적 모델들을 비교분석하고, 토석류에 대한 유동성 해석에 활용할 지수함수와 유변학적 특성들 간의 상호관계를 비교분석하고자 한다. 이는 향후 현장실무자가 복잡한 매개변수들에 의한 불편한 해석과정을 거치지 않더라도 간편한 방법으로 토석류의 흐름특성 및 유동시나리오를 예측할 수 있도록 도와줄 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구는 아래와 같이 재료 및 방법, 유변물성 측정기의 결과를 토대로 유변학적 특성들 중 항복응력과 점도의 활용성, 유변학적 모델들의 적용성 및 유동성 평가에 활용될 액성지수와 유변학적 특성(항복응력과 소성점도)들 간의 상관관계를 제시하고자 한다.

3. 재료 및 방법

3.1 연구대상 재료

본 연구에서 수행된 유변물성실험 재료들은 지중해 연안의 해저 점토를 다량 함유한 지중해 해저점토(Mediterranean Sea) 시료와 캐나다 동부 뉴펀들랜드(Newfoundland) 지역의 광미처분장에서 채취한 실트질 광미이다. 앞서 소개한 바와 같이, 이 두 재료를 선택한 이유는 입자크기를 달리하는 세립토(< 0.075mm)의 유변학

적 특성을 알아보기 위해서이다. Table 1은 토질의 주요 특성을 보인 것이다.

3.1.1 지중해 연안에서 채취한 해저 점토

지중해 연안 해저산사태 발생지역에서 채취한 점토질 시료는 일라이트(illite)를 다량 함유하고 있으며, 폴콘(Fall cone)시험기에서 얻어진 액성지수와 비배수전단 강도는 각각 1.1과 0.63kPa이다. 해저산사태 발생지역은 프랑스와 스페인 국경근처 프랑스에서 대략 25km 남부 쪽에 위치하고 있으며, 카프 데 크레우스(Cap de Creus)에서 대략 15km 떨어져 있다. 시료를 채취한 북서 지중해 카프 데 크레우스 협곡은 서부 리옹 만 대륙붕과 세테(Sete) 대협곡사이 복잡한 구조로 이루어져 있으며, 해저 산사태 조사 및 방재기술 개발 등을 위해 다양한 조사들이 진행되어지고 있다(Lastras 등, 2007; Locat & Lee, 2009). 산사태의 발생지역은 사면의 경사각이 27°, 단층애(escarpment)는 대략 30m 높이를 가지고 있으며, 사면 파괴면은 사면과 거의 일치하는 무한사면으로 되어있다. 연구용 시료는 2004년 카프 데 크레우스 협곡의 토석류 발생지역에서 피스톤 코어 PCFL-665를 통해 채취하였다. 대부분의 시료는 점토질(CF = 52%)로 Table 1에서 보이듯, 액성한계와 소성한계는 각각 62.8%와 24.4%에 해당하며 해수는 30g/L에 가깝다. 토질의 현장특성을 고려하여 지반공학적 유동학적 해석을 수행하게 된다(Sansoucy 등, 2005; Jeong, 2006).

3.1.2 캐나다 광미처분장에서 채취한 실트질 광미

캐나다 동부 퀘벡주와 인접한 뉴펀들랜드 & 래브라도주(Newfoundland & Labrador)에 위치한 래브라도시티의 와부시(Wabush)호수 근처 광미처분장에서 채취한 광미(iron ore tailings) 들이다. 캐나다 철광석회사에 의해 1964년부터 광미를 서부 와부시 지역에 적치하기 시작하였으며, 이로인한 사면안정성 및 환경적 문제를 야기함에 따라 오늘날 철광석 개발 및 광미처분 문제를 해결할 목적으로 많은 연구를 수행중이다(Turmel 등, 2010). 광미를 처분할 목적으로 광미와 광미에 폴리머

Table 1. Geotechnical characteristics of selected soil samples (data from Jeong, 2006)

Sample	w _n (%)	w _L (%)	w _p (%)	I _p (%)	S (g/l)	CF (%)	A _c
Mediterranean Sea	67.5	62.8	24.4	38.4	28.9	52	0.7
Iron ore tailing	-	22.5*	17.6	4.9	-	≤ 20	-

Note: A_c=Activity (=I_p/CF); CF=clay fraction; I_p=plasticity index; S=salinity (g/l); w_L=liquid limit; w_p=plastic limit, * = mean value.

를 섞은 두 형태가 있으나 본 연구에서는 두 경우 특별한 구분없이 채취된 광미의 전반적인 토질특성과 유변학적 특성에 대한 연구결과이다.

광미처분장에서 채취한 시료의 입도분포에 따르면, 적갈색을 띠며, 모래(35-45%), 실트(45-55%) 및 점토(10% 내외)를 가진다. Jeong 등(2009)에 의하면, 입경가적곡선 상에서 빈입도 또는 중간 입도를 가지는 것으로 보이며, 통일분류법에 의하면 CL-ML로 분류된다. 그리고 점토질이 풍부한 지중해 시료에 비해 아주 낮은 소성지수($I_p \leq 5$)를 가진다. 이중 본 연구에서 유변학적 특성을 알아보기 위해 활용된 시료들은 200 번째($< 0.075\text{mm}$)를 통해 얻은 세립토에 대한 실험 결과이며, 시료들은 실험 전후 어떠한 화학적 반응을 통하지 않은 광미적지장 시료와 동일한 조건의 시료에 대해 실험을 수행하였다. 수중 24 시간 동안의 포화과정을 거친 후 자연건조시킨 시료에 대해 물성특성 측정시험장치중 점도계(viscometer)를 통해 유변학적 특성분석을 수행하였으며, 시료는 대략 80%의 실트질과 20%의 점토질로 구성되어졌다. 본 연구에서 두 세립토에 대한 실험방법은 동일하게 적용하였으나, 샘플을 준비하는 과정에서 차이가 있다. 자연 점토의 경우, 해저지반에서 채취한 시료에 대해 어떠한 화학적 처리 없이 물성 및 유변학적 실험을 수행하였다. 실트질 광미의 경우, 광미적지장에서 채취한 시료에 대해 #200체를 통과시킨 세립토에 대해 자연건조시킨 후 실험을 수행하였습니다.

4. 유변물성 측정시험기(rheometer) 및 실험방법

본 연구에서 수행된 두 시료 모두는 동축실린더형 점도계(Rotovisco RV-12)를 통해 시험되어졌으며, 흙의 물성 실험은 ASTM(American Society for Testing and Materials)과 BNQ(Bureau de Normalization du Quebec) 시험방법을 따랐다. 유변물성 측정시험기의 주요 구성은 외부 실린더(시료를 담는 용기)와 전단변형률을 제어하는 내부 센서(유변물성시험기에서는 'bob'이라고 불린다) 등으로 구성되어져 있으며, 제어속도는 $0.1 \sim 1200 \text{ s}^{-1}$ 까지 가능하다. 실험방법은 Locat와 Demers(1988)의 방법을 따랐으며 구체적 방법은 다음과 같이 세 단계로 구성한다: (1) 임의의 전단변형률속도에 대한 전단강도의 안정화, (2) 유동곡선 및 (3) 응력이력 등으로 구성된다. 본 연구에 있어서 응력이력 현상에 대해서는 다루지 않는 것으로 한다. 실험방법은 Fig. 2에서 보인 바와 같이 4단

계로 구분하여 수행된다. Fig. 2(a)에서 보이듯 첫 번째 실린더형의 내부 용기안의 시료들이 주어진 전단변형률속도에 대해 정상상태(steady state)에 도달했는지 여부를 확인한다. 이를 확인하기 위해 주어진 시료에 따라 최대 전단변형률속도를 가하며 최대속도는 512rpm까지 제어할 수 있다. 대략 실험에 필요한 소요시간은 30~60 분 정도 소요되며 점토질의 경우 대부분 이 시간범위 안에 정상상태에 도달하는 것으로 알려져 있다(Jeong, 2006). Fig. 2(b)는 정상상태 도달 후에 전단변형률속도를 제어하여 얻어진 전단강도의 변화를 보인 것이다. 즉 흐름특성을 알아보기 위한 실험의 결과이며, Fig. 2(c)는 응력이력을 얻기 위한 실험으로 전단변형률속도를 최소값에서 최대값까지 순차적으로 증가시켜 최대값에 도달 후 역순으로 최대값에서 최소값까지 전단변형률속도를 제어하여 얻어진 응력이력곡선(hysteresis loop)이다. Fig. 2(c)에서는 유동곡선에서 보인 가장 큰 전단변형률을 대략 15초로 제한하여 적용한 결과이다. 앞서 언급한 것처럼, 본 연구에서는 다루지 않으나 응력이력 효과를 조사하는 것은 점토광물을 달리하는 유동학적 거동과 다양한 역학적·현상학적 연구분야(예를 들어, 시간효과와 반시간효과, Coussot 등, 2002)에서 중요한 연구과제로 인식되고 있다. 그림에서 보이듯 일정 응력하에서 전단변형률을 제어함으로써 유동곡선을 얻을 수 있다. 점토질의 경우 대부분 강한 텍소트로피(thixotropy) 현상을 경험하므로 그림에서 보인 바와 같이 점선 또는 실선이 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 마지막으로 Fig. 2(d)는 항복응력(γ -절편값), 의사뉴턴점도(항복 전 낮은 전단변형률속도에 대한 회귀직선의 경사값) 및 소성점도(항복 후 높은 전단변형률속도에 대한 회귀직선의 경사값)를 구하는 방법을 보인 것이다. 세립토의 경우, 특히 점토질이 다량 함유된 재료에 대해 Bingham 항복응력은 겉보기 항복응력과 거의 유사한 값을 가지며, 본 연구에서는 활용될 지수함수와 유변학적 매개변수들간의 상관관계 도출에는 Bingham 유체를 적용하는 것으로 한다. Fig. 2는 세립토에 있어 항복응력과 소성점도를 구하기 위한 실질적 방법을 설명하고자 제시한 것이다. 따라서 앞으로 설명할 그림들과 비교분석할 필요는 없음을 알려둔다. 액성지수값은 풀콘시험기에서 얻어진 값이다. 그 외에 항복응력과 실험방법에 대한 보다 자세한 내용은 Locat와 Demers(1988)와 Torrance(1987) 등에 의해 찾아볼 수 있다. 연구대상시료에 대해 현장상태와 동일한 염분농도에 맞추고, 실내온도(20°C)와 실린더내

부 온도(7°C) 상태에서 점차적으로 액성지수를 높이거나 낮춤으로써 실험을 수행하였으며, 필요한 경우 스위트 타입의 풀콘시험기를 사용하여 토질강도 값(즉, 재성형 비배수전단강도)을 산출하여 유동특성과 비교분석하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 세립토의 유변학적 특성: 유동곡선

일반적인 세립토의 유변학적 특성은 전단농화 및 Bingham 유체 거동으로 표현된다. Fig. 3은 연구대상재료들인 지중해 해저점토와 실트질 광미 시료에 대해 각각 다른 액성지수($I_L = 2.9 \sim 4.3$)와 함수비($w = 29.3 \sim 45.2\%$) 상태에서 유동곡선을 보인 것이다. 그림에서 (a)와 (c)는 전단응력과 전단변형률속도를 선형그래프로 (b)와 (d)는 점도와 전단변형률속도에 대해 대수그래프로 결과를 보인 것이다. Fig. 3(a)에서 보이듯, 지중해 해저점토의 유동곡선은 세립토가 다량 함유된 일라이트 위주의

점토광물 시료들의 유변학적 특성들과 거의 유사한 결과를 보인다(Jeong, 2006). 참고문헌(Coussot and Piau, 1994; Locat, 1997)에 의하면, 일반적으로 점토를 다량 함유한 세립토의 경우 전단담화 거동을 보이는 것으로 알려져 있다. 반면, Fig. 3(c)에서 보인 바와 같이, 세립토($< 0.075\text{mm}$)가 주를 이루고 있거나 실트질이 다량 함유된 광미의 경우, 다른 유동특성 거동을 보임을 알 수 있다. 다시 말해 Fig. 3(a와 b)는 일반적인 세립토의 유동특성에 보인 것처럼 전단담화(또는 의가소성) 형태에 가까운 거동에 속하는 반면, Fig. 3(c와 d)에서 보인 실트질 광미의 경우 항복응력의 구분이 모호한 전단담화 거동에서 뚜렷한 항복을 보이는 Bingham(항복응력과 소성점도를 가진 완전소성 유체)에 가까운 거동을 보인다.

이러한 결과는 Fig. 3(b)와 Fig. 3(d)에서 확연히 구분하여 설명할 수 있다. Barnes(1999)에 따르면, 유동학적 특성을 보다 쉽게 알 수 있는 방법 중 하나가 바로 점도와 전단변형률속도의 관계를 살펴보는 것이다. Fig. 3(b)의 경우 기존의 많은 연구결과가 그러하듯 아주 낮은 전단변형률속도에서 의사항복(pseudo-yielding) 현상을

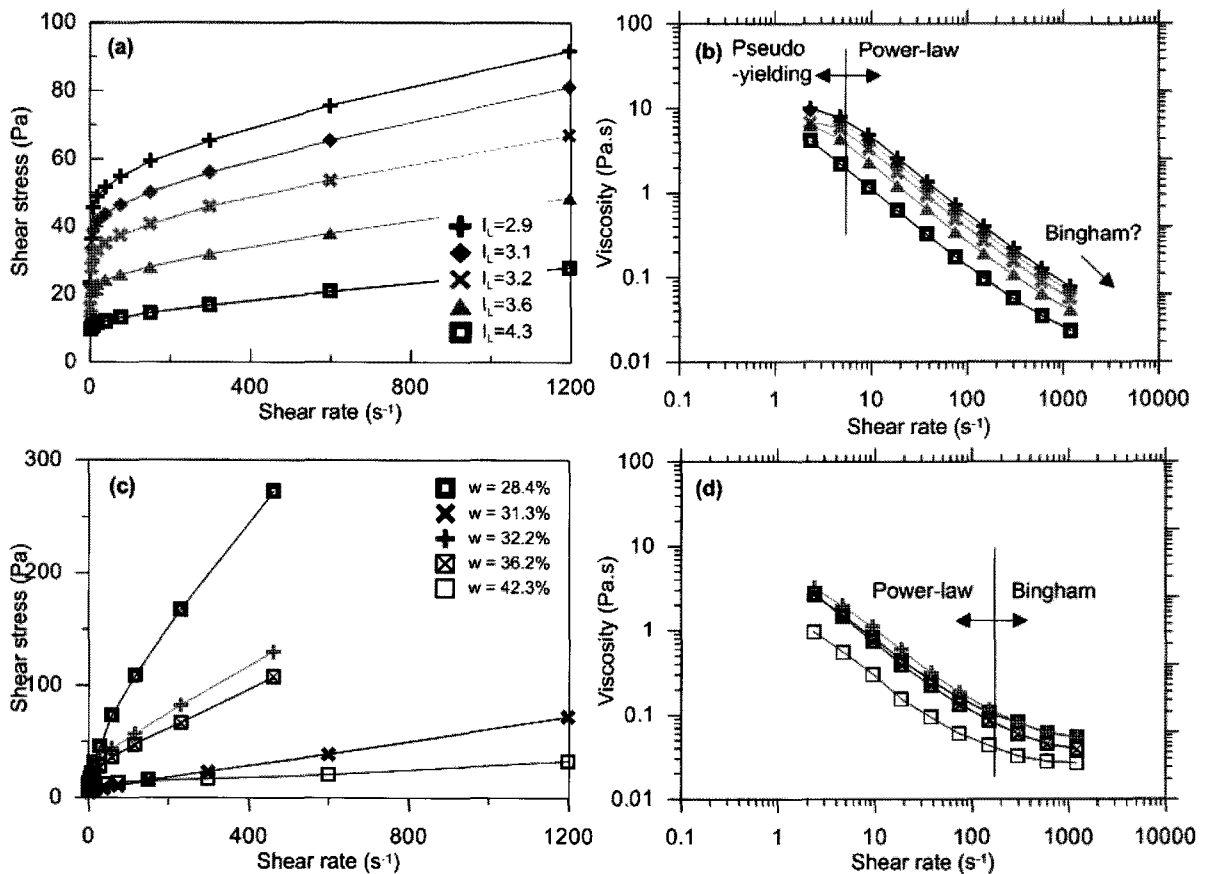


Fig. 3. Flow curves of Mediterranean Sea (a and b) and iron tailing (c and d) samples: (a and c) linear plot of shear stress and shear rate for selected samples and (b and d) log-log plot of viscosity and shear rate. Data from Jeong (2006).

경험하게 된다. 이는 원형실린더 내부의 아주 적은 미소 변형에 대한 토크 값을 읽음에 시료와 벽면(유변물성측정기 실린더)사이의 미끄러짐 현상에 대한 손실부분으로 알려져 있다. 하지만 이런 현상학적 특성들은 유변학적 특성들을 구하기에 큰 어려움을 야기하지는 않는다. 이유는 항복응력과 소성점도를 결정하기에 필요한 유동곡선의 영역 대부분의 경우가 $10 \sim 50 \text{ s}^{-1}$ 내외에 있기 때문이다. Table 2에서 보인 항복응력과 소성점도 값들은 10 s^{-1} 이상에서 얻어진 값들이다. 일반적으로 점토의 경우 항복 전의 아주 작은 전단변형(의사뉴턴점도 영역)을 거쳐 항복에 다다르고 항복영역 이후에는 대부분 멱수법칙(power-law) 거동을 보인다(Jeong 등, 2010). Fig. 3(b)에서는 뚜렷한 경향을 보이지 않지만, 큰 전단변형률속도를 경험하게 될 때 세립토의 전단응력은 그림에서 표시하였듯 Bingham 유체와 거의 유사한 거동을 보일 수 있다. Fig. 3(d)의 경우, 광미의 것으로 멱수법칙과 Bingham 유체 거동의 구분이 확연히 나타난다. 전단변형률속도가 대략 200 s^{-1} 를 기준으로 멱수법칙과 Bingham의 서로 다른 유체거동을 확인할 수 있다. 따라서 유동학적 특성에 영향을 미칠 입자크기 의존성 세립토의 유변학적 특성들은 전단농화 또는 Bingham 유체로 표현할 수 있다.

앞서 소개한 바와 같이, 이들 세립토를 다량 함유한

토석류의 유동성을 판단하고자 자주 사용하는 유변학적 모델들은 Bingham, 이중선형, 크로스(Carreau), Herschel-Bulkley, Papanastasiou 및 멱수법칙 모델 등이고, 연구 대상재료들에 대한 이들의 중요한 유변학적 매개변수 값들은 Table 2에서 정리하였다. Carreau 모델의 경우 시행착오법으로 계산하였으며 임의적으로 구한 점도값은 표기하지 않았다. 항복응력과 소성점도를 구하는 방법에 대해서 본 연구에서는 Bingham 및 이중선형 모델에 대해 구체적으로 알아보았다(Fig. 2). Herschel-Bulkley 모델의 활용법에 대해서는 Coussot와 Piau(1994)에 의해 실험결과와 함께 소개된 바 있다. 나머지 유변학적 모델들에 대해서는 시행착오법에 의한 결과값이다. 또한 이들은 항복응력과 소성점도의 결정이 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 나머지 모델들에 대한 유변학적 매개변수의 결정 과정에 대해서는 다루지 않는 것으로 한다.

5.2 유변학적 모델들의 적용성

Fig. 4와 Fig. 5는 지중해 해저점토($I_L = 2.5$)와 실트질 광미($w = 28.4\%$)에 대해 얻어진 유동곡선 실험결과를 각각 유변학적 특성모델들로 회귀분석 및 적합도의 결과이다. Fig. 4와 Fig. 5에서는 각각 전단응력과 전단변형률속도에 대한 선형그래프 (a-f)와 점도와 전단변형률

Table 2. Geotechnical and rheological parameters of selected soils

Model	Bingham					Herschel-Bulkley				bilinear			Power law			Modified Bingham				
Mediterranean	$w_L = 65.3, w_P = 24.6$																			
w (%)	c_{ur} (kPa)	I_L (mes.)	τ_{c-B} (Pa)	η_h (Pa.s)	r^2	τ_{-HB} (Pa)	K	n	r^2	τ_{c-bi} (Pa)	η_{II} (Pa.s)	r^2	K^*	n^*	r^2	τ_{c-mB} (Pa)	η_h (Pa.s)	m	r^2	
135.48	0.078	2.9	57.32	0.029	0.768	23.51	12.82	0.220	0.968	58.0	10.05	0.994	30.71	0.143	0.957	57.32	0.029	0.15	0.988	
141.59	-	3.1	48.14	0.028	0.828	22.54	8.63	0.251	0.967	48.5	9.63	0.995	26.48	0.142	0.933	48.14	0.028	0.15	0.987	
146.58	-	3.2	39.45	0.023	0.818	16.10	8.02	0.242	0.965	40.0	6.88	0.989	20.71	0.150	0.937	39.45	0.023	0.15	0.984	
161.11	-	3.6	26.57	0.019	0.905	14.81	3.11	0.313	0.963	27.0	6.33	0.993	14.11	0.155	0.913	26.57	0.019	0.15	0.987	
190.47	-	4.3	13.15	0.012	0.972	9.66	0.39	0.525	0.991	13.2	4.13	0.995	6.54	0.181	0.902	13.15	0.012	0.15	0.990	
iron ore tailing	$w_L = 22.9\%; w_P = 16.7\%$																			
w (%)	c_{ur} (kPa)	I_L (mes.)	τ_{c-B} (Pa)	η_h (Pa.s)	r^2	τ_{-HB} (Pa)	K	n	r^2	τ_{c-bi} (Pa)	η_{II} (Pa.s)	r^2	K^*	n^*	r^2	τ_{c-mB} (Pa)	η_h (Pa.s)	m	r^2	
28.4	0.182	1.48	55.22	1.131	0.988	16.32	3.86	0.810	0.996	62.0	23.738	0.999	13.49	0.55	0.989	55.22	1.131	0.05	0.948	
31.3	0.128	1.90	81.97	0.346	0.950	16.17	6.13	0.593	0.989	60.0	8.813	0.999	13.23	0.47	0.997	81.97	0.346	0.05	0.945	
32.2	0.087	2.37	62.98	0.252	0.965	22.56	4.03	0.603	0.992	62.0	16.544	0.999	16.01	0.38	0.993	62.98	0.252	0.05	0.938	
36.2	-	2.55	23.67	0.076	0.993	14.49	1.17	0.599	0.967	13.3	4.211	1.000	7.49	0.34	0.916	23.67	0.076	0.05	0.995	
42.3	-	4.15	9.82	0.037	0.998	7.41	0.23	0.729	0.991	10.0	2.119	1.000	3.20	0.36	0.874	9.82	0.037	0.05	0.998	

Note: c_{ur} = remoulded undrained shear strength measured by Swedish fall cone; K = consistency index; I_L = liquidity index; n = nondimensionless flow index; w_L = liquid limit; w_P = plastic limit; τ_{c-B} , τ_{-HB} , τ_{c-bi} and τ_{c-mB} = Bingham, Herschel-Bulkley, bilinear and modified Bingham (Papanastasiou, 1988) yield stress; η_h and η_{II} (Pa.s) = Bingham and pseudo-Newtonian viscosity; R-squares (r^2) = Coefficient of determination shows how well the data are explained by the best-fit line. Parameters used in Carreau model were specified arbitrarily (ex. Mediterranean Sea: $\lambda \leq 0.9$, $\eta_0 \leq 25$, $\eta_\infty \leq 0.4$; iron ore tailings: $\lambda \leq 0.5$, $\eta_0 \leq 188$, $\eta_\infty \leq 0.7$).

속도에 대한 대수그래프 (g-l)로 적합도의 결과를 보인 것이다. 앞서 언급한 것과 같이 Bingham, 이중선형, 크로스(Carreau), Herschel-Bulkley, Papanastasiou 및 멱수 법칙 모델 순으로 정리하였다.

Fig. 4(a, g)와 Fig. 5(a, g)에서 보이듯, 가장 간편한 완전소성 유동모델인 Bingham 유체의 경우, 유동곡선으로부터 얻고자 하는 항복응력과 소성점도는 아주 큰 전단변형률속도에서 구할 수 있음을 알 수 있다. 대부분의 경우 가장 큰 전단변형률속도(대략 460 s^{-1})에서부터 대략 3~4 단계 앞의 전단변형률속도까지($\dot{\gamma} = 50 \sim 500$

s^{-1})의 회귀분석결과로 얻어진다. 따라서 상대적으로 작은 전단변형에서(또는 항복 전의) 유동특성을 설명하기가 쉽지 않다는 단점을 가지게 된다.

두 번째 유동모델인 이중선형 모델의 경우(항복응력은 겔보기항복응력 값이고, 의사뉴턴점도와 소성점도에 대한 값들은 Fig. 1에서 설명한 바 있다), 구성방정식은 달리하지만, 세 번째 모델인 Carreau 모델과 다섯 번째 모델인 Papanastasiou 모델과 흡사한 결과를 가진다. Carreau 모델과 Papanastasiou 모델의 경우 항복응력보다는 점도에 대해 그리고 유동흐름특성 값인 무차원 함수인 유동

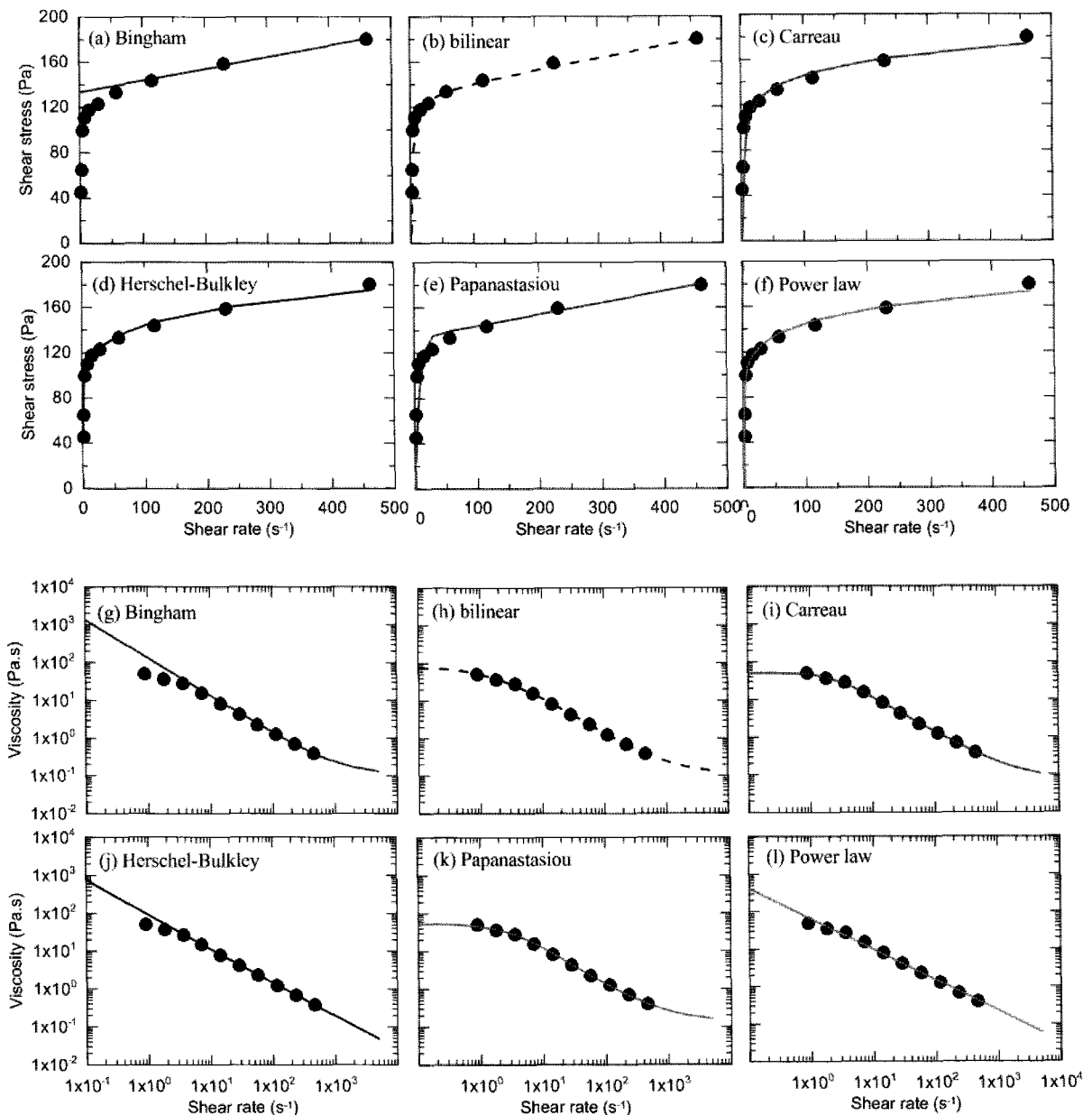


Fig. 4. Fitting rheological models to the data obtained from the Mediterranean Sea samples in linear plot of shear stress and shear rate and log-log plot of viscosity and shear rate. The Bingham, bilinear, Carreau, Herschel-Bulkley, Papanastasiou, and Power law model are used.

지수(flow behavior index) ‘ n ’에 의해 유체거동을 설명하고자 한다. 예를 들어, $n < 1$ 인 경우, 유체는 전단담화 거동(폴리머, 페인트 등)을, $n > 1$ 인 경우, 유체는 전단농화 거동(굴착이수, 킥 샌드 등)을 보이는 것으로 알려져 있다. 따라서 세립토의 경우 얻어진 n 값은 대부분 1 보다 적은 값이다(Jeong 등, 2010). 이들 유동모델들은 지중해 해저점토 시료의 전단응력과 전단변형률속도 간의 관계에 대한 적합도가 가장 탁월한 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 5(h, I, k)에서 보이듯, 실트질 광미의 경우, 그 차이가 확연히 크게 나타난다. 이러한 결과는 앞서 언급된 것처럼, 실트질 광미의 유동특성이 일라이트 위

주의 세립토에서 볼 수 있는 전단담화 보다는 Bingham 유체에 훨씬 더 가깝게 나타나기 때문이다.

Herschel-Bulkley 모델은 Bingham 유체와 더불어 세립토의 유동성 평가에 가장 많이 활용되고 있는 모델이다(Malet 등, 2003). Herschel-Bulkley 모델은 항복응력을 가진다는 점에서 Bingham 유체와 비슷하지만, 항복응력을 구하는 방법에서 다소 차이가 있다(Cousot와 Piau, 1994). 항복응력은 유동곡선의 대수그래프 상에서 y -절편값을 가지므로 다른 유동모델들과 비교해 아주 작은 항복응력값을 가진다. 또한 가해지는 전단변형률속도의 함수로 얻어진 전단응력이 민감히 반응하므로

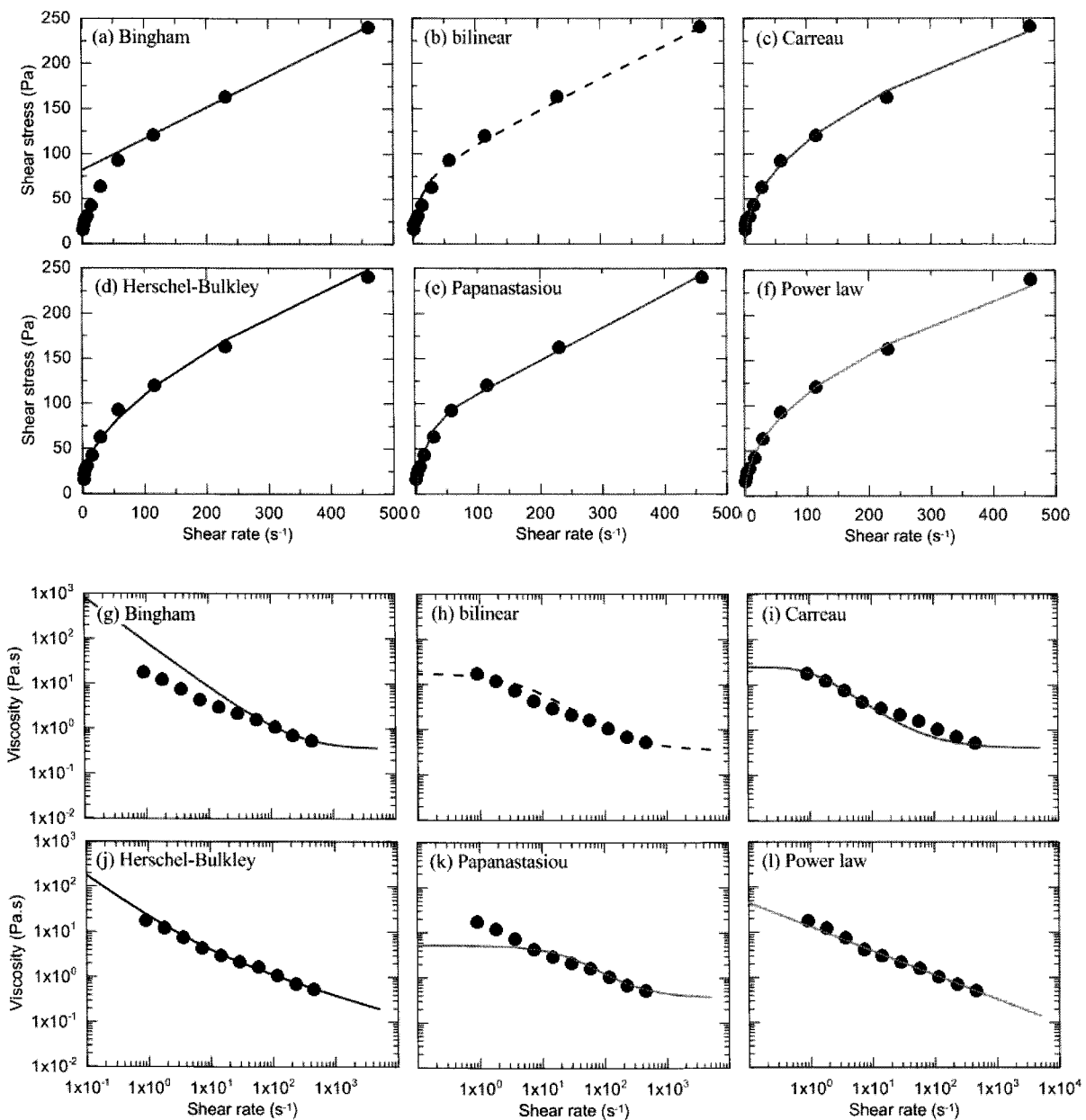


Fig. 5. Fitting rheological models to the data obtained from iron tailing samples in linear plot of shear stress and shear rate and log-log plot of viscosity and shear rate. The Bingham, bilinear, Carreau, Herschel-Bulkley, Papanastasiou, and Power law model are used.

‘변형률속도 의존적인 토질거동(Leroueil, 2006)’이란 측면에서 향후 연구되어야 할 부분이기도 하다. 이런 이유에도 불구하고 세립토의 유동특성에 대해 여전히 손쉽게 흐름특성을 살펴볼 수 있는 매우 효과적인 모델이다. 특히 유동지수 ‘ n ’을 통해 유동특성을 설명할 수 있고 다양한 천연 및 산업용 재료들에 대해 유변학적 해석이 가능하다는 장점을 가진다.

역수법칙 모델의 적용성은 Herschel-Bulkley 모델의 적합도와 비슷한 결과를 보이며(Fig. 4f, 4l과 Fig. 5f, 5l), 점도와 전단변형률속도와의 관계에서 보이듯, 주어진 전단변형률속도에 대해 선형적 거동으로 설명된다. 따라서 상대적으로 낮은(항복 전) 전단변형률속도에서의 유체거동과 상대적으로 높은(항복 후) 전단변형률속도에서의 유체거동을 표현하는데 한계점을 가진다. 역수법칙 모델의 가장 큰 단점은 이 모델이 세립토가 가지는 항복응력을 표현할 수 없다는 것이다. 이것은 ‘토석류의 유동성 해석’이라는 측면에서 본다면 토석류의 최대 이동거리를 예측하기 어렵다는 말과 같다.

천연재료나 산업용 재료들의 유변학적 특성을 표현할 수 있는 모델들 가운데 Bingham과 Herschel-Bulkley 유동모델은 세립토의 특성 및 거동을 조사하기에 적합한 것으로 판단되며, 토석류의 유동성 평가(이동거리와 유동토체의 속도)에도 활용된다(Locat, 1997; Malet 등, 2003; Jeong, 2010). 유동성 평가를 위해 활용할 기초적인 유변학적 매개변수로서 가장 많이 사용되는 것은(겉보기 또는 Bingham) 항복응력과 소성점도 등이다(Table 2). 이들 값들은 물리화학적 인자들에 의해 크게 영향을 받는다. 이런 이유로 세립토의 유변학적 특성은 광물학적 특성 및 입자크기의 함수로서 표현된다. Malet 등(2003)이 발표한 프랑스 남부 지방에서 발생한 산사태의 유동성과 Jeong(2006)이 발표한 해저산사태의 유동성은 자연환경적 조건의 차이에도 불구하고 세립토의 유변학적 특성에 의해 크게 영향을 받는 것으로 소개되었다. 이런 점들을 고려해 볼 때 토석류의 세립토 함량이 많을 경우, 광물학적 기원과 입자크기를 달리하는 세립토에 대한 체계적인 유변학적 연구가 필요하며 이것은 향후 도전해야 할 새로운 연구과제로 남겨둔다.

5.3 액성지수, 항복응력, 소성점도와 의사뉴턴점도 간 상관관계

점토질(지중해 해저점토)과 실트질(광미) 위주로 구성

된 재료들에 대해 입자크기 효과라는 측면에서 유변학적 특성들을 알아보려고 한다. Fig. 6은 앞서 소개된 6가지 유변학적 특성모델들 가운데 항복응력과 소성점도를 나타내는 Bingham 유체(이중선형 모델에서 얻어진 결과치와 유사한 값을 가진다)에서 얻어진 값들로 이들의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 6(a)는 항복응력(τ_c , Pa)과 소성점도(η_h , mPa·s), Fig. 6(b)는 액성지수(I_L)와 소성점도, Fig. 6(c)는 액성지수와 항복응력, 그리고 Fig. 6(d)는 액성지수와 의사뉴턴점도(η_b , mPa·s)와의 상관관계를 나타낸 것이다. 얻어진 유변학적 매개변수(항복응력, 소성점도)와 액성지수간의 상관관계들은 Locat(1997)에 의해 소개되었던 캐나다 예민점토(Canadian sensitive clays)에서 얻어진 경험적 관계식들과 비교분석되었다. 그림에서 보이는 점선과 음영부분은 Jeong(2010)에 의해 발표된 연구결과를 토대로 세립토의 유변학적 특성을 입자크기에 따라 한계범위까지 표시한 영역이다. Fig. 6(a)의 경우, 지중해 해저점토는 Locat(1997)가 제시한 캐나다 예민점토의 결과와 거의 유사한 결과를 얻을 수 있었으나(경험적 관계식, $\eta_h = 0.52 \cdot \tau_c^{1.1}$), 실트질 광미의 경우 동일 항복응력하에서 대략 10배에 달하는 소성점도의 차이를 보인다. 이것은 앞서 보인 바와 같이 실트질 또는 모래질을 다량함유한 유동토체의 경우 그들이 가진 유동곡선이 전단담화 보다는 Bingham 유체에 훨씬 더 가깝게 표현되기 때문이다. 실트질 광미의 경우, 점토의 상부경계영역 근처에 위치하며, 점토질의 유동특성과 평행을 이루게 된다. Fig. 6(b)는 액성지수와 점도와의 관계로써, 점선은 이들 세립토의 유변학적 특성을 표시한 영역이며, 점토질(캐나다 예민점토와 지중해 해저점토를 포함)과 실트질 모두 점선의 영역에 포함되는 것을 알 수 있다. 지중해 해저점토의 경우 소성점도는 $\eta_h = (6.9/I_L)^{4.3}$ 의 관계식으로 표현된다. 하지만, 대략 소성점도가 100mPa·s($I_L = 2.5$)인 곳을 중심으로 일치치를 보이는 반면, 이 점을 기준으로 작거나 큰 값에 대해 캐나다 예민점토, 지중해 해저점토, 그리고 실트질 광미사이에 미세한 유동특성의 차이를 가진다. 예를 들어 동일 액성상태(그림상에서는 표기할 수 없으나 $I_L = 1$ 일 때) 하에서 소성점도는 실트질 광미>지중해 해저점토>캐나다 예민점토 순으로 나타난다. 이러한 결과는 실트질로 갈수록 Bingham 유체거동이 뚜렷하게 관측되기 때문이다. 마찬가지로 이유로 높은 액성상태에서는 실트질 광미<지중해 해저점토<캐나다 예민점토 순으로 나타난다. Fig. 6(c)는 액성지수와 항복응력간의 상관관

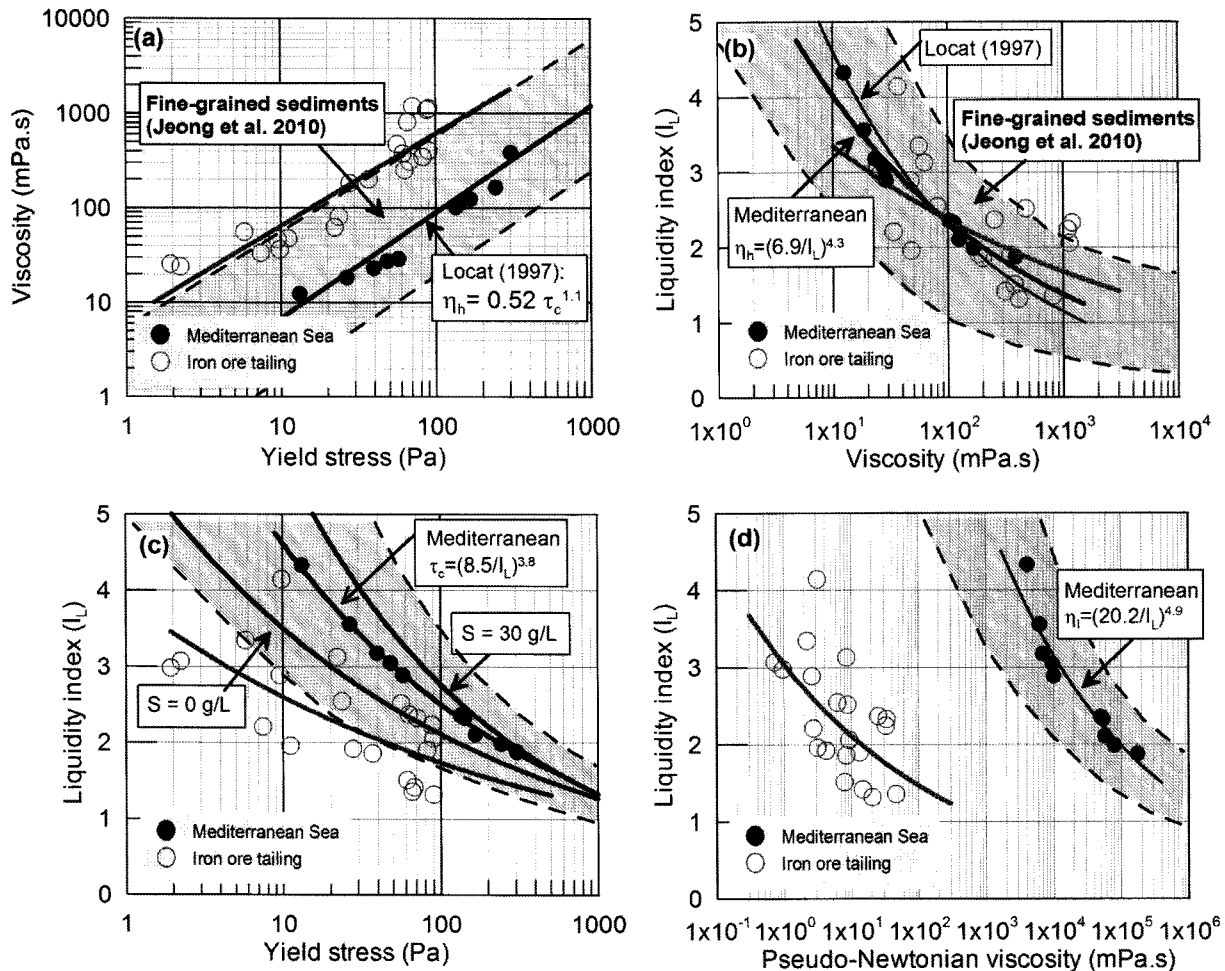


Fig. 6. Relationships among liquidity index and rheological properties (yield stress, viscosity, and pseudo-Newtonian viscosity): (a) yield stress-viscosity, (b) liquidity index-viscosity, (c) liquidity index-yield stress (salinity effect), and (d) liquidity index-pseudo-Newtonian viscosity.

계를 보인 것으로, 이들의 유동특성은 염분농도(salinity)에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 염분농도 $S = 0\text{g/L}$ 와 $S = 30\text{g/L}$ 에 대해 각각 캐나다 예민점도에 얻어진 경험적 상관관계를 표시하였으며 지중해 해저점토의 경우($S = 29\text{g/L}$) 두 염분농도 영역 사이에 위치하게 되고($\tau_c = (8.5/I_L)^{3.8}$) 이들 모두는 제시된 세립토의 유변학적 특성영역 내에 상주하게 된다. 반면, 실트질 광미의 경우, 유변학적 특성영역 하부 경계면에 인접해 위치하나, 산만한 분포를 보이고 있다. 이것은 항복응력을 결정할 때(실트질 광미가 점토질 재료들에 비해 Bingham 유체에 훨씬 더 가깝게 표현되기는 하지만), 전단담화와 Bingham 유체 중간쯤의 유동특성을 가진 재료들의 결과에 기인한 것으로 사료된다. Fig. 6(d)는 항복 전 전단 변형률속도에 대한 전단응력의 결과값으로 의사뉴턴점도로 명명하였으며, 점선은 세립토의 유동특성모델이며, 지중해 해저점토의 결과($\eta_1 = (20.2/I_L)^{4.9}$)를 나타낸 것이

다. 비록 두 세립토들에 대해 액성상태에 따른 의사뉴턴 점도의 경향성이 비슷하기는 하지만, 앞서 언급된 것과 동일한 이유로 점토질과 실트질 재료들 사이에 큰 차이를 보인다. 예를 들어, 액성지수가 2일 경우, 항복전 점도($\text{mPa}\cdot\text{s}$)는 크게 10^4 의 차이를 가진다.

5.4 고찰

세립토를 대상으로 하여 얻어진 유변학적 매개변수들은 지상 및 해저 산사태의 파괴후 과정에 해당하는 토석류의 이동성과 직접적인 연관성을 가진다. Imran 등(2001)은 사면파괴관련 유동토체를 삼각형, 사각형 또는 포물선형의 서로 다른 기하학적 특성을 고려하고 Bingham, 이중선형 및 Herschel-Bulkley 모델을 사용하여 다차원 토석류 수치해석을 수행하였다. 그 결과 토석류의 흐름을 가장 잘 묘사하는 것은 포물선 형태로 구성된 유동토

체였으나, 서로 다른 기하학적 특성을 고려했음에도 불구하고 토석류의 유동성은 항복응력, 의사뉴턴점도, 소성점도 및 유동지수 등에 의해 영향을 받는 것으로 조사되었다. 그 중에서도 항복응력과 소성점도는 토석류의 이동성에 직접적인 영향을 미치고 퇴적형상에 영향을 미치는 것으로 알려졌다(Locat 등, 2004). 따라서 유동화된 토체의 항복응력과 소성점도를 결정할 수 있다는 것은 자연사면의 파괴후 토석류의 흐름특성과 퇴적특성을 예측할 수 있다는 결론에 다다른다. 본 연구에서 보였듯, 점토질 및 실트질 다량함유한 세립토의 경우 항복응력과 소성점도는 액성지수와 상관관계를 가진다. 이 결과는 캐나다 예민점토의 결과와 거의 유사한 거동특성을 보인다(Locat와 Demers, 1988; Locat, 1997; Jeong, 2006). 지상 및 해저에서 발생가능한 토석류의 유동성을 조사하기 위한 초기 단계로 지반공학적·유변학적 특성들의 상관관계를 정의할 필요가 있다. 항복응력과 소성점도 간의 상관관계를 직접적으로 얻지 못할 경우 플콘시험기를 통한 액성지수 또는 액성지수-재성형 비배수 전단강도 상관관계(I_L-C_{ur} 관계식, Leroueil 등, 1983; Locat, 1997; Jeong 등, 2010)를 통해 유동성 평가를 적절히 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서 산사태 발생 전후 초기 지질재해 대응공법을 찾는 데 도움을 줄 수 있으며, 이동성 예측을 통한 국가방재사업에 필요한 최적관리 기법에 자료를 제공하거나 자연재해 경감을 위한 안정대책을 확립하기 위한 연구자료로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론

본 연구에서는 점토질과 실트질을 다량 함유한 세립토의 유동특성과 토석류의 흐름특성에 대한 유변학적 모델들의 적용성에 대해 수행된 연구과제이며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 지중해 해저점토 및 실트질 광미에서 얻어진 세립토의 유동곡선 및 특성을 조사하기 위해 유변학적 모델들을 사용하여 비교분석하였다. 세립토의 유동특성은 전단강도-전단변형률속도 및 점도-전단변형률속도 간의 상관관계를 통해 확인할 수 있다. 실험 결과에 따르면, 주어진 두 시료들의 입자크기의 차이로 인해 유동특성은 차이를 보인다. 점토질 시료들은 전단담화 또는 Bingham 유체거동에 가깝게 나

타나며, 실트질 광미의 경우 전단변형률속도가 커질수록 완전소성형태인 Bingham 유체거동에 가까워진다.

- (2) 세립토의 유동성을 알기 위해서는 Bingham(또는 이중선형)과 Herschel-Bulkley 유동모델에서 얻은 항복응력과 소성점도 값 등이 필요하다. 점토질이 풍부할수록 Bingham과 이중선형 모델에서 얻어진 값들과 비슷한 값을 가진다. 이럴 경우 이중선형 모델에서 얻은 겉보기 항복응력을 대신하여 Bingham 항복응력 값을 사용한다. 항복응력과 점도 간의 상관관계에 의하면, 해저점토의 경우 캐나다 예민점토에서 얻어진 경험적 관계식과 큰 차이가 없는 것으로 나타난다. 다만, 완전소성 거동을 보이는 광미의 경우 동일한 점도에 대해 대략 10배 정도 적은 항복응력을 가지는 것으로 조사되었다. 항복 전의 유체거동은 이중선형 모델을 통한 의사뉴턴점도 값을 통해 효과적으로 표현할 수 있다. 이와 같은 상대적으로 낮은 전단변형률속도에서의 점도의 변화는 아주 느리게 움직이는 사면의 활동과 관련된다.
- (3) 토석류의 이동성(유동화된 토체들의 최대 유동거리와 속도)을 결정하는 중요한 유변학적 매개변수들은 항복응력과 소성점도이다. 토석류의 유동성을 평가하기 위한 입력변수들(재성형시료의 비배수 전단강도, 항복응력과 소성점도)이 필요할 경우 간편한 유동 구성모델에 의한 경험적 관계식을 활용할 수 있다. 토석류의 유동성은 액성상태에 따라 달라지므로 액성지수의 함수로 나타낼 수 있다. 입자크기를 달리하는 점토질과 실트질 세립토는 지수함수와 유변학적 매개변수들의 상관관계를 활용하여 토석류의 유동성 해석에 필요한 기본 입력변수로 활용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 “급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발에 관한 연구(11-3411)” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 본 연구에 활용된 자료들은 캐나다 해저 산사태 프로젝트 COSTA-Canada(2001-2006)의 연구내용의 일부분이며, 이에 깊은 감사를 드립니다. 본 연구가 있기에 도움을 주신 Jacques Locat 교수님과 Serge Leroueil 교수님께 진심으로 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Barnes, H.A. (1999), "The yield stress—a review or 'π_{AVT} ρ_{EV}'—everything flows?", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol.81, pp.133-178.
2. Coussot, P., Nguyen, G.D., Huynh, H.T., and Bonn, D. (2002), "Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids", *J. Rheol.*, Vol.46, pp.573-589.
3. Coussot, P., and Piau, J.-M. (1994), "On the behavior of fine mud suspensions", *Rheol. Acta.*, Vol.33, pp.175-184.
4. Coussot, P. (2007), The mechanics of yield stress fluids: similarities, specificities and open questions, 16th Australasian Fluid Mech. Conf., Crown Plaza, Gold Coast, Australia, pp.54-58.
5. Imran, J., Parker, G., Locat, J., and Lee, H. (2001), "1D numerical model of muddy subaqueous and subaerial debris flows", *J. Hydr. Eng.*, Vol.127, pp.959-968.
6. Jeong, S.W. (2006), *Influence of physico-chemical characteristics of fine-grained sediments on their rheological behavior*, PhD Thesis, Laval University, Quebec, Canada.
7. Jeong, S.W., Leroueil, S. and Locat, J. (2009), "Applicability of power law for describing the rheology of soils of different origins and characteristics", *Can. Geotech. J.*, Vol.46, pp.1011-1023.
8. Jeong, S.W., Locat, J., Leroueil, S., and Malet, J.-P. (2010), "Rheological properties of fine-grained sediments: the roles of texture and mineralogy", *Can. Geotech. J.*, Vol.47, pp.1085-1100.
9. Jeong, S.W. (2010), "Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows", *Geosciences J.*, Vol.14, pp.359-369.
10. Lastras, G., Canals M., Urgeles R., Amblas D., Ivanov M., Droz L., Dennielou B., Fabres J., Schoolmeester, T., Akhmetzhanov, A., Orange, D., and Garcia-Garcia, A. (2007), "A walk down the Cap de Creus canyon, Northwestern Mediterranean Sea: Recent processes inferred from morphology and sediment bedforms", *Mar. Geol.*, Vol.246, pp.176-192.
11. Leroueil, S. (2006), The Isotache Approach. Where are we 50 years after its development by Professor Šuklje? 2006 Prof. Šuklje's Memorial Lecture, *Proceedings of the XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering, Ljubljana, Slovenia, 29-31 May 2006*. Slovenian Geotechnical Society, Ljubljana, Slovenia, Vol.1, pp.55-88.
12. Locat, J., and Demers, D. (1988), "Viscosity, yield stress, remoulded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays", *Can. Geotech. J.*, Vol.25, pp.709-806.
13. 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.
14. 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", *Mar. Geol.*, Vol.203, pp.269-280.
15. 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.
16. 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.
17. Papanastasiou, T.C. (1987), "Flows of materials with yield", *J. Rheol.*, Vol.31, pp.385-404.
18. Sansoucy, M., Locat, J., Lee, H., Orange, D., and Jeong, S.W. (2005), "Preliminary analysis of the geotechnical and rheological properties of Capde Creus sediments with some consideration on slope in stability issues", *Joint EUROSTRATA FORM, Annual Meeting, Salamanca, 24-27 Oct., 2005*.
19. Turmel, D., Locat, J., Cauchon-Voyer, G., Lavoie, C., Simpkin, P., Parker, G., and Lauzière, P. (2010), "Morphodynamic and Slope Instability Observations at Wabush Lake, Labrador", *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, Advances in Natural and Technological Hazards Research, 2010, Volume 28, II, pp.435-446.
20. Torrance, J.K. (1987), "Shear resistance of remoulded soils by viscometric and fall-cone methods: a comparison for the Canadian sensitive marine clays", *Can. Geotech. J.*, Vol.24, pp.318-322.

(접수일자 2011. 4. 29, 심사완료일 2011. 6. 23)