

세립토의 모래함량에 따른 유변학적 특성 분석

강효섭* · 김윤태**

Kang, Hyo-Sub*, Kim, Yun-Tae**

Rheological Characteristics of Fine-Grained Soil with Sand Content

ABSTRACT

Rheological properties such as yield stress and viscosity is the main parameters to determine the fluidity of the debris flow. In this study, several series of rheometer tests were performed to investigate rheological properties of fine-grained soil samples with various sand contents and various liquidity indices. Test results indicated that the general shape of the flow curves for fine-grained soils had characteristics of a shear thinning fluid, with a decrease in viscosity as shear rate increases. The yield stress and viscosity of fine-grained soil samples with same sand content gradually decreased as the liquidity index increased. At the same liquidity index, yield stress and viscosity of fine-grained soil increased with an increase in sand content. The yield stress and viscosity of fine-grained soil greatly decreased with a slight increase in water content. Also, the yield stress and viscosity tend to increase with increasing concentration by volume(C_v) of the fluid matrix. The values of the four coefficients a_1 , a_2 , β_1 , and β_2 were obtained by regression analysis for each fine-grained soil.

Key words : Rheometer, Rheological characteristics, Rheological model, Kaolinite, Weathered soil

초 록

항복응력, 점성과 같은 유변학적 특성은 토석류의 유변성을 결정하는 주요 매개변수이다. 본 연구에서는 다양한 액성지수와 모래함량을 가지는 세립토를 대상으로 유변측정 시험을 수행하였다. 이를 통해 전단응력-전단변형률속도 관계, 액성지수와 점성 및 항복응력 관계, 체적농도와 점성 및 항복응력 관계 등과 같은 다양한 분석을 통해 모래함량을 달리하는 흙에 대한 유변학적 특성을 파악하였다. 유변측정 시험 결과로부터 세립토의 유동곡선 특성은 전단변형률속도가 점차 커짐에 따라 곡선의 기울기가 감소하는 전형적인 전단담화(shear thinning)의 거동 형태를 나타낼 수 있다. 동일한 모래함량을 갖는 시료에서 액성지수가 증가함에 따라 항복응력과 점성은 감소하는 경향을 보이며, 동일 액성지수 상태에서 모래함량이 커짐에 따라 항복응력과 점성 모두 증가하는 것으로 나타났다. 항복응력과 점성은 약간의 함수비 증가에도 크게 감소함을 알 수 있다. 체적농도(C_v)가 증가함에 따라 항복응력과 점성은 증가하는 경향을 나타낸다. 회귀분석을 통해 임의의 체적농도(C_v)에 대한 항복응력과 점성의 계수 a_1 , a_2 , β_1 , β_2 를 산정하였다.

검색어 : 레오메터, 유변학적 특성, 유동모델, 카오리나이트, 풍화토

1. 서론

토석류의 흐름특성에 관한 유변학적 접근에 대한 연구는 주로 국외 연구자들에 의해서 연구되었다. 특히 O'Brien과 Julien(1988)은 실내 유변측정시험을 수행하여 체적농도에 따른 실트와 점토의 항복응력과 점성과 같은 유변학적 특성에 대한 연구를 수행하였고,

* 부경대학교 해양공학과, 박사과정 (monkle0@hanmail.net)

** 정회원·교신저자·부경대학교 해양공학과, 교수 (Corresponding Author · Pukyong National University · yuntkim@pknu.ac.kr)

Received November 20, 2012/ revised June 13, 2013/ accepted July 17, 2013

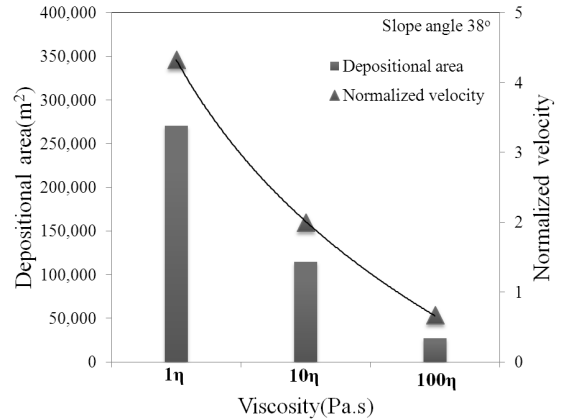
O'Brien et al.(1993)은 토석류의 2차원 시뮬레이션에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Locat과 Demers(1988)는 액성지수에 따른 민감한 점토의 점성, 항복응력 및 재성형 전단강도와 같은 유변학적 특성에 대한 연구를 수행하였다. 국내에서는 산사태 발생지역에 대한 유변물성 분석과 수치해석을 이용한 이동해석 분석(Kim and Seo, 1997a, 1997b), 점토질과 실트질을 다량 함유한 세립토의 유변특성에 대한 유변학적 모델의 적용성에 대한 연구(Jeong, 2011) 등이 수행되었다. 함수비에 따라 흙은 여러 가지 상태로 존재하며, 흙이 함유한 물의 양이 많을수록 입자간의 상호작용은 작아진다. 따라서 흙이 함유한 물의 양이 많을수록 더 액체처럼 거동한다. 흙의 종류와 구성성분, 흙의 농도에 따라 점성과 항복응력 등과 같은 유변학적 특성은 크게 다르다(O'Brien and Julien, 1988; Ilstad et al., 2004; Jeong, 2010; Jeong, 2011; Kim, 1995).

토석류의 거동은 현장의 수리 및 역학적 특성, 흐르는 동안의 물의 유입과 침식으로 인해 계속적으로 변하는 유동체의 유변학적 특성, 이동경로의 지형학적 특성 등과 같은 여러 요인들에 복합적으로 의존하기 때문에 정확한 메카니즘을 규명하는데 어려움이 있다 (Malet et al., 2005).

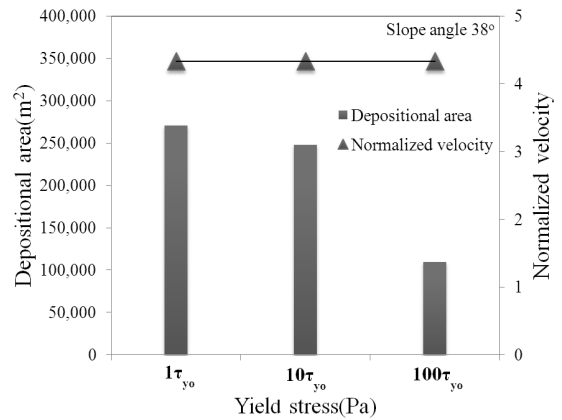
최근 우리나라에서 국지적인 집중호우로 인해 토석류 발생이 급격히 증가하고 있으며, 이로 인한 재해 및 인명피해가 자주 발생되고 있다. 토석류의 이동속도, 이동거리 및 이로 인한 피해범위, 피해규모는 토석류의 점성, 항복응력 등과 같은 유변학적 특성에 크게 의존하기 때문에 토석류의 흐름특성 및 유변학적 특성에 대한 연구는 매우 중요하다. 그러나 국내의 토석류의 흐름특성 및 유변학적 특성에 대한 연구 수준은 아직 초보적인 단계에 머물러 있다. 따라서 본 연구에서는 토석류 거동 메카니즘을 규명하기 위해 필요한 국내지반의 유변물성을 분석하고자 하였으며, 유변물성에 대한 데이터 베이스를 구축하기 위하여 흙의 특성과 입도특성에 따른 유변물성 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위해 다양한 모래함량을 갖는 시료를 대상으로 전단응력-전단변형률속도 관계, 액성지수와 점성 및 항복응력 관계, 항복응력과 점성 관계, 체적농도와 점성 및 항복응력 관계 등과 같은 다양한 분석을 수행하였다.

2. 연구 배경

토석류 이동속도와 이동거리는 토석류의 점성과 항복응력에 의해 영향을 받는다(Jeong, 2011; Lee and Kim, 2013). Fig. 1은 토석류의 점성과 항복응력에 따른 이동속도와 퇴적면적을 나타낸다. 점성이 증가함에 따라 이동속도와 퇴적면적은 비선형적으로 감소한다. 점성과 토석류의 이동속도, 이동거리 및 퇴적면적이 서로 반비례적인 결과를 보이는 것으로 보아 점성은 토석류의 이동 특성과 퇴적 특성에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 항복응력은



(a) Depositional Area and Velocity of Debris Flow According to Viscosity



(b) Depositional Area and Velocity of Debris Flow According to Yield Stress

Fig. 1. Movement and Deposition Characteristics of Debris Flow (Lee and Kim, 2013)

토석류의 발생과 정지에 영향을 미치는 요인으로 토석류의 이동속도는 항복응력에 크게 의존하지 않는다. 항복응력이 증가함에 따라 퇴적거리, 퇴적 폭, 퇴적면적은 작아진다(Lee and Kim, 2013). 따라서 토석류의 거동특성은 토석류의 유변물성(항복응력, 점성)과 밀접한 관계를 갖고 있음을 알 수 있다. 실험을 통해 얻어진 유변물성을 토대로 토석류 재해 지역의 역해석을 수행하는데 활용할 수 있다. 또한 토석류 발생 위험지역에 대한 피해정도 및 범위를 예측하는데도 활용할 수 있다.

3. 재료 및 시험 방법

3.1 세립토 특성

본 연구에서는 세립토의 모래함량에 따른 유변학적 물성을 파악하기 위해 점토(카오리나이트)에 화강풍화토를 혼합하여 다양한 모래함량을 가지는 시료를 Table 1과 같이 만들었다. 화강풍화토는

Table 1. Properties of Soil Samples

Soil sample		S0	S5	S10	S15
Specific gravity(G_s)		2.77	2.73	2.68	2.67
Atterberg limits	Liquid limit(LL)	49.6	43.7	38.9	33.3
	Plastic limit(PL)	35.5	33.7	30.8	28.7
	Plasticity index(PI)	14.1	10.0	8.1	4.6
Characteristic of particle size	Clay content(%), $<2\mu m$	17	14	12	6
	Silt content(%), $2 \sim 75\mu m$	83	81	78	79
	Sand content(%), $>75\mu m$	0	5	10	15
	Average particle size(D_{50} , mm)	0.006539	0.01627	0.02275	0.03152
USCS		ML			

Table 2. Test Condition

Soil sample	Sand content(%)											
	0			5			10			15		
Liquidity index(LI)	5.0	6.2	8.3	4.0	5.0	6.0	8.0	5.0	5.9	7.9	8.0	9.3
Water content(%)	105.8	123.5	153.1	74.0	83.8	93.5	113.5	71.1	78.5	94.4	66.0	72.0

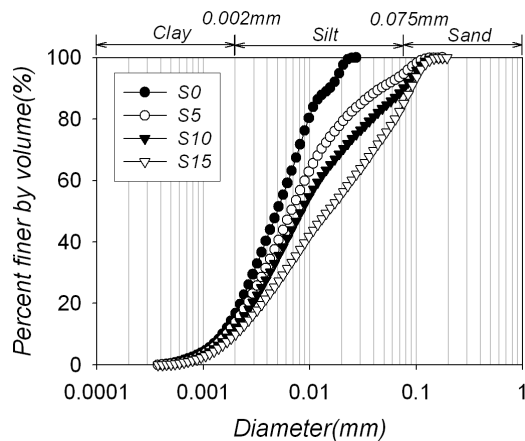


Fig. 2. Particle-size Distribution Curves of Fine-grained Soils with Various sand Contents

모래와 실트를 많이 함유하고 있다. 모래함량에 따라 시험시료는 S0, S5, S10 및 S15로 구분하였으며, 각각의 시료에 대한 모래함량은 0, 5, 10 및 15%이다.

Table 1은 다양한 모래함량을 가지는 세립토의 기본적인 지반공학학적 물성을 나타낸다. 또한 애트버그 한계시험을 수행하여 얻은 액성한계, 소성한계 및 소성지수의 결과를 나타내고 있다. 세립토의 모래함량이 증가할수록 액성한계, 소성한계 및 소성지수는 모두 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 모래함량이 증가할수록 적은 함수비로 액체상태가 될 수 있음을 의미한다. 즉, 토질의 입도특성과 함수비는 유변특성에 영향을 주고 있음을 의미한다. 비중시험을

통해 얻어진 세립토 시료의 비중은 2.67에서 2.77의 범위를 갖는다.

Fig. 2는 시료에 대한 입도분포 곡선을 나타내고 있다. 입도분석은 산란현상 중 회절원리를 이용하여 입도크기를 측정하는 레이저 입도분포시험기(Laser Particle Size Analyser, Beckman Coulter)를 이용하였다. 입도분포시험을 통해 S0 시료의 경우 점토와 실트만 구성되어 있는 세립토이며, 입자크기는 0.0004mm~ 0.0274mm임을 알 수 있다. S15의 경우 모래함량이 약 15%로서 입자크기는 0.0004mm~0.12mm의 범위를 나타내고 있다. 시료의 평균 입경(D_{50})은 0.00654mm에서 0.0315mm로서 모래함량이 많아짐에 따라 평균입경이 크음을 알 수 있다.

3.2 시험조건 및 방법

모래함량과 함수비가 세립토의 유변학적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해 Table 2와 같이 다양한 모래함량(0, 5, 10, 15%)을 가지는 세립토를 조성한 후에 다양한 액성지수(LI=4~12)를 가지도록 시료를 조성하여 유변측정 시험을 수행하였다. 모래함량이 커짐에 따라 동일 액성지수에 대응하는 함수비가 작아지는 경향을 나타내고 있다. 이는 모래 함량이 큰 시료일수록 액성상태로 변화하기 위해 더 적은 양의 물을 요구하기 때문이다.

다양한 모래함량 및 액성지수(함수비)에 따른 항복응력과 점성과 같은 유변학적 특성을 분석하기 위해 사용된 장비는 TA instrument사의 유변측정기(rheometer)이다. 시험에 사용된 유변측정기의 모식도는 Fig. 3과 같다. 상부 회전판의 지름이 60mm, 2°의 스틸 콘을 갖는 콘-평판으로 구성되어 있다. 회전판의 속도

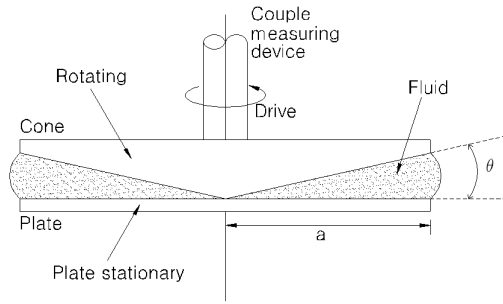


Fig. 3. The Concept of Cone-plate Rheometer

조절을 통해 전단변형률 속도를 제어하며, 단계별로 회전속도를 증감 및 감소시키면서 그때의 전단변형률속도에서의 전단응력을 측정하여 유동곡선을 구할 수 있다. 시험시 온도는 20°C로 일정하게 유지하였다.

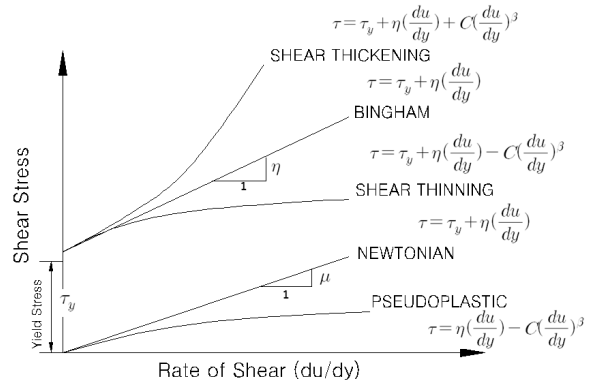
3.3 유동곡선 특성

Fig. 4(a)은 전단응력과 전단변형률속도와의 관계에 대한 5가지 대표적인 유변모델을 나타낸다. 뉴턴유체의 경우 전단변형률속도가 증가함에 따라 전단응력이 비례적으로 증가한다. 반면, Bingham 모델은 임계 항복응력(τ_y)을 넘을 때까지는 흐르지 않다가 항복응력 이후 뉴턴거동 형태를 나타낸다. 그림 4(b)는 점성과 전단변형률 속도 관계를 로그 그래프 형태로 나타낸 것이다. 점성은 전단변형률 속도에 대한 전단응력의 기울기로 정의된다. 뉴턴유체의 경우 전단 변형률속도가 증가함에 따라 전단응력이 비례적으로 증가하므로 점성은 일정한 값을 나타낸다. 또한 전단변형률속도가 증가함에 따라 점성이 감소하는 거동을 의가소성(pseudoplasticity)과 전단 담화(shear thinning)라고 한다. 전단속도가 증가함에 따라 점성이 증가하는 경우도 있다. 이와 같은 거동을 일반적으로 전단농화 (shear thickening)라 한다. 이러한 유동곡선 특성을 토대로 많은 유변학적 모델들이 있으나, 세립토의 유동성 평가에 가장 많이 활용되고 있는 유변학적 모델은 식 1과 2와 같이 Bingham과 Herschel-Bulkley 모델이다(Malt et al., 2003; Jeong, 2011). Herschel-Bulkley 모델은 항복응력항을 포함하며, 비선형성을 잘 표현하는 모델로 평가 받고 있다. 그러나 유동곡선의 y-절편값에 해당되는 항복응력은 낮은 전단변형률 속도에서 다른 유동모델에 비해 아주 작은 항복응력을 나타내는 단점을 가진다.

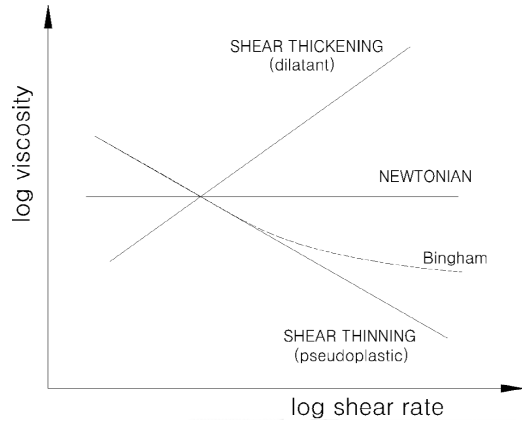
$$\tau = \tau_o + \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$\tau = \tau_o + k \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

여기서, τ =전단응력
 τ_o =항복응력



(a) Relationship Between Shear Stress and Shear Rate



(b) Relationship Between Viscosity and Shear Rate

Fig. 4. Rheological Model(Barnes et al., 1989)

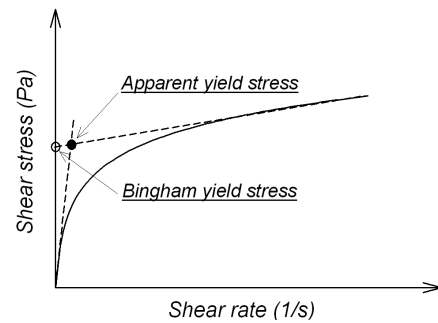


Fig. 5. Concept of Apparent Yield Stress and Bingham Yield Stress (Jeong, 2011)

μ =점성

$\dot{\gamma}$ =전단변형률속도

k =유동지수

따라서 본 연구에서는 Bingham 모델을 이용하여 항복응력과 점성을 산정하였으며, Bingham 모델의 항복응력 산정 개념도는 Fig. 5와 같다. 그림에서 보듯이 유동곡선은 두 점성영역으로 나누

어 설명할 수 있다. 즉 상대적으로 낮은(항복 전) 전단변형률속도에 서의 점성과 상대적으로 높은(항복 후) 전단변형률속도에서의 점성 으로 구분된다. 높은 전단변형률속도의 점성에 대한 y절편 값은 Bingham 항복응력이라 하며, 이들이 만나는 중간의 영역을 걸보기 항복응력이라 한다(Jeong, 2011). 본 연구에서는 Bingham 항복응 력 값을 이용하였으며, 이때의 기울기 즉, 점성 값을 적용하였다.

4. 유동곡선 특성

4.1 전단응력과 전단변형률속도 관계

Fig. 6은 다양한 모래함량과 액성지수에 따른 전단응력-전단변 형률속도 관계를 나타낸다. 전체적으로 작은 전단변형률속도에서 는 전단변형률속도가 증가함에 따라 전단응력은 급격히 증가한다. 전단응력이 항복응력에 도달한 이후, 즉 큰 전단변형률속도에서는 전단변형률속도가 증가함에 따라 전단응력은 서서히 증가하는 경 향을 가진다. 또한 동일한 전단변형률속도에서 액성지수가 증가함 에 따라 전단응력은 감소하는 경향을 나타낸다. 동일한 모래함량을 갖는 시료에서 액성지수가 증가함에 따라 Bingham 모델에 대응하 는 항복응력은 감소하는 경향을 가진다.

4.2 점성과 전단변형률속도 관계

Fig. 7은 다양한 모래함량과 액성지수에 따른 점성-전단변형률 속도 관계를 나타낸다. 점성-전단변형률속도 관계를 나타낸 그래프 의 세로축과 가로축은 로그형태이다. 전체적으로 전단변형률 속도 가 증가함에 따라 점성이 작아지는 전형적인 전단담화(shear thinning)의 거동 형태를 나타낸다. Coussot and Piau(1994), Locat(1997)에 의하면 점토를 다량 함유한 세립토의 경우 일반적으로 전단담화의 거동형태를 보이는 것으로 알려져 있다. 본 연구에 사용된 세립토의 모래함량은 약 0~15% 이내로서 매우 낮다. 따라서 세립토에 대한 전단응력-전단변형률속도 관계는 항복응력 이후 기울기가 감소하는 전단담화의 거동형태를 가짐을 알 수 있다. 동일한 시료, 즉 동일한 모래함량을 갖는 시료에서는 액성지수가 증가함에 따라 점성은 감소하는 경향을 나타낸다.

4.3 모래함량에 따른 유동곡선 특성

Fig. 8은 세립토의 모래함량에 따른 전단응력과 점성의 변화를 살펴보기 위해 액성지수가 8인 동일조건을 가지는 세립토에 대한 전단응력-전단변형률속도 관계와 점성-전단변형률속도 관계를 각 각 나타낸다. 즉, 세립토의 모래함량이 큰 시료일수록 동일 전단변형 률속도에서 전단응력과 점성은 큰 값을 가짐을 확인할 수 있다. 모래함량이 0%인 세립토(S0)와 모래함량이 5%인 시료(S5)의 경 우 전단변형률속도에 따른 전단응력과 점성은 큰 차이를 나타내지

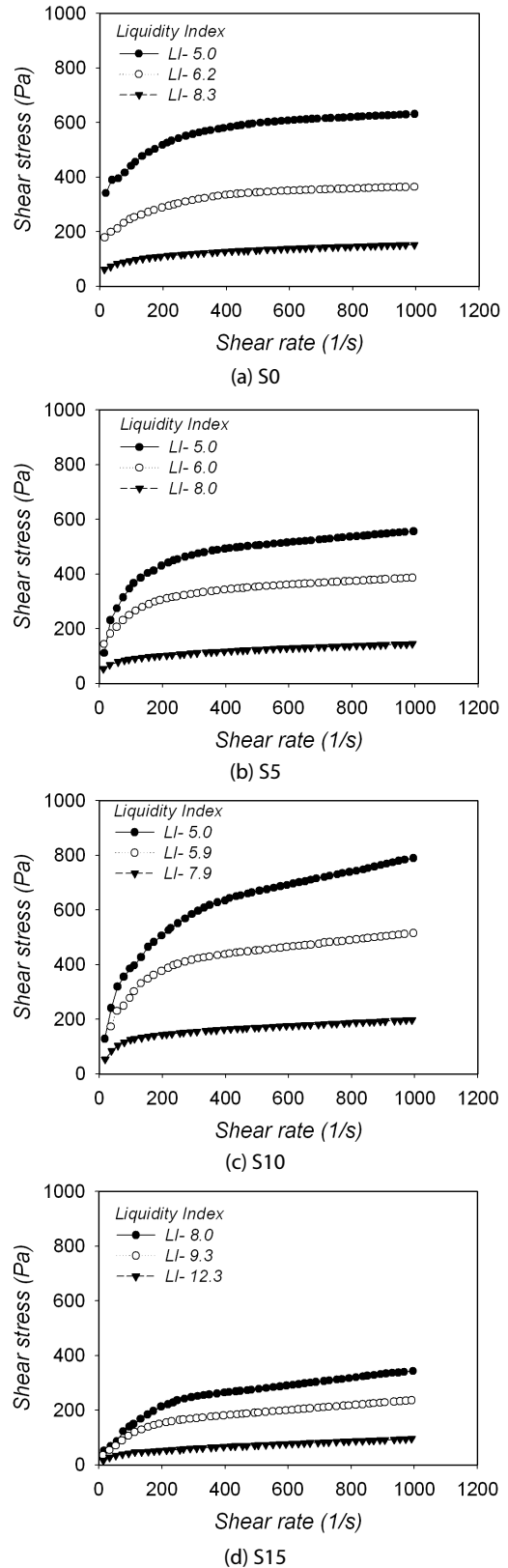


Fig. 6. Relationship Between Shear Stress and Shear Rate

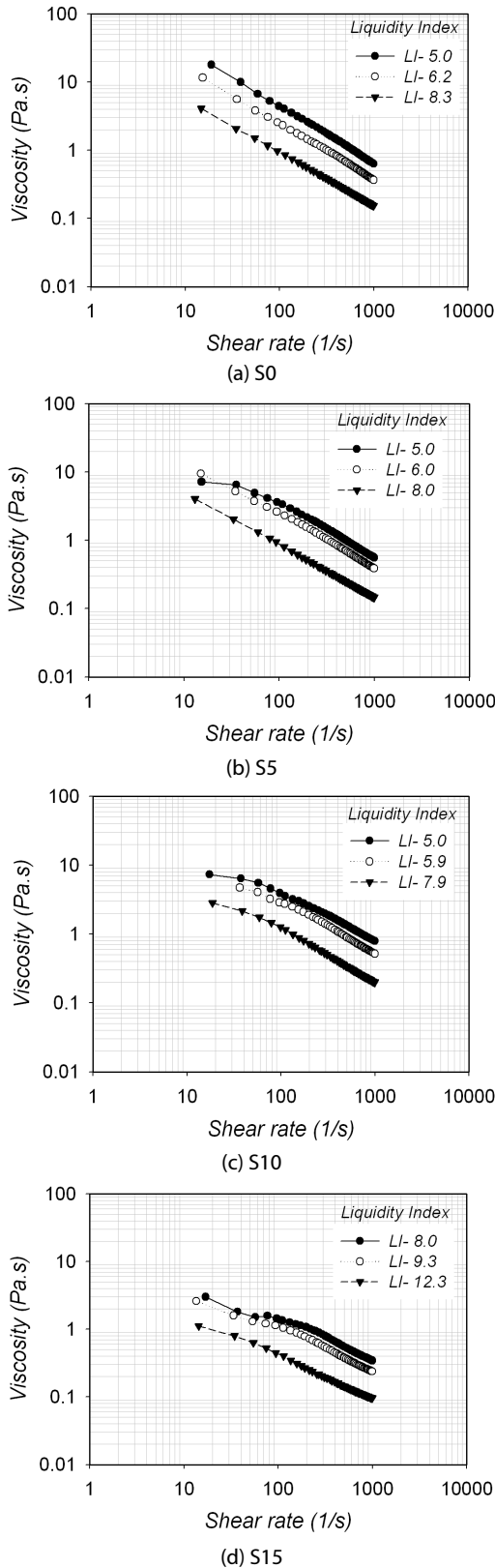


Fig.7. Relationship Between Viscosity and Shear Rate

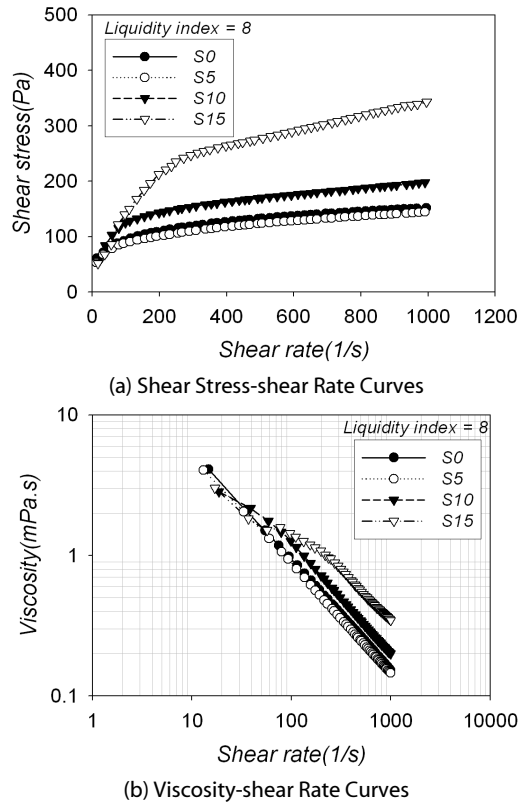


Fig. 8. A Series of Flow Curves Obtained for the Soil Sample with Liquidity Index of 8

않았다. 반면 모래함량이 5, 10, 15%인 시료(S5, S10, S15)의 결과를 살펴보면 모래함량이 증가함에 따라 전단응력과 점성은 증가하는 뚜렷한 경향을 나타낸다. 이와 같이 흙의 항복응력, 점성과 같은 유변물성은 모래함량과 같은 입도특성에 의존함을 알 수 있다. 또한 Fig. 8(a)에서 알 수 있듯이 동일한 액성지수를 가지는 시료의 경우(여기서는 LI=8인 경우) 전단응력이 항복응력에 도달하기 전까지는 기울기가 비슷하다. 이는 Fig. 8(b)에서도 알 수 있듯이 전단변형률속도가 약 10~40(1/s)인 범위에서는 모래함량에 관계없이 점성은 비슷하다. 즉 초기 작은 범위의 전단변형률 속도에서는 모래함량의 변화에도 불구하고 비슷한 크기의 점성을 가진다.

5. 함수비 변화에 따른 항복응력과 점성 특성

다양한 시료조건에 대해 얻어진 유동곡선으로부터 Bingham 모델식을 적용하여 항복응력을 산정하였다. Fig. 9(a)와 (b)는 모래함량과 함수비 변화에 따른 항복응력과 점성의 변화를 각각 나타낸다. Jeong(2010)의 연구에서 나타낸 광미(iron ore tailings) 시료에 대한 결과를 함께 나타내었다. 광미의 액성한계와 소성한계는 각각

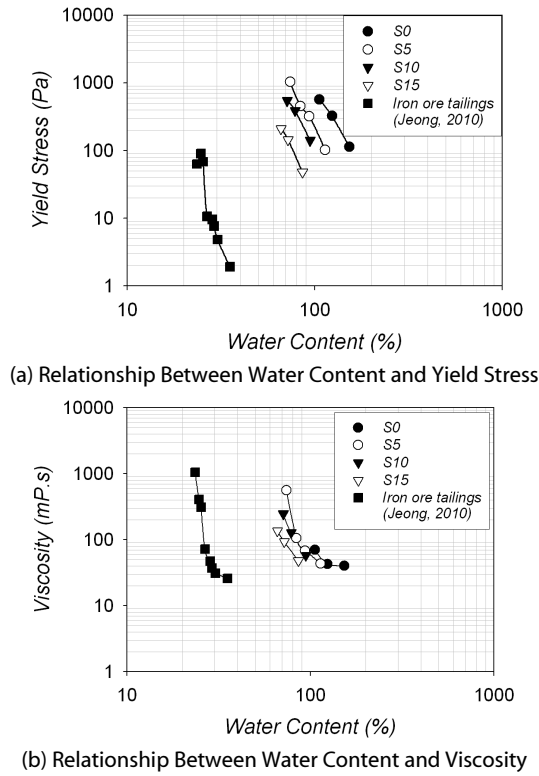


Fig. 9. Characteristic of Yield Stress and Viscosity with Various Water Content

22.6%와 17.6%를 가지며, 모래함량은 약 40%이다. 본 연구에서 사용된 시료에 비해 모래가 많이 함유한 모래질 시료이다. 전체적으로 각각의 시료는 함수비가 약간 증가함에도 불구하고 항복응력과 점성은 크게 감소하는 경향을 나타낸다. 즉, 항복응력과 점성은 함수비와 반비례하는 경향을 각각 나타낸다.

Fig. 9(a)에서 모래함량이 커짐에 따라 동일 항복응력 상태에 대응되는 함수비는 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 동일 항복응력 값을 갖더라도 시료의 특성에 따라 그에 해당되는 함수비 범위가 다를 수 있음을 의미한다. 즉 해당지반의 시료특성에 따라 동일 함수비에서 유변물성은 서로 다른 특성을 보임을 알 수 있다. 또한 Fig. 9(b)에서 함수비가 증가함에 따라 점성 역시 크게 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 모래함량이 커짐에 따라 동일 점성 값에 대응되는 함수비는 증가한다.

6. 체적농도(C_v)와 점성 및 항복응력과의 상관관계

O'Brien and Julien(1988), Malt et al.(2005) 등의 연구자들은 유변측정 분석을 통해 얻어진 항복응력과 점성을 농도개념인 체적농도(C_v)의 관계로 표현하였다. 체적농도는 식 3과 같이 침전물과 물의 부피에 대한 침전물의 부피 비로 표현되며, 간극률의 함수로

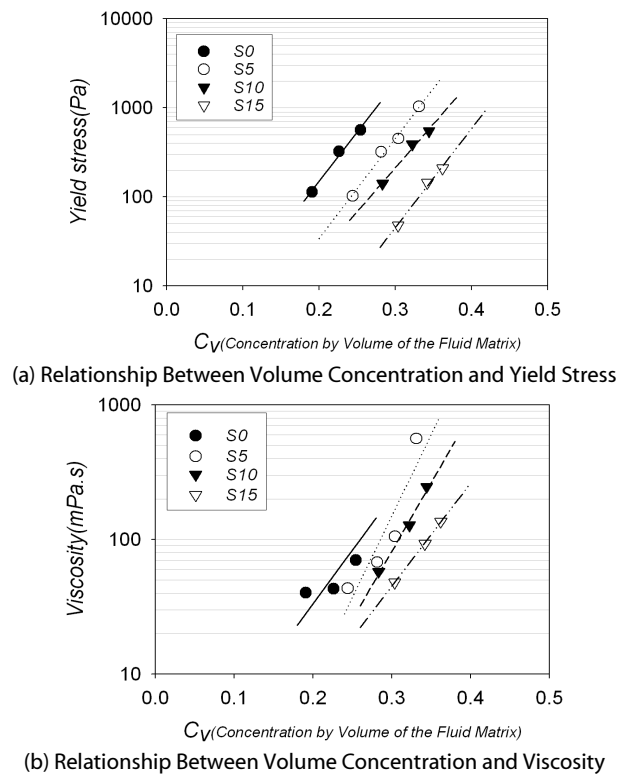


Fig. 10. Characteristic of Yield Stress and Viscosity with Various Volume Concentration

나타낼 수 있다.

$$C_v = \frac{V_{solid}}{V_{solid} + V_{water}} = 1 + \frac{1}{e} \quad (3)$$

여기서, C_v =체적농도

V_{solid} =침전물의 부피

V_{water} =물의 부피

e =간극비

Fig. 10은 유변측정 분석을 통해 얻어진 항복응력과 점성을 체적농도의 관계로 각각 나타낸 그림이다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 체적농도가 증가할수록 항복응력과 점성은 증가하는 경향을 각각 나타내고 있다. 또한 동일한 체적농도에서 모래함량이 많은 시료일수록 항복응력과 점성은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 결과는 5절의 함수비와 항복응력 및 점성의 관계에서 보듯이 동일 함수비에서 모래함량이 증가함에 따라 항복응력과 점성은 감소하는 경향과 일치한다.

항복응력과 체적농도관계, 점성과 체적농도와의 관계를 회귀분석을 통해 아래와 같이 Eq. 4 and 5로 각각 표현하였다.

Table 3. Yield Stress and Viscosity as a Function of Volume Concentration

Soil sample	$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$ (Pa)		$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$ (mPa.s)	
	α_1	β_1	α_2	β_2
S0	0.915	25.47	0.848	18.36
S5	0.193	25.87	0.035	27.87
S10	0.236	22.67	0.072	23.46
S15	0.02	25.59	0.226	17.64

$$\tau_y = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \quad (4)$$

에 적용되는 계수 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 를 통해 임의의 체적농도에 대한 항복응력과 점성을 산정할 수 있다.

$$\eta = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \quad (5)$$

여기서, τ_y =항복응력

η =점성

$\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ =계수

본 연구를 통해 얻은 세립토의 유변특성은 토석류의 유변학적 특성을 규명하는 기초자료로 활용될 수 있으며, 토석류 해석시 유변물성 입력 데이터 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

회귀분석을 통해 얻어진 항복응력과 체적농도와의 관계, 점성과 체적농도와의 관계식에 대한 계수 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 를 Table 3에 표현하였다. 계수 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ 를 통해 임의의 체적농도에 대한 항복응력과 점성을 산정할 수 있다. 이와 같이 흙의 유변학적 특성은 체적농도와 모래함량과 같은 시료의 물리적 특성에 따라 변화됨을 알 수 있다.

감사의 글

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

References

7. 결론

항복응력, 점성과 같은 유변학적 특성은 토석류의 유변성을 결정하는 주요 매개변수이다. 본 연구에서는 다양한 액성지수와 모래함량에 따른 시료를 대상으로 유변측정 시험을 수행하였다. 전단응력-전단변형률속도 관계, 액성지수와 점성 및 항복응력 관계, 항복응력과 점성 관계, 체적농도와 점성 및 항복응력 관계 등의 분석 결과로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 유동곡선 특성을 살펴보면 전단변형률속도가 점차 커짐에 따라 곡선의 기울기가 감소하는 전형적인 전단담화의 거동 형태를 나타낸다.
- (2) 동일한 모래함량을 갖는 시료에서 액성지수가 증가함에 따라 항복응력과 점성은 각각 감소하는 경향을 보인다. 또한 동일한 액성지수를 갖는 시료에서 모래함량이 증가함에 따라 항복응력과 점성은 각각 증가하였다.
- (3) 항복응력과 점성은 함수비와 반비례하는 경향을 각각 나타낸다.
- (4) 체적농도가 증가할수록 항복응력과 점성은 증가하며, 관계식

Barnes, H. A., Hutton, J. F. and Walters, K. (1989). "An introduction to rheology." *Elsevier science Ltd*, pp. 11-36.

Coussot, P. and Piau, J.-M. (1994). "On the behavior of fine mud suspensions." *Rheol. Acta.*, Vol. 33, Issue 3, pp. 175-184.

Ilstad, T., Elverhi, A., Issler, D. and Marr, J. G. (2004). "Subaqueous debris flow behavior and its dependence on the sand/clay ratio: A Laboratory Study Using Particle Tracking." *Marine Geology*, Vol. 213, pp. 415-438.

Jeong, S. W. (2010). "Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows." *Geosciences Journal*, Vol. 4, No. 4, 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. 27, No. 6, pp. 49-61 (in Korean).

Kim, S. K. and Seo, H. S. (1997a). "Rheological characteristic of debris flow." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 13, No. 5, pp. 125-131 (in Korean).

Kim, J. H. (1995). "Interpretation and application of debris flow." *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 43, No. 9, pp. 100-103 (in Korean).

Kim, S. K. and Seo, H. S. (1997b). "An analysis of debris flow movements using rheological model." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 13, No. 5, pp. 133-143 (in Korean).

- Lee, M. J. and Kim, Y. T. (2013). "Movement and deposition characteristics of debris flow according to rheological factors." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 5, pp. 19-27 (in Korean).
- Locat, J. (1997). "Normalized rheological behavior 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." *Can. Geotech. J.*, Vol. 25, pp. 709-806.
- Malet, J.-P., Laigle, D., Remaitre, A. and Maquaire, O. (2005). "Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows." *Geomorphology*, Vol. 66, pp. 215-235.
- O'Brien, J. S. and Julien, P. Y. (1988). "Laboratory analysis of mudflow properties." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 877-887.
- O'Brien, J. S., Julien, P. Y. and Fllerton, W. T. (1993). "Two-dimensional water flood and mudflow simulation." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 244-261.