

와이오밍 벤토나이트의 유변학적 특성: 염분농도의 역할

The Rheological Characteristics of Wyoming Bentonite: Role of Salinity

정 승 원¹ Jeong, Sueng-Won

Abstract

The rheological properties of Wyoming bentonites are strongly influenced by the size of particles, cation exchangeable capacity, arrangement and morphology of clay mineral. This paper presents the results of rheological investigations on the Wyoming bentonites aqueous dispersions: two types of particle flocculation were considered. For the Wyoming bentonite, 0g/L and 30g/L NaCl equivalent salinity were added in fresh and salt water to examine the rheological behavior. This paper examined the general rheological characteristics, compatibility of rheological models and correlation between soil structure and change in rheological properties of Wyoming bentonite caused by increasing salinity. From flow curves of bentonites hydrated with fresh water and salt water, the observed general flow behavior is very close to shear thinning with yield stress (or ideal Bingham fluid with yield stress and plastic viscosity). However, the change of shear stress at the same shear rate is clear, particularly for lower shear rate. Well-known rheological models are used to fit the data. There is a good agreement between rheological model and data: Carreau, Herschel-Bulkley and power-law for $S = 0\text{g/L}$ and bilinear, Herschel-Bulkley and power-law for $S = 30\text{g/L}$. It may be due to the fact that the internal structural bonding (strong modification of particle-particle interactions from edge-to-edge and/or edge-to-face to face-to-face) in soil matrix is affected from the evolution of rheological properties with different salinities.

요 지

팽윤성 점토의 전단강도 및 유변학적 특성은 점토입자의 크기, 양이온 교환능력, 점토광물학적 조성 및 형상 등에 영향을 받는다. 본 연구는 고운 분말가루의 와이오밍(Wyoming) 벤토나이트에 대해 염화나트륨 0g/L 와 30g/L 농도로 24시간 수화시킨 후 염분농도에 따른 물성-강도특성 및 유변학적 특성변화를 살펴봄으로써, 유변학적 특성, 유변학적 모델들의 적용성 및 흙 입자의 구조변화에 따른 항복응력-점도와의 상관관계를 설명하고자 한다. 실험결과에 따르면, 팽윤성 점토는 전단담화(shear thinning)와 항복응력과 소성점도로 표현가능한 Bingham 유체 거동을 보이는 것으로 조사되었다. 염분농도가 낮고 함수비가 높아질수록 벤토나이트는 완전소성거동에 가깝게 나타나며, 전단변형률속도에 따른 변화의 폭이 미미한 것으로 조사되었다. 반면, 염분농도가 높아질수록 전형적인 전단담화거동을 보이며, 전단 변형률속도를 증가시킬수록 염분농도에 따른 벤토나이트의 전단강도의 차이는 커진다. $S = 0\text{g/L}$ 에 대해 Carreau, Herschel-Bulkley 및 멱수법칙 모델이, $S = 30\text{g/L}$ 에 대해서는 이중선형, Herschel-Bulkley 및 멱수법칙 모델 등이 흐름 특성을 가장 잘 표현한다. 이것은 염분농도에 따른 흙 입자간 구조적 배열과 형상이 입자간 발생하는 인력인 능-능(EE), 능-면(EF), 및 면-면(FF) 구조를 변화시키고 역학적 특성에 영향을 미치기 때문이다.

Keywords : Plastic viscosity, Rheological characteristics, Rheological model, Salinity, Wyoming bentonite, Yield stress

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

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

세계적으로 널리 생산되는 벤토나이트는 건설업계에 서 사용되는 굴착이수(drilling mud) 뿐만 아니라 객토(soil conditioning), 물감, 방사성 폐기물의 인공방벽(완충재, 뒤채움 재료), 차수벽, 시멘트, 페인트, 화장품 등에 다양한 환경적·공학적 목적으로 사용되고 있다. 1992년 전세계 벤토나이트 생산량은 8백만톤 가량에 달했고, 2007년 이후에는 2천만톤으로 추산하고 있다(Churchman 등, 2002). 이러한 사실이 반영하듯 지난 30년 동안 다양한 연구분야에서 팽윤성 점토광물에 대해 ‘이론적인 지식과 실질적 응용성’이란 측면에서 상당한 발전이 있었다(Barnes, 1999). 또한 최근 지반공학 및 유변학의 융합은 1990년대 이후 새로운 학문분야로써 자리잡고 있다. 광범위한 문헌들을 통해 확인할 수 있듯, 1990년대 이후 벤토나이트 점토광물의 구조 및 물리화학적 특성에 대한 연구가 활발하게 수행되었다(Petrov and Rowe, 1997; Benna 등, 1999; Gungor, 2000). 그 이유는 벤토나이트가 작은 입자크기, 높은 비표면적, 높은 흡착력 및 팽윤성과 같은 벤토나이트 고유의 특성을 가지고 있기 때문이다. 또한 벤토나이트는 소성 및 불투수성의 특성을 나타내며, 특히 물과 마주할 때 높은 점도를 가진다. 이것은 알루미늄규산염으로 이루어진 몬모릴로나이트 층 사이에 이온교환을 통해 가능하다. 점토광물에 대해서 흙 입자의 구조와 배열은 토질, 특히 세립토의 응력전달, 투수성, 압축성 및 강도에 매우 큰 영향을 미친다(Lambe and Whitman, 1979).

벤토나이트의 유변학적 특성은 토석류의 유동성(즉, 사태물질의 이동거리와 이동속도)에도 영향을 미친다. 사태물질 속에 포함된 팽윤성 점토광물의 양에 따라 유변학적 특성이 달라지기 때문이다(Malet 등, 2003; Jeong,

2010). Bardou 등(2006)에 따르면, 아주 작은 양의 팽윤성 점토(카올리나이트 점토의 총량에 대해 0.7~2%의 팽윤성 점토를 함유할 경우)도 토석류의 물리적·유변학적 특성에 영향을 미친다. 팽윤성 점토비율을 높일 경우, 동일한 물질농도(또는 액성지수)에 대해 Bingham 소성 점도는 감소하며, Bingham 항복응력은 증가하는 경향을 보인다. 따라서 팽윤성 점토가 토석류의 사태물질과 혼재시 유동성에 미치는 점토광물의 역할을 무시할 수 없다(Boivin 등, 2004).

벤토나이트의 역학적·유변학적 특성은 다양한 외적 조건(온도, 압력, 염분농도, 유기물, 분산제, pH 등)에 따라 다르다. 상대적으로 가장 많이 고려되는 영향인자는 pH와 전해질 농도이다. 이를 바탕으로 벤토나이트의 활용성은 다양한 조건에서의 이들의 투수성, 입자구조, 배열 및 입자-입자 간 인력과 반발력 등 상호작용에 의한 강도특성 등과 관련하여 설명된다.

본 연구는 염분농도에 따른 유변학적 특성들에 대해 중점적으로 살펴보고자 한다. 점토 입자사이에 작용하는 힘과 이로 인해 발생하는 입자사이의 구조적 변화는 점도특성에 영향을 미친다. 본 연구에서는 서로 다른 염분농도를 가진 와이오밍(Wyoming) 벤토나이트에 대한 항복 전후의 유변학적 특성 및 유변학적 모델의 적합성을 살펴보고자 한다. 마지막으로 점성특성과 입자 간의 배열에 의해 형성되는 3차원 망상구조와의 관련성에 대해 토의하고자 한다.

2. 흐름특성 및 유변학적 모델

Fig. 1은 점토의 유변학적 특성을 나타낸 것이다. 유변학에 있어 점도(viscosity)는 흐름에 대한 저항의 척도로서 표현된다(Fig. 1a). 점토 현탁액은 비뉴턴 유체(non-

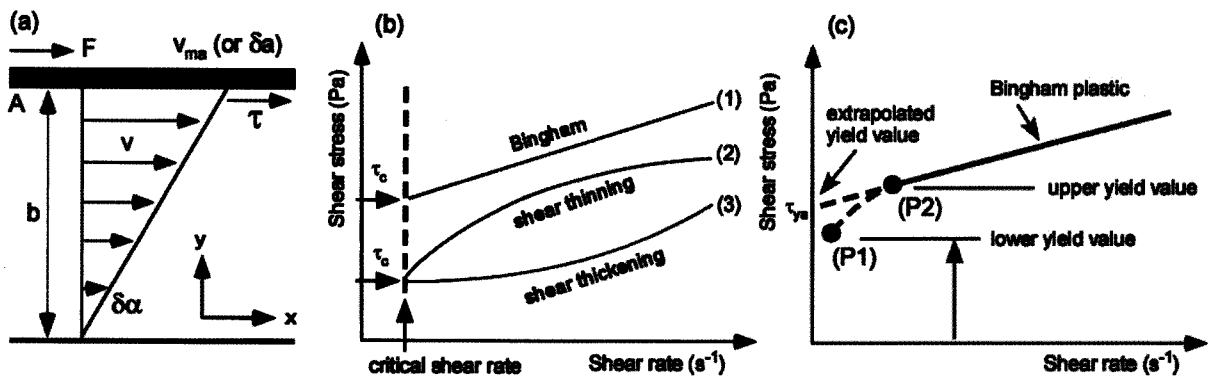


Fig. 1. Suspension rheology: determination of yield stress and viscosity (Newton, 1687; Collyer, 1973)

Newtonian fluid)로 항복응력(yield stress)을 가지며(Coussot 등, 2002), 흐름곡선(flow curve)은 Fig. 1(b)와 같다. 점토 현탁액은 Bingham, 전단담화(shear thinning)와 전단농화(shear thickening)의 거동형태를 보인다(정승원, 2011). Bingham유체는 완전소성유체로서 전단응력이 항복응력에 도달할 때까지 흐르지 않으며, 항복 이후 전단변형률속도의 증가에 따라 점도는 증가한다. 전단담화는 전단변형률속도의 증가에 따라 겔보기 점도가 감소하는 현상을 말하며, 그 반대의 현상을 전단농화라고 명명한다. 점성토를 다량 함유한 세립토는 일반적으로 항복응력을 가진 전단담화의 거동을 보인다(Jeong, 2010). 점토에 적합한 유동모델은 항복응력을 가진 Bingham, Herschel-Bulkley, Papanastasiou 과 이중선형 모델 등이 있으며, 항복응력보다 점도특성을 잘 표현하는 멱수법칙(power-law) 모델과 크로스(Carreau) 모델 등이 있다. 이들의 구성방정식은 아래와 같다.

[1] Bingham

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

[2] 이중선형(Locat, 1997)

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

[3] 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

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

[6] 멱수법칙

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

여기서, τ = 전단응력, $\dot{\gamma}$ = 전단변형률속도, η = 점도, τ_c = 항복응력, η_h = 가소성 점도, η_l = 의사뉴턴 점도, η_0 = 영점 점도, η_∞ = 무한 점도, K = 유동변수, λ = 시간의 차원을 갖는 상수 인자, τ_{ya} = 겔보기 항복응력, $\dot{\gamma}_o$ = 참조 전단변형률속도, m = 유동변수(Papanastasiou, 1987) 그리고 n = 유동지수. $n < 1$ 인 경우, 유체의 거동은 전단

담화에 해당하며, $n > 1$ 인 경우, 전단농화를 의미한다.

항복은 흐름에 대한 임계 상태(critical state)의 도달을 의미하며(Fig. 1b), 항복응력 영역을 지나 물질은 변형에 대한 저항성을 잃게 된다. 그림에서 점선으로 표시된 부분이 임계전단변형률속도(critical shear rate)에 해당한다. 최근 크리프시험을 통한 항복응력을 구하는 방법(예, Khaldoun 등, 2009; Moller 등, 2009)을 제시하고 있으나, 임계전단변형률속도를 결정하기는 여전히 어려운 문제로 남아 있다. 본 연구에서는 항복응력 및 임계전단변형률속도의 결정방법에 대해서는 다루지 않는 것으로 한다. 다만, 간편성을 위해서 항복응력과 소성점도를 구하는 방법은 Locat 와 Demers(1988) 방법을 따르기로 한다. 전단담화 거동을 보이는 소성유체의 경우, Fig. 1(c)에서처럼, 외삽 항복응력(점선, P1)과 겔보기 항복응력(점선, P2)으로 임의의 항복응력 값을 결정한다(Collier, 1973). 외삽 항복응력과 겔보기 항복응력은 각각 Herschel-Bulkley 모델과 이중선형 모델의 개념과 동일하게 볼 수 있다. 실제로 점성토에 대해 두 모델에서 얻어진 항복응력 값들의 차이는 미미하지만 이들이 이루는 구성방정식은 다르다. 따라서 현상학적 측면에서 비슷한 결과를 보이거나 전혀 다른 모델들에 의한 분석이라는 모순을 낳는다.

점토광물의 유변학적 거동은 토석류의 유동성 평가에도 활용된다(Locat 등, 2004; Huynh 등, 2005). 세립토 위주 토석류의 유변학적 특성들은 산사태 발생에 따른 사태물질의 최대 이동거리와 이동속도에 밀접한 관련이 있다(Imran 등, 2001; Jeong 등, 2004; Jeong, 2010). 이와 같은 현상학적 특성들은 물리화학적 변화뿐만 아니라 점토광물의 조성 및 형상 등에 영향을 받는다. 따라서 토석류의 유동성 평가를 위한 유변학적 매개변수의 결정은 반드시 선행되어야 하는 작업이다. 본 연구에서는 이와 같은 유변학의 활용성 측면에서 벤토나이트의 유변학적 매개변수의 결정방법, 염분농도에 따른 구조적 배열 및 이로 인한 유변학적 매개변수들의 변화 등에 대해 토의하고자 한다.

3. 시험재료 및 방법

3.1 시료

‘천연 Na-형 벤토나이트’로 불리는 와이오밍 벤토나이트(미국 Black Hills Bentonite 제공)는 산업용 재료

로 널리 사용되며, 가소성과 팽윤성이 뛰어나 텍소트로픽(thixotropic) 젤처럼 거동하는 것으로 알려져 있다. 고운 분말로 이루어진 와이오밍 벤토나이트는 입도분포곡선상 점토입자($< 0.002\text{mm}$)가 대략 80% 이상이며, #200 체(세립도, $< 0.075\text{mm}$) 통과율은 99%이다. 시험전 시료는 자연건조상태로 존재하였으며, ASTM 시험기준에 따른 물성특성 및 강도실험을 수행하기 이전에 충분한 포화과정을 거친 후 실험을 수행하였다. 광물학적 특성을 알아보기 위해 X-선 회절 분석(XRD)을 수행하였다. 시험결과에 따르면, 점토광물은 대부분 몬모릴로나이트로 이루어져 있으며 소량의 석영 등이 존재한다(Fig. 2). 벤토나이트의 지반공학 특성에는 Table 1과 같다.

본 실험에 사용된 벤토나이트의 액성한계(w_L)는 140~360%, 소성한계(w_p)는 51~54%이다. 염분농도에 따른 소성한계는 액성한계에 비해 큰 차이를 보이지 않지만 소성지수로 인한 활성도($A_c = I_p/CF$)의 차이는 크다. 따라서 일라이트 위주의 점토광물이 낮은 활성점토(low-activity clay)라면, 몬모릴로나이트 위주의 점토광물은 높은 활성점토(high-activity clay)라 명명할 수 있다(Jeong 등, 2010). Jeong 등(2011)에 따르면, 일라이트 및 몬모릴로나이트 위주의 지반공학 및 유변학적 특성변화는 물성특성, 강도특성뿐만 아니라 유변학적 특성(예, 응력이력 - 텍소트로픽 거동)에서도 큰 차이가 있음을 밝혔다.

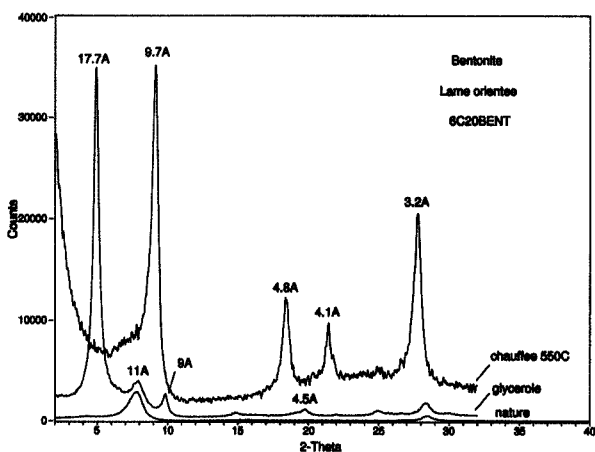


Fig. 2. XRD results of Wyoming bentonite

Fig. 3은 벤토나이트의 자유팽창실험(free swell test) 결과이다(ASTM D 5890). 2g의 벤토나이트 분말가루를 담수($S = 0\text{g/L}$)와 염수($S = 10$ 및 30g/L)를 담은 작은 비이커에 각각 분산시켜 24시간 동안 자유롭게 팽창하도록 하였다. 벤토나이트 분말가루의 분산시 담수 보다는 염수에서 훨씬 빠르게 침전되는 것을 육안으로 확인할 수 있었다. 소량의 분말($< 1\text{g}$)을 비이커내 자유수면 위에 띄워 자유침투가 발생하도록 하였다. 염수의 경우 대략 15초 내외로 침전이 완료되었으며, 담수의 경우 30~60초 이상의 시간이 소요되었다. Terzaghi 등(1996)에 의하면, 이런 현상은 염수에서의 몬모릴로나이트의 입자배열과 투수계수에 기인한 것이다. 담수내 벤토나이트는 분산력이 높으며, 작은 유로(flow channel)를 만들어 낮은 투수성을 가진다. 동일한 간극수 상태에서 염수내 벤토나이트는 담수내의 것보다 몇 배에 해당하는 높은 투수성을 가진다. 이것은 담수내에서 몬모릴로나이트 입자들의 구조적 변화에 따라 상대적으로 큰 유로를 만들고 큰 투수성을 가지기 때문이다. Fig. 3에서 보인 자유팽창실험의 결과에 따르면, 와이오밍 벤토나이트의 최대 자유팽창은 염분농도 0g/L 일 때 1200%, 10g/L 일 때 0g/L 에 가까운 값을 보였다. 하지만 염분농도가 30g/L 일 때 체적변화는 530%로 두 배 이상의 변화가 발생함을 알 수 있다. 실험결과에서 확인할 수 있듯, 팽윤성 점토의 구조적 변화(능-능, 능-면 및 면-면 등)는 염분농도의 변화에 대단히 민감하며, 이것은 항복응력과 소성점도의 변화를 의미한다. 입자간 발생하는 구조적 변화에 대해서는 4.3절에서 상세히 다루기로 한다.

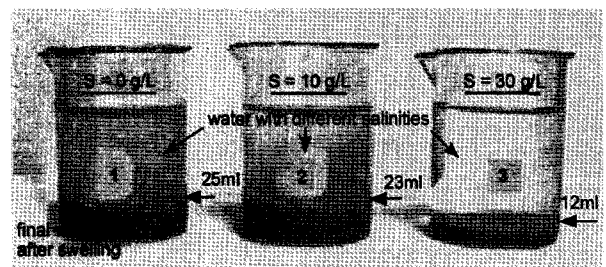


Fig. 3. Swelling capacity of bentonite with different salinity

Table 1. Geotechnical characteristics of Wyoming bentonite (data from Jeong, 2006)

Sample	w_L (%)	w_p (%)	I_p (%)	S (g/L)	CF (%)	SS (m^2/g)	A_c
bentonite (S0)	353.4	53.9	299.5	0	77	602	3.9
bentonite (S30)	140.5	51.3	89.2	30	77	218	1.2

Note: $A_c = \text{Activity} (=I_p/CF)$; CF(%) = clay fraction; I_p = plasticity index; S = salinity(g/L, NaCl equivalent); SS = specific surface area (estimated by w_L); w_L = liquid limit; w_p = plastic limit; bentonite(S0) = bentonite hydrated with $S = 0\text{g/L}$; bentonite(S30) = bentonite hydrated with $S = 30\text{g/L}$.

3.2 유변물성 측정시험법

와이오밍 벤토나이트의 유변학적 특성을 알아보기 위해 동축실린더형 점도계(Rotovisco RV-12)를 사용하였으며, 흙의 기본적인 물성실험은 ASTM(American Society for Testing and Materials)과 BNQ(Bureau de Normalization du Quebec) 표준시험방법을 따랐다. 유변물성 측정시험기의 주요 구성 및 제어시스템은 Jeong(2006)에서 상세히 설명되었다. 유변물성 실험동안 전단에 대한 제어속도는 $0.001 \sim 1s^{-1}$ 에서 $1200s^{-1}$ 까지 가능하다. 유변학적 실험방법은 Torrance(1987)과 Locat 와 Demers(1988)의 방법을 따랐으며, 다음과 같다. 동축실린더의 내부 온도에 대한 영향성을 고려하여 일정한 상태($7^{\circ}C$)를 유지한다. 준비된 시료에 대해 점차적으로 함수비를 높여가며 유변학적 실험을 수행하였다. 이때 공기압을 통해 추출된 간극수의 염분농도를 산정한다. 실험의 시작과 끝에는 시료의 함수비를 측정하고, 스웨덴 타입 풀콘시험기를 이용한 재성형 비배수전단강도($C_u(kPa) = (I_L - 0.21)^2$, Leroueil

등, 1983)를 결정하였다. 결과와 고찰에서는 염분농도에 따른 와이오밍 벤토나이트의 흐름곡선 및 유변학적 모델들의 적용성을 살펴보기로 한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 벤토나이트의 유변학적 특성

점토광물 또는 점성토를 다량 함유한 세립토의 유변학적 거동은 전단담화, Bingham 또는 Herschel-Bulkley 유체로 간주된다(Coussot와 Piau, 1994, Locat, 1997; Luckham 와 Rossi, 1999; Jeong 등, 2010). Fig. 4는 액성지수($I_L = 2.1 \sim 2.9$)에 따른 와이오밍 벤토나이트의 흐름곡선을 보인 것이다. 와이오밍 벤토나이트는 낮은 활성점토(일라이트 위주의 점토)의 유변학적 거동과 비슷하며 Bingham 과 전단담화 거동을 함께 보인다.

Fig. 4(a, c, e)와 4(b, d, f)는 염분농도 0g/L와 30g/L일 때 와이오밍 벤토나이트의 전단응력(τ)과 전단변형률속

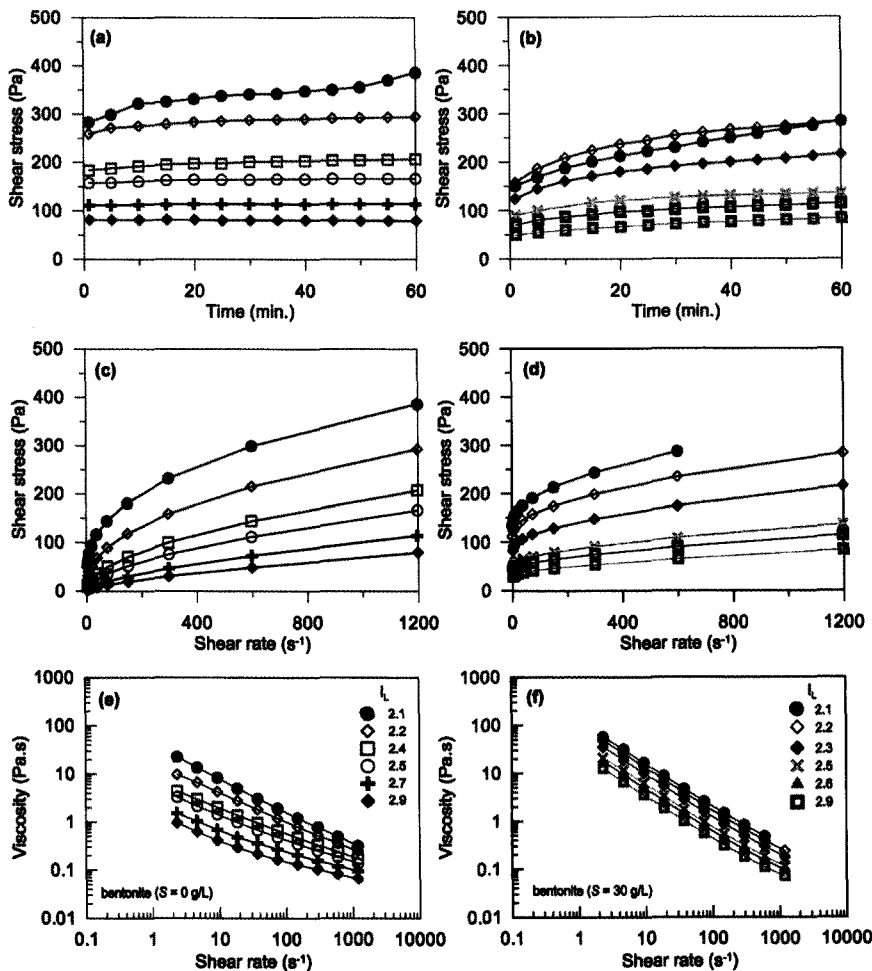


Fig. 4. Flow curves of Wyoming bentonites

도($\dot{\gamma}$)에 대한 선형그래프와 점도(η)와 전단변형률속도($\dot{\gamma}$)에 대한 로그그래프이다. 일라이트를 다량 함유한 자연점토는 아주 작은 전단변형률속도($\dot{\gamma} \leq 1\sim 10s^{-1}$)에서 시료와 벽면사이에서 발생하는 미끄러짐 현상(wall-slip effect)을 종종 보인다. 이것은 시료내 존재하는 다양한 입자크기에 따른 것이다. Jeong(2010)에 의해 설명되었듯, 실트질 및 모래질이 다량 함유된 토석류(상대적으로 점토의 함량이 부족한 경우)의 유동특성은 벽면의 미끄러짐 현상을 보인다. Fig. 4(e, f)에서처럼, 벤토나이트 유체는 로그그래프에서 '떡수법칙' 영역에 속한다. 다시 말해 균질한 입자로 구성된 와이오밍 벤토나이트의 경우 미소변형에 대한 응력 손실부분이 거의 없음을 알 수 있다. 동일한 염분농도에 대한 와이오밍 벤토나이트의 강도특성은 주어진 액성지수 범위 내에서 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만, 동일한 액성지수라 할지라도 염분농도의 차이가 커질수록 항복 전후의 벤토나이트 강도특성은 상당한 차이를 보인다. 이 같은 결과는 흙 입자들 사이에서 인력과 반발력에 기인된 입자의 재배열과 관련되며, Figs. 5-8에서 토의하고자 한다. Jeong 등(2011)에 의하면, 염분농도 0g/L의 벤토나이트는 완전 소성 Bingham 유체와 비슷한 거동을 보이는 반면, 염분농도 30g/L의 벤토나이트는 전단담화 또는 가소성에 가까운 거동을 보인다. 또한 아주 작은 전단변형률속도($\dot{\gamma}$

$\sim 1s^{-1}$)에 있어 동일한 액성지수를 가진 벤토나이트의 소성점도는 염수일 때 담수에 비해 대략 10배 정도 큰 값을 가지는 반면, 전단변형률속도가 커질수록 그 차이는 점차적으로 줄어드는 경향이 있음을 밝혔다. 결과적으로 와이오밍 벤토나이트의 유변학적 특성은 염분농도와 전단변형률속도 등에 영향을 받는다. 하지만, 염분농도 변화에 관계없이, 이들이 가지는 항복응력과 소성점도 간의 관계식은 Locat(1997)가 제시한 캐나다 예민 점토의 항복응력(τ_c)과 소성점도(η_h) 간 경험적 관계식과 거의 일치한다(예, $\eta_h = 5.77\tau_c^{1.1}$, Jeong 등, 2010). 따라서 팽윤성 점토광물에 대해 점도의 예비조사가 필요할 경우, 특별한 실험적 검증없이 항복응력과 소성점도를 추산할 수 있다. 하지만, 염분농도와 액성지수(유체의 액화상태)에 따라 항복 전후의 항복응력과 소성점도의 차이가 크게 발생하므로 주의 깊은 관찰이 요구된다.

앞서 소개한 바와 같이, 점성토를 다량 함유한 세립토의 유변학적 특성은 Bingham, 이중선형, Carreau, Herschel-Bulkley, Papanastasiou 및 떡수법칙 모델 등을 통해 조사할 수 있다. 이들 유변학적 모델들 중에서 유체의 실제 거동은 항복응력의 함수로써 나타낸다. 이런 이유로 Bingham 모델을 사용하여 구조적 변화와 관련하여 설명하기로 한다. Table 2는 와이오밍 벤토나이트의 Bingham, Herschel-Bulkley 및 이중선형 모델에서 얻어진 유변학

Table 2. Rheological properties of Wyoming bentonite

Model		Bingham			Herschel-Bulkley				bilinear		
bentonite $S = 0g/L$; $w_L = 353.4\%$, $w_P = 53.9\%$											
w	l_L	τ_{c-B}	η_h	r^2	τ_{c-HB}	K	n	r^2	τ_{c-bi}	η_i	r^2
682.0	2.1	148.4	256	0.891	53.5	8.29	0.534	0.991	155.0	23120	0.980
709.2	2.2	119.6	147	0.933	22.9	6.47	0.531	0.995	125.0	9770	0.993
768.9	2.4	68.1	117	0.941	10.3	2.43	0.630	0.995	73.0	4400	0.995
794.3	2.5	48.6	99	0.954	7.7	1.47	0.670	0.996	52.0	3300	0.996
850.5	2.7	25.9	74	0.977	3.5	0.63	0.740	0.996	28.0	1510	0.999
908.9	2.9	15.3	54	0.984	2.3	0.32	0.785	0.997	17.0	960	0.999
bentonite $S = 30g/L$; $w_L = 140.5\%$, $w_P = 51.3\%$											
w	l_L	τ_{c-B}	η_h	r^2	τ_{c-HB}	K	n	r^2	τ_{c-bi}	η_i	r^2
235.1	2.1	192.1	160	0.904	133.6	7.11	0.481	1.000	195.0	57.11	0.979
244.5	2.2	174.4	92	0.914	111.7	5.86	0.475	1.000	175.0	47.75	0.974
254.2	2.3	126.2	76	0.927	82.4	3.75	0.502	1.000	128.0	35.23	0.977
279.7	2.5	77.1	50	0.929	48.9	2.95	0.471	0.999	63.0	17.61	0.982
286.4	2.6	62.5	44	0.940	41.2	1.74	0.524	0.999	44.0	12.38	0.982
306.2	2.9	44.1	33	0.944	29.0	1.23	0.530	0.999	22.5	6.47	0.984

Note: l_L = liquidity index; K = consistency coefficient; n = flow behavior index; S = salinity (g/L); r^2 = coefficient of determination; w = water content; w_L = liquid limit; w_P = plastic limit; τ_{c-B} , τ_{c-HB} , and τ_{c-bi} (Pa) = Bingham, Herschel-Bulkley, and bilinear yield stress (Pa); η_h and η_i = plastic and pseudo-Newtonian viscosity (mPa·s).

적 매개변수들을 정리한 결과이다. 기타 모델들의 경우 시행착오법으로 계산되었으며, 적합성에 대해서는 4.2 절에서 설명하였다.

4.2 벤토나이트와 유변학적 모델들의 적용성

동일한 액성지수($n_L = 2.5$)의 와이오밍 벤토나이트에 대해 염분농도(0g/L과 30g/L)를 달리할 경우, 앞서 언급된 유변학적 모델의 적용성을 조사하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 염분농도($S = 0\text{g/L}$)에 대한 와이오밍 벤토나이트의 흐름곡선 결과이다. 앞서 언급한 것과 같이 Bingham, 이중선형, Carreau, Herschel-Bulkley, modified Bingham, Power law

수법칙 유동모델을 사용하여, 전단응력과 전단변형률속도에 대한 선형그래프(Fig. 5a-f)와 점도와 전단변형률속도에 대한 로그그래프(Fig. 6a-f)로 데이터에 대한 회귀분석 및 적합도의 결과를 보인 것이다.

비뉴턴 유체(non-Newtonian fluid)의 거동을 표현할 수 있는 가장 쉽고 간편한 모델은 완전소성 유동모델인 Bingham과 Herschel-Bulkley 모델이다. Locat(1997)에 의해 소개된 것처럼, 이중선형 모델의 경우, ‘영점 점도 - 멱수 법칙 - 무한 점도(Barnes, 1999)’의 거동을 표현할 수 있다는 점에서 Carreau 모델과 Papanastasiou 모델과 아주 흡사한 결과를 보인다. 앞서 소개된 모델들 가운데 기존 유동모델에 비해 멱수법칙 모델이 가지는 가

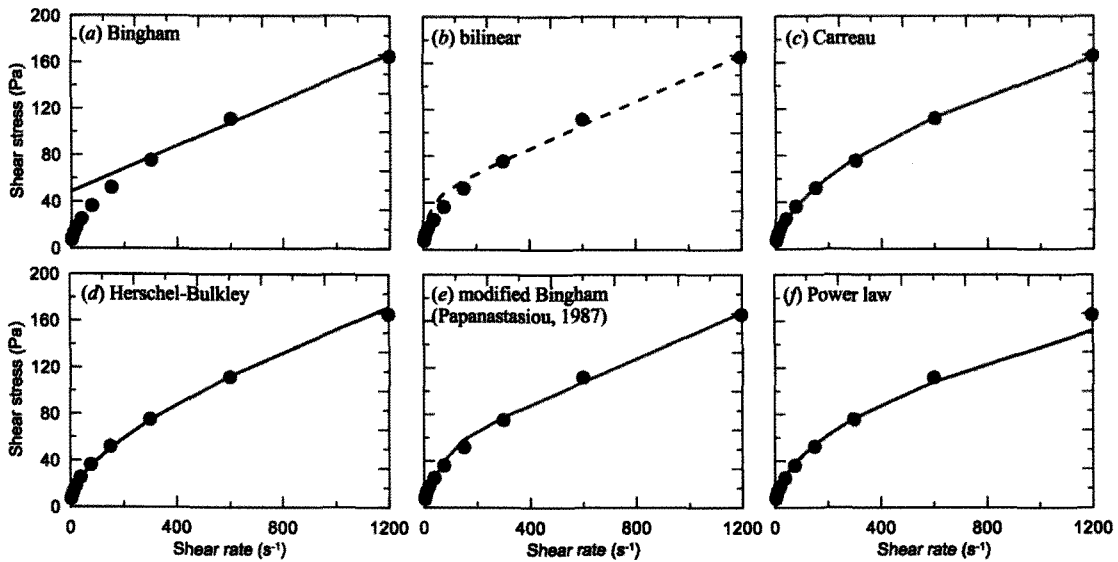


Fig. 5. Compatibility of rheological models for bentonite ($S = 0\text{g/L}$): shear stress-shear rate plot

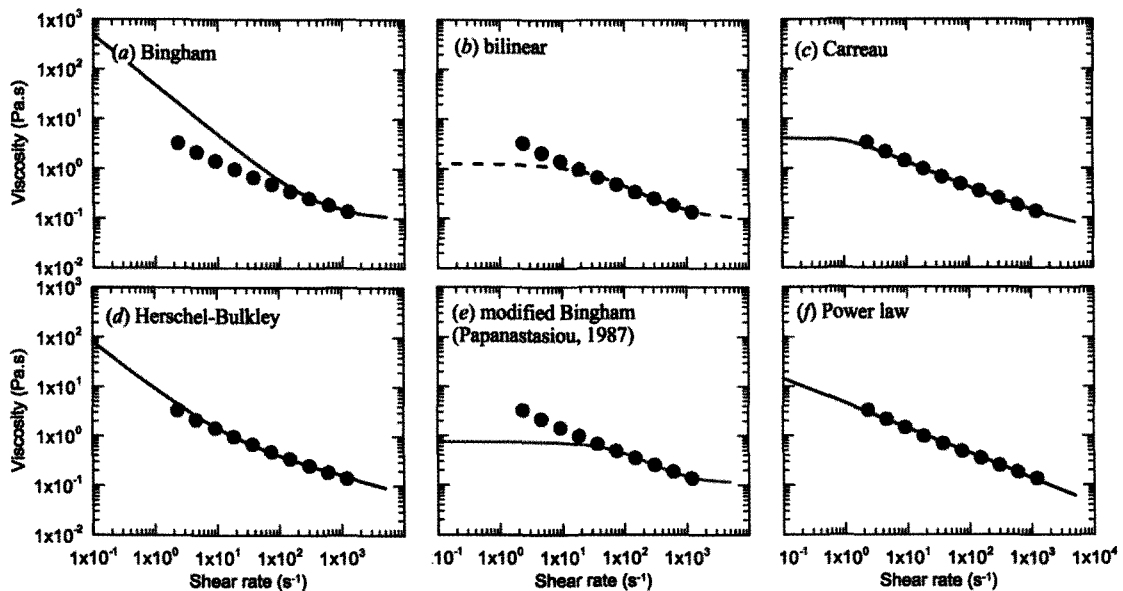


Fig. 6. Compatibility of rheological models for bentonite ($S = 0\text{g/L}$): viscosity-shear rate plot

장 큰 장점은 유동지수를 통한 비뉴턴 유체의 거동을 가장 손쉽게 표현할 수 있다는 점이다. Table 2에서 보인 바와 같이, 유동지수는 담수일 때 0.5~0.8, 염수일 때 0.5~0.6 사이의 값을 가진다. 염분농도의 변화에 관계없이 전단담화 거동을 보이지만, 담수일 때 유동지수가 1에 더욱 가까워진다. 즉, 완전소성유체인 Bingham 거동에 가까워진다. 반면 구성모델이 항복응력을 표현할 수 없으며, 아주 큰 전단변형률속도에 대한 소성특성을 재현할 수 없다는 단점을 가지고 있어 점토광물의 유변학적 해석에 있어서는 그 활용성이 매우 적을 수밖에 없다.

그림 5와 6에서 보이듯 적용된 최대 전단변형률속도가 $1200s^{-1}$ 일 경우, 전단변형률속도 $\dot{\gamma} = 100s^{-1}$ 에서 변곡

점이 발생한다. 다시 말해 유체의 상태변화를 의미한다. 특히 Fig. 5에서 보인 담수일 때의 흐름곡선은 Bingham 모델을 제외한 나머지 모델들에 대해 뛰어난 적합성을 보인다. 하지만 와이오밍 벤토나이트를 Bingham 유체처럼 거동하는 것으로 간주하여 유변학적 특성을 살펴보고자 할 경우, 비교적 작은 전단변형률속도($\dot{\gamma} \sim 1s^{-1}$)에서 유체흐름의 관찰이 필요하다. Fig. 6은 점도-전단변형률속도 간 그래프에서 유변학적 모델들의 적합성 결과이다. Carreau, Herschel-Bulkley 및 멱수법칙 모델을 제외한 Bingham, 이중선형 및 Papanastasiou 모델의 경우, 대략 $\dot{\gamma} = 10s^{-1}$ 에서 큰 차이를 보였다. 특히 Bingham의 경우 $\dot{\gamma} = 100s^{-1}$ 이상의 아주 높은 전단변형률속도에

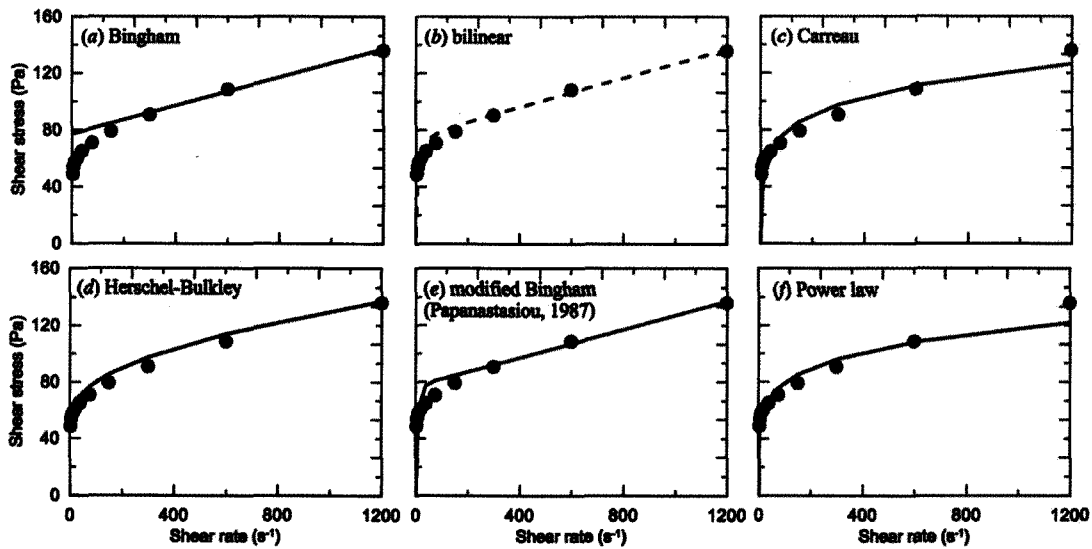


Fig. 7. Compatibility of rheological models for bentonite (S = 30g/L): shear stress-shear rate plot

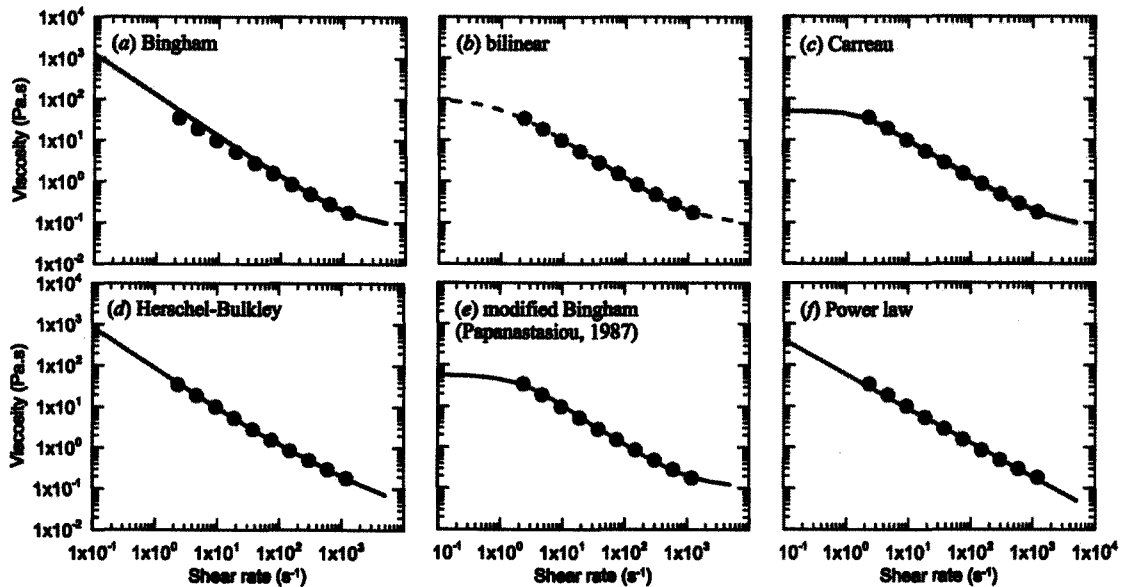


Fig. 8. Compatibility of rheological models for bentonite (S = 30g/L): viscosity-shear rate plot

적합한 모델이며, 작은 전단변형률속도일 경우 이중선형모델에서 제시한 ‘겔보기’ 항복응력(τ_{ya})을 고려함이 타당할 것으로 판단된다(Fig. 1c). 이러한 이유로 벤토나이트와 같은 높은 활성점토를 Bingham 유체가 아닌 Herschel-Bulkley 유체로 해석하는 경우가 종종 있다(예, Coussot 등, 2002). 하지만 유동모델의 선택은 항복응력과 소성점도의 결정문제와 직접적으로 관련되기 때문에 신중한 조사가 필요하다.

Fig. 7과 Fig. 8은 염분농도($S = 30\text{g/L}$)에 대한 와이오밍 벤토나이트의 흐름곡선 결과이다. Fig. 5와 Fig. 6에서처럼 동일한 유변학적 모델들을 적용한 결과로, 전단응력과 전단변형률속도에 대한 선형그래프(Fig. 7a-f)와 점도와 전단변형률속도에 대한 로그그래프(Fig. 8a-f)로 나타내었다. 높은 염분농도($S = 30\text{g/L}$)의 와이오밍 벤토나이트는 일라이트 위주의 점토(낮은 활성 점토)와 마찬가지로 유동모델의 적합도가 전반적으로 뛰어난 것을 알 수 있다(Fig. 7). 다만, 전반적인 유체의 거동이 가소성에 가까운 경향을 보인다. 점도-전단변형률속도 간 그래프에서 적용된 유변학적 모델들은 뛰어난 적합성을 보인다(Fig. 8). 특히, Carreau, 이중선형 및 Papanastasiou 모델의 경우, Boger(1977)의 연구 결과에서처럼 아주 낮거나 높은 전단변형률속도에 대한 점도의 변화양상을 예측할 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 5 ~ Fig. 8의 결과에 비추어 염분농도에 따른 항복응력과 소성점도의 변화를 도식적으로 나타낸 것이다. 동일한 액성지수를 가지고 염분농도를 달리 하는 벤토나이트에 대해 Bingham 유체나 이중선형모델을 적용할 경우, 벤토나이트의 점도는 염분농도에 따라 항복 전후 큰 차이가 보인다. 염분농도가 높은 경우($S = 30\text{g/L}$), 아주 작은 전단변형률속도($\dot{\gamma} \sim 1\text{s}^{-1}$)에서 염분

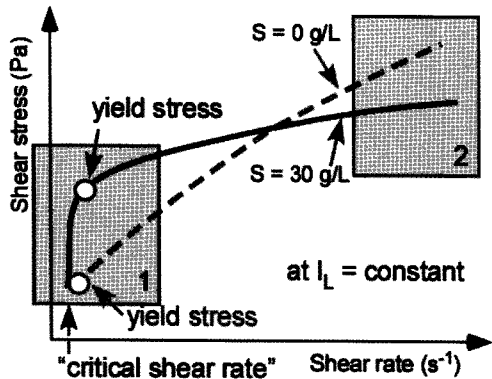


Fig. 9. Flow curves of Wyoming bentonites as a function of salinity at the same liquidity index

농도가 낮은 경우($S = 0\text{g/L}$)에 비해 큰 겔보기항복응력과 유효점도를 가진다(박스1). 반면 아주 큰 전단변형률속도($\dot{\gamma} \sim 1200\text{s}^{-1}$)에 대해서는 염분농도가 낮은 경우($S = 0\text{g/L}$)에 비해 훨씬 작은 전단강도와 유효점도를 가지게 된다(박스2). 따라서 전단변형률속도에 따라 물질이 가진 항복응력과 소성점도는 다른 값을 가지게 된다.

4.3 응집특성 및 유변학적 매개변수

점토의 유변학적 특성은 팽윤성, 양이온교환능력 및 광물학적 조성에 따라 다르며, 항복응력은 점토입자의 구조, 모양, 층 전하 및 표면전하밀도 등에 의존한다(Lagaly, 1989). 이와 같은 결과는 입자들 사이에 존재하는 능-능(EE), 능-면(EF) 또는 면-면(FF)과 같은 취합결정체의 형상, 즉 3차원의 망상구조에 따른 응집(flocculation)에 의해 설명된다(Norrish, 1954; Van Olphen, 1963, 1964; Benna 등, 1999). Fig. 10은 능(edge, 모서리)과 면(face, 결정면)사이의 발생하는 구조적 결합관계를 보인 것이다. 일반적으로 두 가지 형태의 응집 메커니즘이 존재한다(Miano와 Rabaioli, 1994). 첫 번째 응집 메커니즘은 상호간 응집효과로 능(edge) 간의 전자기력과 반데르발스 힘에 의한 상호간 응집력이다. 두 번째의 경우는 면(face)-면(face) 간의 상호작용에 따른 응결(cogulation 또는 heteroflocculation)이다. 또한 압력, 온도, 유기물의 구성, 산화철 및 칼슘이온 및 Ca/Na의 치환능력 등에 따라 유변학적 매개변수들은 영향을 받으나, 일반적으로 구조의 결합력은 pH와 전해질 농도에 크게 의존한다(Gungor, 2000; Luckham과 Rossi, 1999; Garcia-Garcia 등,

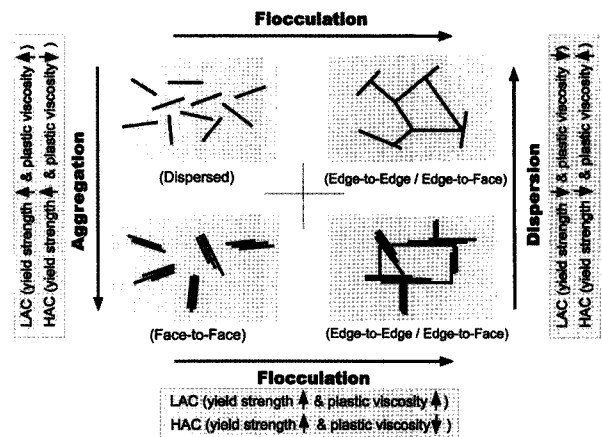


Fig. 10. Schematic representation of the behavior of rheological properties with particle associations in clay suspensions. HAC = high-activity clay, LAC = low-activity clay.

Table 3. Yield stress and plastic viscosity of clays as a function of flocculation

	Low-activity clays		High-activity clays	
	Yield stress	Plastic viscosity	Yield stress	Plastic viscosity
Dispersion	decreased	decreased	decreased	increased
Flocculation	increased	increased	increased	decreased

2006).

면-면 구조는 ‘밴드(Band-like)’형 구조로, 나머지는 ‘카드-하우스(Card-house)’형 구조로 명명된다. 염분농도가 낮을수록 능-능과 능-면 구조를 이루려는 경향이 강하고, 반면 염분농도가 높아질수록 면-면 구조를 이루려는 경향이 강하다. 이러한 이유는 염분농도가 낮을수록 능-능 또는 능-면 사이에서 인력이 발생하고, 염분농도가 높을수록 면-면 사이에서 인력이 강하게 작용하기 때문이다. 산성에서는 능-면 3차원 망상구조를 이루고, 염기성에서는 면-면 3차원 구조를 이룬다. 염기성에서 염분농도의 증가는 이중층수의 두께를 감소시키고, 능-면 사이에 발생하는 강한 정전기적 인력을 가진다. 따라서 전자의 경우 낮은 항복응력과 점도를, 후자의 경우 높은 항복응력과 점도를 가진다. 흙 입자의 3차원 망상구조는 pH와 Ca/Na 비율 변화에 직접적으로 영향을 받으며, 칼슘 이온이 증가함에 따라 면-면 구조로 안정화된다.

Van Olphen(1964)의 연구결과에 따르면, 점토 현탁액의 Bingham 항복응력은 0.5g/L의 염화나트륨에 대해 빠른 감소경향을 보이며, 임계점(대략 0.58g/L) 이후 염화나트륨 6g/L에 이르기까지 항복응력은 점진적으로 증가하는 경향을 보인다. 따라서 전해질 농도에 따른 흙 입자 사이의 구조적 변화와 항복응력과 소성점도의 변화는 불가피한 것으로 판단된다. 이런 이유로 와이오밍 벤토나이트의 유변학적 실험결과에 비추어 염분농도에 따른 입자간 구조의 변화가 항복응력과 소성점도에 어떻게 영향을 미치는가에 대해 간략히 토론했고자 한다.

Fig. 10은 면모화에 따른 낮은 활성점토와 높은 활성점토의 항복응력과 소성점도의 변화를 도식적으로 보인 것이다. 최대 전단변형률속도는 $1200s^{-1}$ 이며, 지속시간은 15초인 경우에 해당된다(Perret 등, 1996). 점토가 Bingham 또는 이중선형 유체로 가정될 때(Fig. 9), 이들은 ‘분산(dispersion)-응집(flocculation)-집적(aggregation)’의 구조를 가지며, 응집과 집적화에 따라 (1) 낮은 활성점토의 경우 항복응력과 소성점도의 증가 그리고 (2) 높은 활성점토의 경우 항복응력의 증가 및 소성점도의 감

소로 구분된다. 분산시 이와 정반대의 결과를 초래한다. Table 3은 구조적 결합과 유변학적 매개변수들 간의 상관관계를 요약한 것이다. 이와 같은 결과는 점토가 시간(t)-변형률(ϵ) 의존성 유변학적 특성을 보이기 때문에 모든 조건에서 동일하게 적용되는 것은 아니다(Jeong 등, 2009). 전단변형률속도의 지속시간이 짧은 경우, 점토광물의 종류에 관계없이 대부분의 점토는 틱소트로픽(thixotropic) 현상을 보인다. 하지만, 상대적으로 긴 시간동안 전단변형률속도를 가할 경우 벤토나이트와 같은 팽윤성 점토는 반틱소트로픽(negative thixotropic) 현상을 보이기 때문이다.

마지막으로 세계적으로 사용되는 와이오밍 벤토나이트와 달리 국내에서 생산되는 벤토나이트는 Ca-형 벤토나이트로 알려져 있다(노진환, 2002). Ca-형 벤토나이트는 와이오밍 벤토나이트에 비해 팽윤성 및 점도 특성이 현저히 떨어진다는 것이 일반적으로 알려진 사실이다. 특히 심층지하공간에 저장하게 되는 방사성 폐기물의 인공방벽인 벤토나이트의 경우 물리화학적 변화, 팽윤성 및 점도 특성이 우선적으로 조사하여야 한다. 이럴 경우 Na-형 벤토나이트로 이온치환을 통한 점도의 증가를 향상시키는 것이 중요하겠다. 이와 관련하여 국내 벤토나이트의 유변학적 특성 및 액성지수에 따른 강도특성은 앞으로 연구해야할 과제이다.

5. 결론

본 연구에서는 와이오밍 벤토나이트의 유변학적 특성과 유동모델들의 적용성을 살펴보았다. 연구결과에 비추어, 입자들 사이에서 발생하는 3차원 망상구조와 유변학적 특성들 간의 상관관계에 대해서 토의했으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 와이오밍 벤토나이트의 체적변화와 흐름특성은 염분농도에 따라 확연한 차이를 보였다. 일반적인 낮은 활성점토의 유동은 전단담화 거동에 가까운 반면, 높은 활성점토는 염분농도와 전단변형률속도에

따라 다양한 유변학적 모델을 적용할 수 있다. 실험 결과에 의하면, 염분농도의 변화에 관계없이 와이오밍 벤토나이트는 전단담화 유체처럼 거동한다. 하지만, 염분농도가 낮을 경우, 벤토나이트는 Bingham 유체에 가까운 거동을 보인다(즉, 유동지수가 1에 가까워진다). 또한 염분농도의 변화에 관계없이 함수비를 증가시킬수록 완전 소성유체에 가까운 거동을 보인다.

- (2) 염분농도와 함수비 상태에 따라 다양한 유동모델을 적용하였다. 와이오밍 벤토나이트의 경우, 항복응력의 유무와 모델의 적합성의 관점에서 Herschel-Bulkley 유동모델이 벤토나이트의 흐름특성을 가장 잘 표현하는 것으로 판단된다. 하지만, 유동모델의 선택은 항복응력과 소성점도의 결정문제와 직접적으로 관련되기 때문에 보다 신중한 조사가 필요하다. 유동모델의 간편성과 활용성 측면에서는 Bingham 완전소성모델을 우선적으로 고려할 수 있다.
- (3) 팽윤성 점토의 경우 염분농도에 따라 흙 입자 사이의 구조변화를 야기시키며, 항복응력과 소성점도에 영향을 미친다. 또한 염분농도의 증가는 항복 전후의 점도의 변화에도 크게 영향을 미친다. 염분농도가 낮을수록 능-능과 능-면 구조를 이루려는 경향이 강하고, 염분농도가 높아질수록 면-면 구조를 이루려는 경향이 강하다. 이와 같은 결과는 항복응력의 증가 또는 감소의 원인으로 작용한다. Bingham 모델 적용시, 점토의 응집화는 (i) 낮은 활성점토의 경우, 항복응력과 소성점도의 증가를 보이며, (ii) 높은 활성점토의 경우, 항복응력의 증가와 소성점도의 감소를 보인다. 분산구조로 이루어진 흙 입자들은 정반대의 유변학적 결과를 보인다. 따라서 향후 다양한 조건에서 흙 입자들 사이에서의 구조적 변화 메커니즘 규명에 대한 보다 면밀한 조사가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본연구사업인 “급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발에 관한 연구(11-3411)” 과제에 의해 수행되었습니다. 본 연구에 활용된 자료들은 캐나다 해저산사태 관련 연구과제였던 Continental Slope Stability(COSTA)-Canada 연

구내용의 일부분이며, 이에 깊은 감사를 드립니다. 본 연구가 있기에 도움을 주신 Jacques Locat 교수님과 Serge Leroueil 교수님께 진심으로 감사드립니다. 본 논문을 심사해주신 한국지반공학회 논문집 심사위원들에게 감사드립니다.

참고 문헌

1. 노진환 (2002), “국내산 벤토나이트에 대한 응용광물학적 특성 평가(I): 광물 조성 및 특징과 양이온 교환특성과의 연계성”, *한국광물학회지*, 제15권 제4호, pp.329-344.
2. 정승원 (2011), “세립토 위주의 토석류에 관한 유변학적 모델: 입자크기 효과”, *한국지반공학회 논문집*, 제27권 제6호, pp.49-61.
3. ASTM D 5890 (2002), “Standard test method for swell index of clay mineral component of geosynthetic clay liners”, *Annual book of ASTM standards*, 04.13, pp.232-234.
4. 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.
5. Barnes, H. A. (1999), “The yield stress—a review or ‘παντ ρεῖ’—everything flows?”, *J. Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol.81, pp.133-178.
6. Benna, M., Kbir-Arighuib, N., Magnin, A., and Bergaya, F. (1999), “Effect of pH on rheological properties of purified sodium bentonite suspensions”, *J. Colloid Interface Sci.*, 218, 442-455.
7. Boivin, P., Bardou, E., and Pfeifer, H. R. (2004), Role and behaviour of clay minerals in alpine debris flows, *Eos Trans. AGU*, 85, Fall Meet. Suppl., Abstract, H43G-03.
8. Boger, D. V. (1977), “Demonstration of upper and lower Newtonian fluid behaviour in a pseudoplastic fluid”, *Nature*, 265, 126-128.
9. Churchman, G. J., Askary, M., Peter, P., Wright, M., Raven, M. D., and Self, P. G. (2002), “Geotechnical properties indicating environmental uses for an unusual Australian bentonite”, *Appl. Clay Sci.*, Vol.20, pp.199-209.
10. Collyer, A. A. (1973), “Time independent fluids”, *Phys. Education*, Vol.8, No.5, pp.333-338.
11. 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.
12. Coussot, P., and Piau, J.-M. (1994), “On the behavior of fine mud suspensions”, *Rheol. Acta.*, Vol.33, pp.175-184.
13. Garcia-Garcia, S., Jonsson, M., and Wold, S. (2006), “Temperature effect on the stability of benonite colloids in water”, *J. Colloid Interface Sci.*, Vol.298, pp.694-705.
14. Gungor, N. (2000), “Effect of the Adsorption of surfactants on the rheology of Na-bentonite slurries”, *J. Appl. Polymer Sci.*, Vol.75, pp.107-110.
15. Huynh, H. T., Roussel, N., and Coussot, P. (2005). “Aging and free surface flow of a thixotropic fluid”, *Phys. Fluids*, 17, 033101.
16. 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.
17. Jeong, S. W. (2006), *Influence of physico-chemical characteristics of fine-grained sediments on their rheological behavior*, PhD Thesis, Laval University, Quebec, Canada.
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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.
 21. Jeong, S. W. (2010), "Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows", *Geosciences J.*, Vol.14, pp.359-369.
 22. Jeong, S. W., Locat, J., and Leroueil, S. (2011), "The effects of salinity and shear history on the rheological characteristics of illite-rich and Na-montmorillonite-rich clays", *Submitted to Clays and clay mineral (under review)*.
 23. 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", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.103, 188301.
 24. Lagaly, G. (1989), "Principles of flow of kaolin and bentonite dispersions", *Appl. Clay Sci.*, Vol.4, pp.105-123.
 25. Lambe, T. W., and Whitman, R. V. (1979), *Soil Mechanics*, SI Version, John Wiley & Sons.
 26. Leroueil, S., Tavenas F., and LeBihan, J. P. (1983), "Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada", *Can. Geotech. J.*, Vol.20, pp.681-705.
 27. 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.
 28. 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.
 29. 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.
 30. Luckham, P. F., and Rossi, S. (1999), "The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions", *Adv. Colloid Interface Sci.*, Vol.82, pp.43-92.
 31. Malet, J. P., Remaître, 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)", *In Proceedings of the 3rd International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Rickenmann, D. and Chen, C. L. (eds.), Millpress, Rotterdam, pp.351-362.
 32. Miano, F., and Rabaioli, M. R. (1994), "Rheological scaling of montmorillonite suspensions: the effect of electrolytes and poly-electrolytes", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and engineering aspects*, Vol.84, pp.229-237.
 33. Moller, P. C. F., Fall, A. and Bonn, D. (2009), "Origin of apparent viscosity in yield stress fluids below yielding", *EPL*. Vol.87, 38004-p1-38004-p6.
 34. Newton, I. (1687), "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica", First Ed., London.
 35. Norrish, K. (1954), "The swelling of montmorillonite", *Disc. Faraday Soc.*, Vol.18, pp.120-134.
 36. Papanastasiou, T. C. (1987), "Flows of materials with yield", *J. Rheol.*, Vol.31, pp.385-404.
 37. Perret, D., Locat, J., and Martignoni, P. (1996), "Thixotropic behavior during shear of a fine-grained mud from Eastern Canada", *Eng. Geol.*, Vol.43, pp.31-44.
 38. Petrov, R. J., and Rowe, R. K. (1997), "Geosynthetic clay liner (GCL) - chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance", *Can. Geotech. J.*, Vol.34, pp.863-885.
 39. Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G. (1996), *Soil mechanics in engineering practice*, 3rd edition. John Wiley & Sons, Inc., New York.
 40. 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.
 41. Van Olphen, H. (1963), *An introduction to clay colloid chemistry*, John Wiley & Sons Inc., New York.
 42. Van Olphen, H. (1964), "Internal mutual flocculation in clay suspension", *J. Colloid Science*, Vol.19, pp.313-322.

(접수일자 2011. 7. 19, 심사완료일 2011. 10. 6)