

## Montmorillonite K10-water 콜로이드계의 비뉴톤 유동성질에 대한 pH와 계면활성제 영향

김남정<sup>†</sup>

삼육대학교 화학과

## The Effect of pH and Surfactants on non-Newtonian Flow Properties of Montmorillonite K10-water Suspensions

Nam Jeong Kim<sup>†</sup>

Department of Chemistry, Sahmyook University, Kongrung-2 dong 26-21, Nowon-gu, Seoul 139-742, Korea

The rheological properties of suspensions show complicated non-Newtonian flow phenomena. These flow properties are controlled by the structure of flow units and the electrostatic interactions among the particles. In this study, the flow curves of montmorillonite-water suspensions were obtained in conditions of various temperatures, pH, concentration and surfactants. The experiments were carried out by using the cone-plate rheometer. By applying non-Newtonian flow equation to the experimental flow curves for the montmorillonite-water suspensions, the non-Newtonian flow parameters were obtained. It was observed that surfactants in suspensions increase the electrostatic interactions of particles.

**Key words:** The rheological analysis, montmorillonite-water suspensions, surfactants

### 1. 서 론

콜로이드 분산계는 복잡한 non-Newtonian 유동현상<sup>1)</sup>을 나타내며, 이 유동현상은 flow unit들의 구조, 입자 크기, 분산정도 및 flocculation에 영향을 받는다.<sup>2,3)</sup> 무기물 수용성 현탁계에 있어서는 flow unit 표면의 전기적인 이중층과 zeta potential이 계의 유동에 중요한 인자로 작용한다. 이러한 non-Newtonian 유동현상과 유동계에 미치는 여러 요인과의 관계에 대한 연구가 순수과학과 산업적인 응용의 연구대상으로 많은 과학자들이 관심을 갖고 있다. 일반적으로 non-Newtonian 유동현상은 shear rate가 증가함에 따라 flow unit들의 구조가 형성되며 점도가 증가되는 dilatancy현상과 구조가 깨져 점도가 감소하는 thixotropy현상으로 나눌 수 있는데, 콜로이드계의 flow unit들이 두 현상을 복합적으로 나타낸다. 이들 두 현상이 shear rate 증가에 따라 thixotropy로 반전되는 물질이 있으며 최근에 Bang<sup>4)</sup> 등

이 이러한 현상들을 이론적으로 규명한 바 있다.

Thixotropy현상<sup>5-7)</sup>은 페인트, 화장품, 잉크, 플라스틱 및 마요네즈 등에서 나타나는 시간 의존성 shear thinning현상이다. thixotropy현상에 대한 연구는 처음에는 비탄성 유동계에서 시작하였지만 지금은 고분자 용액과 같은 점탄성 유동계 뿐 아니라 점탄성 고체의 변형과 연관되어 연구가 발전되어 가고 있다. Ree와 Eyring<sup>8-9)</sup>은 절대반응속도의 활성화 이론을 불균일한 유동계에 적용시킨 일반화 된 점도식을 제안했으며, 이로부터 Hahn 등<sup>10)</sup>은 thixotropy물질에 대한 flow mechanism을 제안하여<sup>11)</sup> thixotropy 이론식을 유도한 바 있다.

본 연구에서는 montmorillonite K10-water 서스펜션계의 유동성질에서의 농도, 온도, pH변화 및 surfactant의 영향을 flow curve를 얻어 고찰하였다. montmorillonite K10의 구조는 물을 쉽게 흡수하여 층 사이의 나트륨과 마그네슘 이온을 수화시켜 팽윤현상을 일으

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

키는 층상구조로서, 서스펜션계의 유동곡선은 농도와 온도, pH변화 및 계면활성제에 민감한 결과를 나타내었다. 또 이들 유동곡선을 Ree-Eyring유동식<sup>12-14)</sup>에 적용하여 유동파라미터를 얻어 non-Newtonian 유동현상을 파라미터로 설명하였다. clay 유동곡선은 thixotropy에서 dilatancy로 전환되는 유동곡선을 얻었으나, montmorillonite K10-water 서스펜션계는 thixotropy 유동현상을 나타내었다. 콜로이드계의 유동성질과 계면활성제의 영향을 고찰하기 위해 두 가지 계면활성제를 1%, 5%를 montmorillonite K10-water 현탁계에 넣어 유동곡선을 얻고, 유동파라미터로부터 그 효과를 규명하였다. 계면활성제는 이온성으로 층사이의 swelling현상을 크게 하여 많이 첨가되면 더욱 더 structure factor를 크게 하였고, 고농도, 낮은 pH에서 큰 structure factor를 얻었다.

## 2. 이 론

### 2.1. 일반화된 non-Newtonian flow 방정식(Ree-Eyring 이론)

Eyring의 방정식에 따르면 전단 속도는

$$\dot{S} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_1}\right) 2k_1' \sinh(\alpha_1 f_1) \quad (1)$$

이다. 여기서,  $k_1'$ 은 flow unit중의  $i$ 번째 group에 속하는 한 개의 unit의 flow process에 대한 속도 상수이고,  $\alpha_1 = (\lambda\lambda_2\lambda_3)/2kT$ 이다. 또한,  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  및  $\lambda$ 는 비슷한 분자 parameter이며, parameter와 삼입구 밖의 점자  $i$ 는 그 값들이  $i$ 번째 group의 flow unit에 속함을 의미하는 것이다.

$i$ 번째 group에 속한 flow unit에 작용하는 힘은  $X_i f_i$ 이며, 따라서 전체 응력  $f$ 는

$$f = \sum_{i=1}^N S_i f_i \quad (2)$$

으로 나타내어지는데, 여기서  $X_i$ 는  $i$ 번째 group의 mole fraction이 된다. 이때, (2)식에 대해 (1)식으로부터 정당한  $f_N$ 을 대입하면, 다음의 식이 얻어진다.

$$f = \sum_{i=1}^N \left(\frac{X_i}{\alpha_1}\right) \sinh^{-1}(\beta_1 \dot{S}) \quad (3)$$

여기서,  $\beta_1 = 1/\{(\lambda\lambda_2\lambda_3)/2k_1'\}$ 이 되는데, 그것은  $N$ 번째 group의 완화 시간을 의미하는 것이다.

### 2.2. Newtonian flow unit

(3)식을 다시 써보면 다음과 같다.

$$f = \sum_{i=1}^N \frac{X_i \beta_1 \dot{S} \sinh^{-1}(\beta_1 \dot{S})}{\alpha_1 \beta_1 \dot{S}} \quad (4)$$

(4)식 중 함수  $(\sinh^{-1}X)/X$ 는 다음과 같은 성질이 있다.

$$\lim_{\beta_1 \dot{S} \rightarrow 0} \frac{\sinh^{-1}(\beta_1 \dot{S})}{\beta_1 \dot{S}} = 1 \quad (5)$$

이 특성으로 인하여  $\beta_1 \dot{S} \ll 1$ 인 조건에 대한 flow unit 1은 Newtonian flow unit로서 역할을 한다. 때문에 Newtonian flow unit의 응력인  $f_1$ 은

$$f_1 = \left(\frac{X_1 \beta_1}{\alpha_1}\right) \dot{S} \quad (6)$$

이다.

### 2.3. Non-Newtonian flow unit

전단 속도가 증가함에 따라 내부의 구조적 변화가 존재함이 가정될 수 있다. 그러한 구조적 변화가 일어난다면, shear에 의해 일(work)이 행해지는 것이다. 그 구조적 변화를 위해 필요한 일은 strain energy로서  $W$ 로 나타내지며, 그 strain energy는 다음 식으로 계산된다.

$$W = \int_0^S f dS = \int_0^S G S dS = G \frac{(\gamma S)^2}{2k_f^2} = C S^2 \quad (7)$$

여기서,  $G$ 는 spring constant이고,  $S$ 는 구조적 변화가 일어나는 molecular displacement로서,  $S = \gamma \dot{S} / k_f$ 으로 표현되며, 이때의  $\gamma$ 는 비례상수이다. 그런데 그때의  $S$ 에 대한 식은 전단 응력에 의해 행해진 단위 시간당 molecular 또는 granular displacement가 전단 속도에 직접적으로 비례한다는 가정으로부터 얻어진 것이다. Strain energy는 activation free energy에 대한 조건에서 disentanglement(앞으로는  $D$ 로 약칭)와 entanglement(앞으로는  $E$ 로 약칭)사이의 구조적 변화 과정에 따라 달라진다.  $D \rightarrow E$ 라는 구조적 변화를 수반하는 flow process를 거치는 flow unit 2에 대해서, flow의 activation free energy는 구조 형성에 기인하는 strain energy( $C_2 S^2$ )만큼 증가하게 된다. 따라서 flow unit 2에 관한 속도상수  $k_2'$ 은

$$k_2' = \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G^\ddagger + C_2 S^2}{RT}\right) = k_0 \exp\left(\frac{-C_2 S^2}{RT}\right) \quad (8)$$

으로 나타내지는데 여기서,  $k_0$ 는 constraint가 전혀 없을 때의 flow unit에 대한 속도상수이다. 그에 관해서 free energy diagram은 jumping process에 대하여 가정된 것으로서 activation energy가 constraint가 전혀 없을 때의 것에 비하여  $C_2S^2$ 만큼 증가되었음을 보여 준다. 그러므로, 완화 시간  $\beta_2$ 는

$$\beta_2 = (\beta_2)_0 \exp\left(\frac{C_2 S^2}{RT}\right) \quad (9)$$

가 되고 여기서,

$$(\beta_2)_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda}\right) \frac{1}{k_0} = \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda}\right) \frac{h}{kT} \exp\left(\frac{\Delta G^\ddagger}{RT}\right) \quad (10)$$

이다. flow unit 2에 대해서 (3)식을 다시 써보면, D→E와 같은 구조적 변화에 관한 전단 응력  $f_2$ 는 다음과 같이 thixotropy식이 나타내진다.

$$f_2 = \frac{X_2}{\alpha_2} \sinh^{-1} \left[ (\beta_2)_0 \exp\left(\frac{C_2 S^2}{RT}\right) \right] \quad (11)$$

### 3. 실험

#### 3.1. 시료 및 기구

본 실험에 사용된 Montmorillonite K10은 Flucka社 제품(surface:  $200 \pm 20 \text{ m}^2/\text{g}$ ; bulk density:  $300 \pm 30 \text{ g/l}$ )의 시약을 사용하였으며, Montmorillonite K10의 pH영향을 관찰하기 위해 사용된 완충용액은 Duksan pharmaceutical社 제품의 First grade시약을 사용하였다. 계면활성제로는 P 계면활성제와 Y 계면활성제를 사용하였으며, 두 계면활성제는 각기 다른 실험실에서 합성되어진 계면활성제를 서로 구분한 것이다. 각각의 Montmorillonite 현탁액들은 100 ml 삼각플라스크에 수집되었고, 수분이탈을 방지하기 위하여 para film “M”을 이용하여 세밀히 감싸주었다. 이들 삼각플라스크는 좌우진동 교반기(좌우이동간격: 35 mm, 분당진동수: 200회)에 각각 1시간씩 흔들어 혼합시켰다. 예비실험을 통해서  $10^\circ\text{C}$  이하와 30 wt% 이상의 Montmorillonite 현탁액은 Montmorillonite의 구조적 특성상 갖는 강한 흡습성등의 영향으로 인하여, 측정상 어려움이 있거나 상당히 불안한 값을 얻으며 그 구조는 Fig. 1에 나타내었다. 이러한 이유로써, 시료는  $20^\circ\text{C}$ ,  $30^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$ 의 온도구간 측정용과 5 wt%, 10 wt%, 20 wt%의 농도구간 측정용, pH4, pH7, pH10의 pH구간 측정용, Y계

면활성제 및 P계면활성제첨가의 계면활성제효과 측정용 등의 여러 가지 Montmorillonite현탁액을 준비하였다. 준비된 Montmorillonite현탁액들은 Brook Field社의 Digital Rheometer(Model: DV-III)를 이용하여 유변성을 측정하였으며, Spindle은 CP40(cone angle:  $0.8^\circ$ , 최대 shear rate:1875/sec, 최대 shear stress:  $245\text{D}/\text{cm}^2$ )을, 항온조는 같은 회사의 TC500을 사용하였다.

#### 3.2. 실험방법

본 실험의 과정은 크게 시료의 제조과정, 시료의 유변성 측정과정, 실험값을 이론식에 대입하여 파라미터를 구하는 과정, 그리고 파라미터의 분석과정으로 나눌 수 있다. 먼저 시료의 제조과정을 설명하면, 100 ml 삼각플라스크에 Montmorillonite와 완충용액, 계면활성제를 주어진 농도, pH, 계면활성제에 맞도록 제조한다. 제조된 각각의 시료는 좌우로 진동하는 교반기에 1시간씩 교반시켜, 충분히 혼합되도록 했다. 교반하기 전에, para film “M”으로 삼각플라스크를 잘 감싸줌으로써 수분의 이탈을 방지하였다. 시료의 유변성 측정과정은, 교반된 각각의 시료를 5 ml 주사기(Dae ah medica社)를 이용하여 0.5 ml를 분취한 후, 해당 온도로 항온되어 있는 Rheometer를 사용하여 유변성을 측정한다. 시료의 분취시 사용한 주사기는, 주사기의 가느다란 쇠바늘의 저항으로 인하여 Montmorillonite현탁액의 농도변화를 방지하기 위하여 쇠바늘을 제거하였다. 유변성 측정을 위하여 사용된 Rheometer는, 초기 shear rate값과 최종 shear rate값을 각각 0으로, 코너 shear rate값을 1800으로, shear rate 변화간격을 100으로, shear rate별 측정시간 간격을 10초로 설정하여 각각의 시료를 측정하였다. Rheometer와 연결된 항온조에 의하여 시료는 적정온도에서 항온 되었다. 파라미터의 분석은, Rheometer 제어 프로그램인 Brookfield Rheocalc Software로부터 얻은 각각의 Data Table과 유동곡선을 이용하였다. Data Table은 shear stress ( $\text{D}/\text{cm}^2$ ), shear rate(1/sec), 점도, 온도, 측정시간 간격, 측정일시 등의 정보를 포함하고 있다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1. 유동곡선

Rheometer로부터 얻은 유동곡선은, 일정한 변형율로 shear rate가 증가함에 따라 shear stress 값이 변하는

정도를 보여주는 up-curve와 shear rate가 감소함에 따라 shear stress 값이 변하는 정도를 보여주는 down-curve로 표시된다. 여기에서는 up-curve에 대한 값만을 취하여 고찰하였으며, 실험에 의해 얻은 값에 근거하여 근사적인 유동 parameter값을 구한 후, Ree-Eyring 유동방정식에 대입함으로써 이론값을 구하였다. Fig. 1~Fig. 7은 본 실험에서 얻은 유동곡선으로 실험 값과 이론 식에 의한 이론 값을 동시에 나타내었다. 유동곡선은 전형적인 thixotropy현상을 나타내며 온도, 농도, pH, 계면활성제의 영향으로 유동 파라메타의 structure factor의 변화를 수반하였다. Montmorillonite 현탁액의 각각의 농도에 따른 온도의 영향을 Fig. 1의 유동곡선으로 표시하였으며, 각각의 온도에 따른 농도의 영향을 Fig. 2의 유동곡선으로 표시하였다. 또, pH의 영향에

대한 유동곡선을 Fig. 3에, 계면활성제의 영향에 대한 유동곡선을 Fig. 4~Fig. 7에 각각 나타내었다.

4.2. 온도와 농도의 영향

Montmorillonite 현탁액에 대한 온도의 영향은, 20°C, 30°C, 40°C의 온도변화에 따른, pH를 7로 하는 각각의 5 wt.%, 10 wt.%, 20 wt.% Montmorillonite 현탁액의 유동성을 측정함으로써 관찰하였다. 농도가 5 wt.%일때의 온도영향은 실험에 의해 얻어진 값과 이론적인 유동곡선과의 차이가 거의 없었다. 농도가 10 wt.%일 때의 온도영향에서는, 20°C와 30°C 아래에서는 비교적 안정한 값을 보였지만 40°C 아래에서의 측정결과에 있어서 초기 800/sec 정도의 shear rate까지 매우 불안한 값을 보였으며, 그 이후로는 대체적으

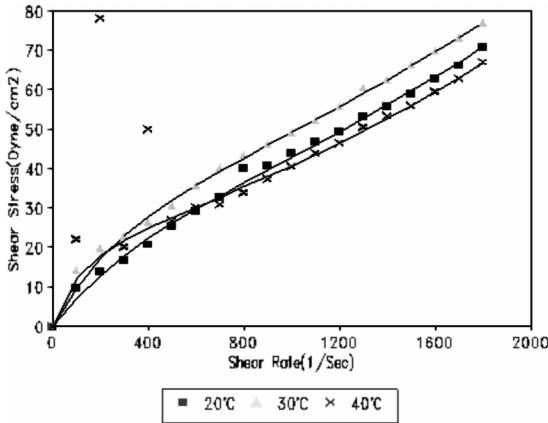


Fig. 1. Flow curves of 20 wt.% montmorillonite K10-water suspensions in pH 7 at various temperatures.

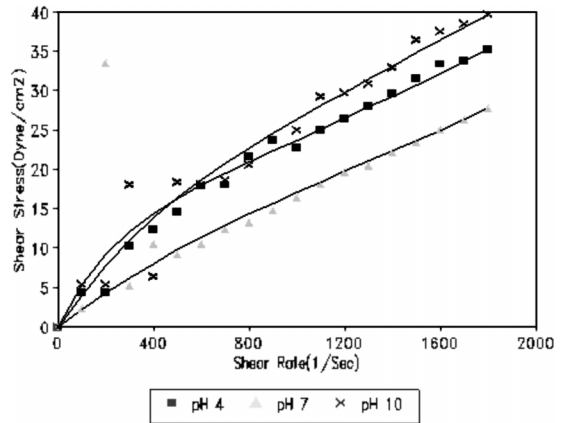


Fig. 3. Flow curves of 10 wt.% montmorillonite K10-water suspensions at 30°C with various pHs.

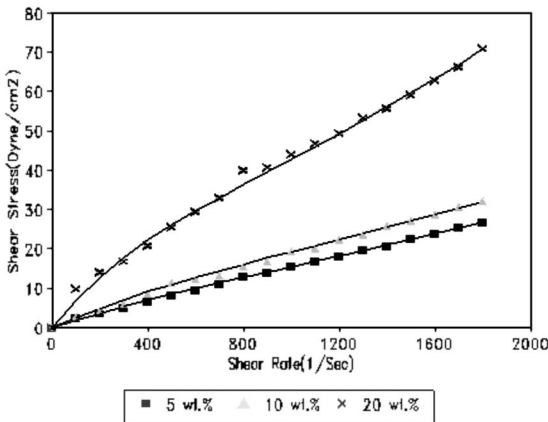


Fig. 2. Flow curves of montmorillonite K10-water suspensions at 20°C in pH 7 with various concentrations.

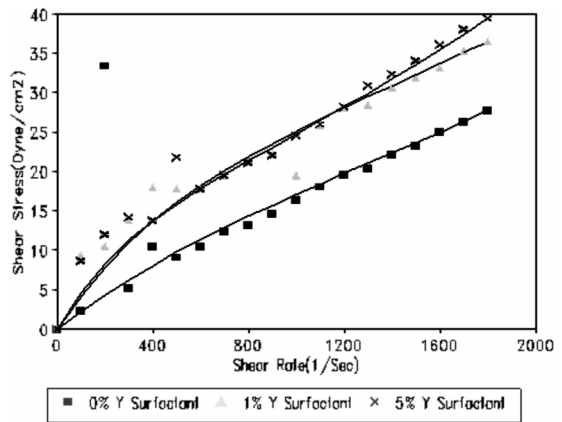


Fig. 4. Flow curves of 10 wt.% montmorillonite K10-water suspensions at 30°C with 1%, 5% Y surfactant and without surfactant.

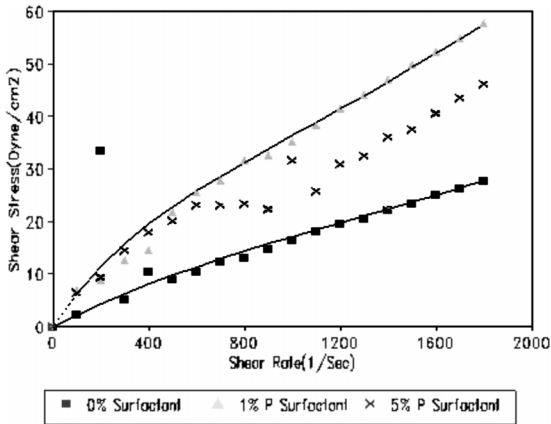


Fig. 5. Flow curves of 10 wt.% montmorillonite K10-water suspensions at 30°C with 1%, 5% P surfactant and without surfactant.

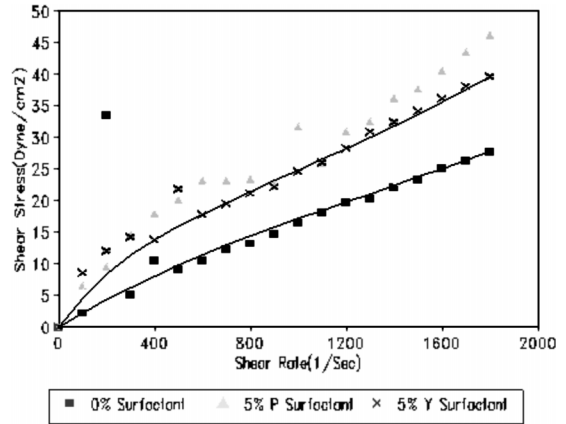


Fig. 7. Flow curves of 10 wt.% montmorillonite K10-water suspensions at 30°C with 5% Y surfactant, 5% P surfactant and without surfactant.

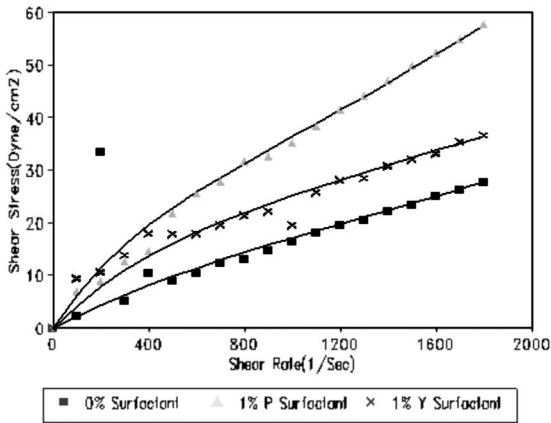


Fig. 6. Flow curves of 10 wt.% montmorillonite K10-water suspensions at 30°C with 1% Y surfactant, 1% P surfactant and without surfactant.

안정한 값을 구할 수 있었다. Fig. 1은 농도가 20 wt.%일때의 온도영향으로, 역시 40°C 아래에서의 측정 결과에 있어서 초기 600/sec정도의 shear rate까지 불안한 값을 보였다. Montmorillonite 현탁액에 대한 농도의 영향은, pH를 7로하는 5 wt.%, 10 wt.%, 20 wt.% Montmorillonite 현탁액에 대한 각각 20°C, 30°C, 40°C 아래에서의 유동성을 측정하므로써 관찰하였다. Fig. 2는 농도영향을 보여주는 유동곡선이며, 40°C아래에서의 20 wt.% Montmorillonite 현탁액의 유동곡선에서는 초기 shear rate에 대해 불안한 값을 띄기도 했으나, 전체적으로 보았을 때 실험에 의해 얻어진 값과 이론적인 유동곡선은 거의 일치함을 보여 주었다.

4.3. pH와 계면활성제의 영향

Montmorillonite 현탁액에 대한 pH 영향은, 각각 pH 4, pH 7, pH 10의 산성도를 갖는 10 wt.% Montmorillonite 현탁액에 대한 30°C 아래에서의 유동성을 측정함으로써 관찰하였다. Fig. 3은 Montmorillonite 현탁액의 pH영향을 보여주는 유동곡선이다. 동일 shear rate 상에서 shear stress의 상대적 값은 pH 7, pH 4, pH 10의 순으로 높은 값을 보였다. Montmorillonite 현탁액에 대한 계면활성제의 영향은, pH를 7로하는 10 wt.% Montmorillonite 현탁액에 각각 0%, 1%, 5%의 계면활성제를 첨가시킨 후 30°C의 온도조건 아래에서 그 유동성을 측정함으로써 관찰하였다. 또 계면활성제의 종류에 따른 영향을 관찰하기 위해, 두 종류의 계면활성제를 사용하였다. 가칭 Y계면활성제와 P계면활성제로 이름 붙인 이것들은 서로 다른 실험실에서 독자적으로 개발한 계면활성제로서 그 구조나 성질을 명확히 알 수는 없었다. Fig. 4~Fig. 7은 계면활성제의 영향을 보여주는 유동곡선이다. 계면활성제의 첨가에 따른 영향은 예상과 달랐다. Y계면활성제, P계면활성제 모두 그것의 첨가로 인해, 동일 shear rate상에서의 shear stress값은 첨가하지 않을 때 보다 큰 값을 보였다. 계면활성제의 종류에 따른 영향을 살펴보면, Y계면활성제 보다 P계면활성제의 효과가 더 크게 나타났다.

4.4. 유변학적인 파라메타

Montmorillonite K10-water 서스펜션계의 유동성질을 고찰하기 위해 온도, 농도, pH변화 및 surfactant의 영향에 대한 유동곡선을 구하였고, 실험적 유동곡선에

**Table 1.** The rheological parameters of relaxation time  $(\beta_2)_0$ , structure factor C and shear modulus  $X_2/\alpha_2$  for montmorillonite K10-water suspensions of pH 7

°C	Parameters	wt. %		
		5 wt. %	10 wt. %	20 wt. %
20°C	$(\beta_2)_0 \times 10^3$	2.3239	2.5109	4.5929
	$C \times 10^4$	2.1464	1.9157	3.2189
	$X_2/\alpha_2$	8.0468	9.8251	15.4267
30°C	$(\beta_2)_0 \times 10^3$	2.4974	2.3186	6.2018
	$C \times 10^4$	2.0812	1.5191	3.0238
	$X_2/\alpha_2$	6.4241	9.4250	16.2714
40°C	$(\beta_2)_0 \times 10^3$	2.3660	3.2650	1.9185
	$C \times 10^4$	2.2950	2.2304	6.9431
	$X_2/\alpha_2$	5.4238	6.7575	8.5358

$(\beta_2)_0$ : sec, C: cal · sec<sup>2</sup> · mol<sup>-1</sup>,  $X_2/\alpha_2$ : dyne · cm<sup>-2</sup>

**Table 2.** The rheological parameters of relaxation time  $(\beta_2)_0$ , structure factor C and shear modulus  $X_2/\alpha_2$  for 10 wt. % montmorillonite K10-water suspensions at 30°C

Parameters	pH	pH		
		pH4	pH7	pH10
30°C 10 wt. %	$(\beta_2)_0 \times 10^3$	8.0509	2.3185	3.2941
	$C \times 10^4$	2.6335	1.5191	1.3315
	$X_2/\alpha_2$	7.3799	9.4250	12.4481

**Table 3.** The rheological parameters of relaxation time  $(\beta_2)_0$ , structure factor C and shear modulus  $X_2/\alpha_2$  for 10 wt. % montmorillonite K10-water suspensions of pH 7 at 30°C

Parameters	Surfactants	Surfactants		
		Without	1% Y-surfactant	5% Y-surfactant
30°C 10 wt. % pH 7	$(\beta_2)_0 \times 10^3$	2.3186	3.6074	5.8472
	$C \times 10^4$	1.5191	1.1040	3.2162
	$X_2/\alpha_2$	9.4250	11.5589	8.2691

Parameters	Surfactants	Surfactants		
		Without	1% P-Surfactant	5% P-Surfactant
30°C 10 wt. % pH 7	$(\beta_2)_0 \times 10^3$	2.3186	4.5684	3.9420
	$C \times 10^4$	1.5191	2.5895	3.1590
	$X_2/\alpha_2$	9.4250	13.7374	15.6984

$(\beta_2)_0$ : sec, C: cal · sec<sup>2</sup> · mol<sup>-1</sup>,  $X_2/\alpha_2$ : dyne · cm<sup>-2</sup>

대하여 비 뉴턴 유동방정식을 도입함으로써, 비뉴턴 유동의 파라미터를 구하였다. Table 1은 온도와 농도의 영향에 대한 파라미터를 나타낸 것이며, Table 2와 3은

pH 영향 및 계면활성제의 영향에 대한 파라미터를 나타낸 것이다. montmorillonite K10의 구조는 물을 쉽게 흡수하여 층 사이의 나트륨과 마그네슘 이온을 수화시켜 팽윤현상을 일으키는 층상구조로서, 서스펜션계의 유동곡선은 농도와 온도, pH변화 및 계면활성제에 민감한 결과를 나타내었다. 또 이들 유동곡선을 Ree-Eyring유동식에 적용하여 유동파라미터를 얻어 non-Newtonian 유동현상을 파라미터로 설명하였다. clay 유동곡선은 thixotropy에서 dilatancy로 전환되는 유동곡선을 얻었으나, montmorillonite K10-water 서스펜션계는 thixotropy 유동현상을 나타내었다. 콜로이드계의 유동성질과 계면활성제의 영향을 고찰하기 위해 두가지 계면활성제를 1%, 5%를 montmorillonite K10-water 현탁계에 넣어 유동곡선을 얻고, 유동파라미터로부터 그 효과를 규명하였다. 계면활성제는 이온성으로 층 사이의 swelling현상을 크게 하며 많이 첨가되면 더욱 더 structure factor를 크게 하였고, 고농도, 낮은 pH에서 큰 structure factor를 얻었다.

## 참고문헌

- 1) W. B. Russel, *J. of Rheol.*, **1980**, 24(3), 287.
- 2) A. Silberberg, *J. Colloid and Interface Sci.*, **1986**, 111(2), 486.
- 3) J.M.P. Papenhuijzn, *Rheol. Acta*, **1972**, 11, 73.
- 4) J.H. Bang, N. J. Kim, S. W. Choi, E. R. Kim, and S. J. Hahn. *Bull. Korean Chem. Soc.*, **1996**, 17(3), 262.
- 5) Dennis Labo, *Cosmetics & Toiletries*, **1987**, 102, 64.
- 6) H. Kuno and M. Senna, *J. Colloid and Interface Sci.*, **1982**, 89(2), 591
- 7) I. Wagstaff and C.E. Chaffey, *J. Colloid and Interface Sci.*, **1977**, 59(1).
- 8) T. Ree and H. Eyring, *J. Appl. Phys.*, **1955**, 26, 793.
- 9) S.J. Hahn and T. Ree and H. Eyring, *NLGI Spokesman*, **1957**, 21, 12.
- 10) S.J. Hahn and T. Ree and H. Eyring, *NLGI Spokesman*, **1959**, 23, 129.
- 11) Y.S. Lee and J. Ree and T. Ree, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **1982**, 3(3), 83.
- 12) H. Utsugi and T. Ree, *Advances in Chemical Phys.*, **1971**, 21, 273.
- 13) W.K. Kim and N. Hirai and T. Ree and H. Eyring, *J. Appl. Phys.*, **1960**, 31, 358.
- 14) D.W. Sohn, E.R. Kim, S.J. Hahn and T. Ree, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **1986**, 7, 257.