

<연구논문>

자성 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 및 CrO_2 입자 분산액의 유변특성 연구

김철암 · 이준석 · 최형진

인하대학교 고분자공학과

(1999년 2월 18일)

Rheological Characteristics of Magnetic $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ and CrO_2 Particle Suspension

Chul Am Kim, Jun Seok Lee and Hyoung Jin Choi

Department of Polymer Science and Engineering, Inha University, Inchon 402-751, Korea

(Received February 18, 1999)

요 약

본 논문에서는 자성입자인 막대 모양의 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 과 CrO_2 분산액에 대한 유변학적 거동을 조사하였다. 특히 입자의 농도와 전단 속도의 변화에 따른 자성 입자 분산액의 점도 거동을 살펴봄으로써 분산액의 미세구조 상태 및 입자의 배향에 영향을 주는 입자의 모양이 점성 소모에 미치는 영향을 조사였는데, 평균장(mean field) 이론과 Mooney식을 통해 분산액의 점도 거동을 해석하였다. 본 연구에서 사용한 모든 자성입자 분산액의 분성 점도가 회박 분산액의 수력학 이론으로부터 얻는 값보다 큰 것을 알 수가 있었는데, 이러한 사실은 분산액내에 자성입자의 고유한 인력에 기인하여 분산 용매를 내포하고 있는 덩어리(flocs)의 존재를 뒷받침하고 있다.

Abstract – Rheological characterization was examined for two different types of magentic particle (rod-like $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$, CrO_2) suspension in this study. The measured suspension viscosity (viscosity vs. concentration or shear rate) is used to obtain the dependence of viscous energy dissipation on the microstructural states of magnetic particle dispersions as well as the microstructural shape effects which are related to magnetic particle orientation. The empirical formulas from mean field theory and the Mooney equation are used to relate suspension viscosity to particle concentration. Intrinsic viscosities of these two different types of rod-like magnetic particle suspensions are found to exceed the prediction of hydrodynamic theory for dilute suspensions and support the existence of flocs containing significant amounts of immobilized suspending medium due to native attraction forces among particles in the microstructures.

Keywords : Magnetic particle, Suspension viscosity, Intrinsic viscosity, Mooney equation

1. 서 론

자기기록 매체중 오랫동안 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 자성입자가 가장 보편적으로 사용되어 왔고, 그 후 재래식 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 의 한계를 극복하기 위한 노력의 결과로 몇가지 새로운 자성재료가 개발되었다. 이미 상업화가 되어있는 예로서는 Co첨가 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$, 등방성 산화철, CrO_2 , metal 분말, Fe 질화물 및 barium ferrite 등이 있다. 이러한 입자 매체의 장점은 자성재료의 선택의 폭이 큰 점, 대량 생산의 용이성, 신뢰성 및 매체 특성 설계의 용이함에 있으며, 반면 단점으로는 도포층 내의 자성 재료 함유량은 tape나 disk의 경우 부피 분율의 40%에 불과하여 기록 특성 저하, 입자의 불균일성 및 배향의 어려움 등이 있다[1].

한편 자성입자 분산계에 대한 연구는 자성매체 산업으로의 광범위한 응용성으로 인해 그 동안 폭넓게 진행되어 왔으나, 자성입자 분산계의 단일영역(single domain)의 유

변학적 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이러한 이유는 그동안 많은 유변학자들에 의하여 연구되어진 중성(neutral) 입자 분산의 경우와 달리 자성입자의 경우는 long range magnetic dipolar force에 의한 상호 인력과 같은 고유한 입자간의 인력으로 말미암아 쉽게 덩어리(flocs)가 형성되어 해석이 용이하지 않았기 때문이다. 그러나 입자 기록 매체의 성능이 입자의 크기 및 분산상태에 크게 기인되며, 이러한 성질들은 실제 상업적인 공정에서 기관위의 입자 분포 균일성 및 도포두께에 영향을 미치며, 위와 같은 성질들을 직접 조절할 수 있는 가장 중요한 실험조건들이 입자분산의 유변학적 성질들이다.

그동안의 연구들을 살펴보면 $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$ 이 epoxy resin, phenol resin 및 polyvinyl butyral용액에 분산된 경우의 점도거동에 대해서는 Nagashiro와 Tsunoda[2]가 상대점도의 농도의존성 및 고유점도를 측정하여 분산체의 입자구조와 분산과의 성질을 연구하였고, Yang 등[3]은 silicone

oil에 분산된 침상형 γ -Fe₂O₃의 유변학 연구로부터 항복응력을 연구하였다. 최근에는 자성 입자 분산액의 구조와 유변학적 특성시기의 상관관계에 관한 연구도 발표되었다 [4-6]. 한편 Jhon과 그 연구자들은[7-10] 자성입자들의 분산정도 및 배향을 연구하기 위하여 입자의 농도가 아주 적은 경우에는 flow birefringence와 magnetic field를 동시에 적용할 수 있는 rheo-optics 장치를 이용하여 입자의 모양과 농도에 따른 dichroism의 변화값을 구하여 입자의 배향을 연구하였으며, 입자의 농도가 아주 커서 광학적인 방법으로 연구할 수 없는 영역에서는 rheo-magnetics장치를 이용하여 입자의 배향 및 분산 그리고 농도를 연구하였다[11-14]. 이 경우는 converging flow의 geometry에서 입자의 배향정도를 test section에 설치된 inductor coil 및 oscillator circuit를 이용하여 inductance를 측정함으로 얻을 수 있는데 이 장치를 이용해서도 aspect ratio가 1보다 큰 경우(막대형 입자)와 1보다 아주 작은 경우(판형 입자)에 대해 뚜렷이 비교되는 결과를 얻었다. 그러나 이러한 방법들은 주로 입자의 배향 및 분산의 정도를 연구하는데 국한된 반면, 본 논문에서는 입자의 크기, 입자의 모양, 입자 aspect ratio 영향, 입자의 농도, 고유점도, 항복응력등 측정 가능한 유변학적 물성값들을 구하여 분산정도 및 자성입자들 즉 막대형인 γ -Fe₂O₃ 및 CrO₂의 관계를 해석 및 추정하였다.

한편 본 논문에서 다룬 자성입자의 농도는 어느 정도 농도가 높은 영역에 해당되므로[15], 이때 다룰 수 있는 농도에 관한 식으로서 부피분율에 대한 멱함수 전개법, 평균장 이론(mean field theory) [16] 및 Mooney식 [17]을 이용하여 비교하였다. 이때 평균장 이론은 기존의 분산계 부피분율 ϕ 에서의 점도 η 에 부피분율 $d\phi$ 만큼을 증가시킴에 따라 점도증가분 $d\eta$ 가 어떻게 영향받는 가로부터 구하여진다. 아울러 본 연구 결과는 자성체 입자들 간의 인력에 의해 분산계 내에서 덩어리(floc)들이 생기게되며 이러한 것들이 점도에도 어떻게 영향을 미칠 까도 고려되었다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 자성입자로는 기록매체의 상업적인 목적으로 사용되고 있는 단일영역입자들을 사용하였는데, 막대형의 γ -Fe₂O₃ 및 CrO₂를 사용하였으며, 입자의 특성은 Table 1에 주어졌고, 입자의 크기 및 입자의 모양은 투과전자현미경(TEM)을 이용하여 확인할 수 있었으며 그 사진은 그림 1에 주어졌다. 사진에서 확인 할 수 있는 바와 같이 γ -Fe₂O₃에 비해 CrO₂의 모양이 훨씬 긴 것을 알 수 있다. 한편 자성 입자 분산액을 제조하기에 앞서 입자내에 포함되어 있는 수분을 제거하기 위해 진공 오븐에서 수 시간 입자를 건조한 후 사용하였으며, 자성 입자 분상액의 제조는 0.04~0.05의 정확한 부피분율에 해당되는 자성입자

Table 1. Characteristics of Magnetic Particles Used in This Study

	γ -Fe ₂ O ₃	CrO ₂
Maker	Magnox HR-350	Dupont V-550-1
Particle size (μm)	0.5	0.46
Aspect ratio	6-7	11-12
Density (g/cm^3)	4.7	5.39

a) Taken from the manufacturer's information

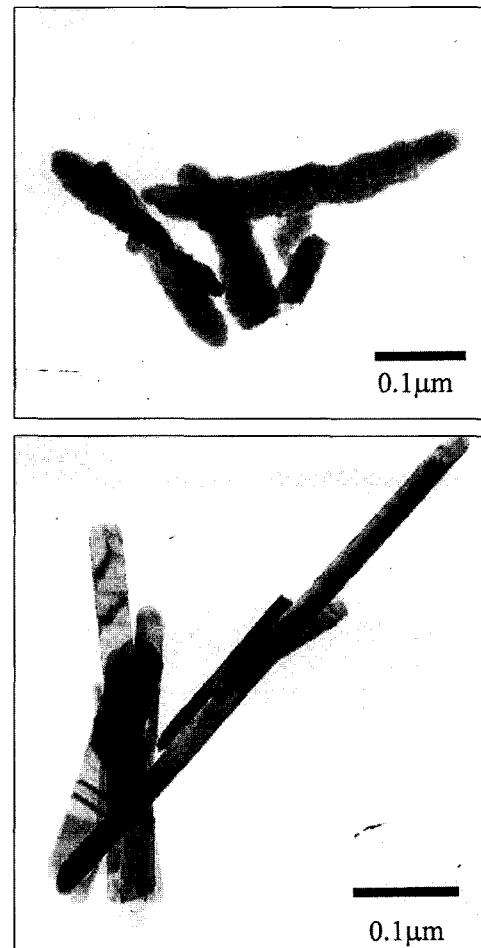


Fig. 1. Transmission electron micrographs of magnetic particles (a) individual γ -Fe₂O₃ particles (b) individual CrO₂ particles; $\times 20,000$.

와 ethylene glycol 용매를 분산기에서 분산시켰다. 본 연구진이 사용한 분산기는 주문 제작한 분산기(제조사 신일 공업)로 직경이 약 1.5 mm의 zirconia beads로 충전된 고회전 모터 pearl-mill type이다. γ -Fe₂O₃ 및 CrO₂ 두 종류의 자성입자 분산액에 대해 shear history가 같도록 1500 rpm으로 동일하게 1.5 시간 분산시킨 후 pearl beads를 제거함으로써 400 mL의 master solutions을 제조하였다. 한편 회석과정을 통해 원하는 부피 분율의 분산액을 준비하였다. 이렇게 제조된 각각의 자성입자 분산액에 대해 회

전형 Physica(UM MC-120) 레오미터로서 0~67 (Pa) 전 단응력 범위를 갖는 저점도용 cocentral cylinder type을 이용하여 $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 유변학적 물성을 측정하였는데, 입자의 침전을 막고 또한 고른 분산을 위해 $200 (\text{s}^{-1})$ 의 pre-shear를 5분간 동일하게 가하고, 2분 정도 안정화를 시킨 후 각각의 전단속도에서 20분 동안 정상상태가 되도록 충분히 방치한 후에, 정상상태에서의 점도를 얻었으며, 걸보기 점도의 경우 shear rate sweep을 통하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

덩어리(flocs)를 이루는 자성 입자 분산액의 전형적인 거동인 shear thinning 현상이 그림 2 (CrO_2)과 3($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)에 잘 나타나있다. 이 때 넓은 shear rate의 범위에서 자성 입자의 농도가 증가할수록 점도가 증가하며, 입자의 부피분율이 증가할수록 shear thinning의 정도가 커짐을 알

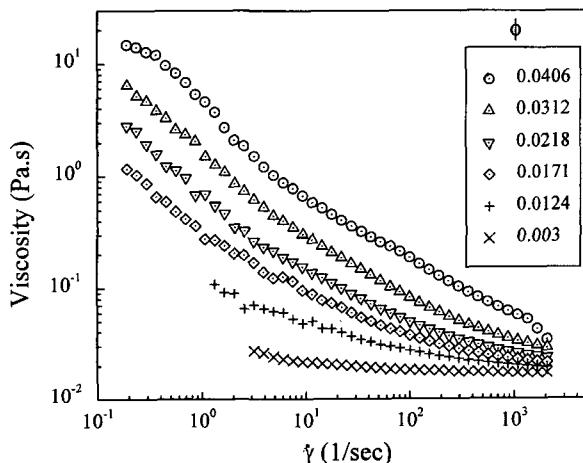


Fig. 2. Typical dependence of measured viscosity on shear rate for CrO_2 particle suspensions.

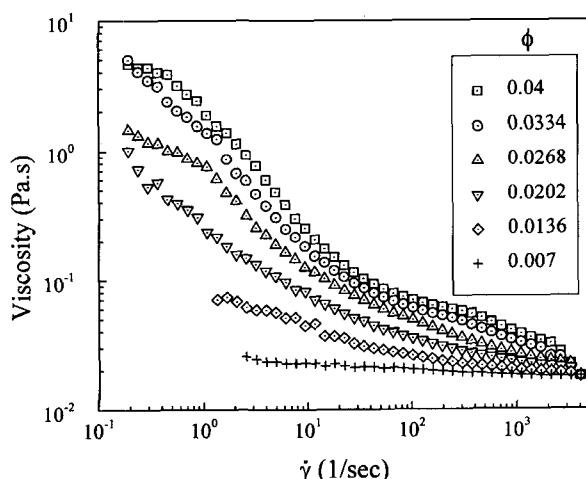


Fig. 3. Typical dependence of measured viscosity on shear rate for $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ particle suspensions.

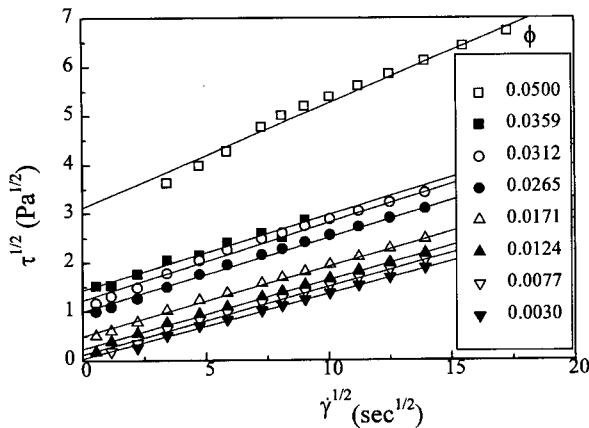
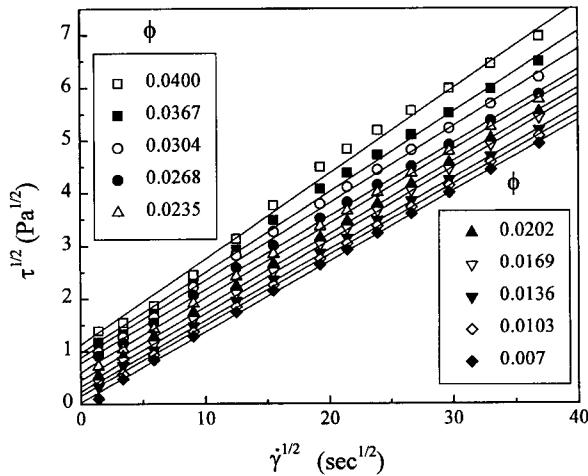
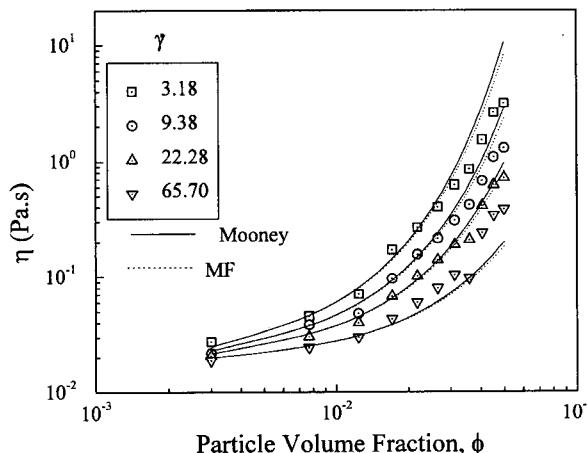
수 있다. 외부로부터 전단력이 가해질 때 점성 소모를 줄이기 위해 덩어리 구조의 변화가 있게되는데, 이 때 덩어리 내에 포함된 용매를 방출함으로써 점도 감소를 보인다. 그러나 유체 역학적 이론들에 의하면 비구형 입자 분산액의 점도가 구형 입자 분산액의 점도보다 높으므로 구형의 덩어리들이 전단 응력에 의해 깨어져 비구형 입자들로 변형될 때는 점도의 증가효과를 나타내게된다. 구형입자의 분산에서의 점도 관계식은 부피분율(ϕ)에 대한 멱급수의 형태로 나타낸다[18]. 그러나 비구형 입자분산의 경우 상황은 달라져서 흐름장 내에서 입자에 가해지는 힘은 입자의 배향(orientation)에 의존하며 흐름이 다시 배향분포에 이방성을 주며, 또한 회전 브라운 운동은 입자의 배향을 무작위로 하려하므로 비구형 입자의 점도는 농도뿐 아니고 입자모양, 흐름장 및 브라운 운동(Brownian motion)에 의존한다. 회전 타원체의 분산 입자의 배향은 수력학적 힘(hydrodynamic force)과 회전 브라운 운동간의 비에 의해서 결정된다[19-21]. 이렇듯 점도의 거동은 위의 두 가지 효과에 의해 지배받으나 전자의 효과가 더 우세함을 shear thinning 현상을 통해 알 수 있다.

한편 점도 거동을 기술하는데 있어, Casson에 의해서 제안된 모형이 널리 사용되고 있다[3]. 그는 각각의 입자들이 뭉쳐서 막대모양과 같은 구조를 이루고 있다고 가정하고, 유동하에서 막대모양의 구조를 응력에 대한 표현으로 전개시켰다[18]. 이 막대형들은 응력이 임계이상의 값을 가졌을 때 분쇄된다. 그리고 전단 속도를 증가하면 막대 구조의 크기는 점차 막대가 완전히 파쇄되어 높은 전단에서 완전한 각각의 일차적인 입자가 될 때까지 순차적으로 줄어든다고 가정하여 다음과 같은 형태의 식을 얻었다.

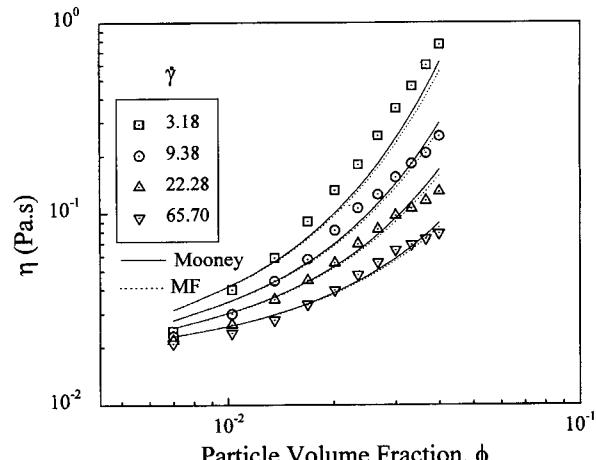
$$\begin{aligned} \dot{\gamma} = 0 & : \text{for } \tau < \tau_y \\ \tau^{1/2} = \tau_y^{1/2} + \eta_{\infty}^{1/2} \dot{\gamma}^{1/2} & : \text{for } \tau \geq \tau_y \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 τ_y 는 항복응력(yield stress)이고, η_{∞} 는 infinite shear rate 점도이다. 식 (1)은 혼탁액 점도의 전단 속도에 대한 의존성을 나타내기 위한 식이다. 점도의 전단 속도에 대한 의존성을 조사하기 위하여 점도 측정 결과를 Casson 식에 대입하여 도식화한 결과가 그림 4 (CrO_2)와 5($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)이다. 두 가지 자성 입자 모두 측정값과 Casson식과 양호하게 일치하는 것을 보여준다. 이 직선의 y-절편으로부터 항복응력을 구할 수 있는데, 여기서 구한 항복응력으로부터 항복응력과 입자의 농도와의 관계는 후에 설명하겠지만, 그림 11에 나타내었다. 그림에서 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 의 항복응력이 CrO_2 의 항복응력보다 적은 것을 볼 수 있는데, 이는 덩어리의 세기와 관련이 있다.

그림 6 (CrO_2)과 7 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)를 보면 모든 입자 분산액에 대해 점도가 전단속도에 관계없이 입자의 부피 농도에 지수 합수적으로 증가함을 볼 수가 있다. 이러한 비선형적 의존성은 분산액 내에 입자 농도가 증가함에 따라 어떤 입자

Fig. 4. $\tau^{1/2}$ vs. $\dot{\gamma}^{1/2}$ plot for CrO₂ particle suspensions.Fig. 5. $\tau^{1/2}$ vs. $\dot{\gamma}^{1/2}$ plot for γ -Fe₂O₃ particle suspensions.Fig. 6. Measured viscosity dependence on particle volume fraction for CrO₂ particle suspensions.

주위에서 교란된 흐름이 또 다른 입자 주위의 흐름을 바꾸어 놓게되므로, 즉, 입자간 유체 역학적 상호작용이 크게 작용하기 때문이며 이러한 사실로 인해 희박분산액 이론을 통

Fig. 7. Measured viscosity dependence on particle volume fraction for γ -Fe₂O₃ particle suspensions.

해 자성 입자 분산액의 점도 거동을 설명할 수 없다.

입자들간의 상호작용 효과를 고려하여 Frisch와 Simha [22]는 농도가 진한 분산액의 점도를 다음과 같이 부피 분율에 대한 멱함수 전개를 하였다.

$$\eta = \eta_0(1+k_1\phi+k_2\phi^2+\dots) \quad (2)$$

여기서 η 는 분산점도이고, η_0 는 용매의 점도이다. 그러나 아직까지 입자간 상호작용에 기인하는 점도의 거동을 더 자세히 나타낼 수 있는 ϕ^3 이상의 계수들은 구할 수 없으므로 ϕ^2 까지의 생략된 식을 사용하면 진한 입자 농도 범위에서의 점도 예측이 더욱 어려워진다. 이러한 멱함수 전개법의 단점을 극복하기 위해 Farris[23]는 어떤 점도를 지닌 분산용액에 입자를 추가적으로 첨가시킴으로써 증분되는 점도량을 계산하는 평균장(mean field, MF) 이론을 발표하였다 [24]. 이 때 점도의 증가분은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$d\eta = [\eta]\eta d\phi + Kd\eta \quad (3)$$

여기서 $[\eta]$ 는 고유점도(intrinsic viscosity)이고, K 는 분산액내에 이미 존재하는 입자에 의해 감소된 자유 체적 효과를 설명하는 crowding factor로써 K^{-1} 은 분산액의 점도가 무한대가 될 때의 최대 입자 부피 분율인 ϕ_∞ 와 같다. Krieger와 Dougherty[16]는 위 식을 적분한 후, $K=\phi_\infty^{-1}$ 로 둠으로써 아래와 같은 분산점도에 관한 식을 나타내었다.

$$\eta = \eta_0 \left(1 - \frac{\phi}{\phi_\infty}\right)^{[\eta]\phi_\infty} \quad (4)$$

MF 이론은 입자의 다분산 효과를 체계적으로 상호 연관 시킬 수 있다는 장점이 있다. 위의 MF 이론 이외에 점도의 농도 의존성을 설명하기 위한 시도중에서 Mooney [17]에 의해 개발된 식이 사용된다. 특히 비구형 입자 분산용액의 상태 점도 변화를 다음과 같이 나타내었다.

$$\ln\left(\frac{\eta}{\eta_0}\right) = \frac{[\eta]\phi}{1 - \frac{\phi}{\phi_\infty}} \quad (5)$$

한편 그림 6 (CrO_2)과 7 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)은 입자 부피 분율에 대한 점도의 거동을 나타내며 두 식을 통해 점도 거동 변화를 잘 예측할 수 있음을 보이고 있다. 실험에서 측정된 분산액의 점도 거동을 위의 두 식을 통해 fitting함으로서 유변학적 정보들을 얻을 수가 있는데, Mooney식을 적용한 경우 그림 8 (CrO_2)과 9 ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$)를 보면, 절편값, $-[\eta]^{-1}\phi_\infty^{-1}$ 과 기울기 $[\eta]^{-1}$ 로부터 curve fitting 인자인 $[\eta]$, ϕ_∞ 를 구할 수 있다. 그러나 기울기를 구하는데서 기인하는 작은 오차라도 절편값을 통해 얻는 ϕ_∞ 값에 큰 변화를 주기 때문에 둉어리를 크기가 동일한 구형이라 가정하고 random close packing ($\phi_\infty=0.637$)일 때와 body-centered cubic packing ($\phi_\infty=0.68$)일 때를 고려하여 $\phi_\infty=0.65$ 로 고정시킴으로써 점도 변화의 $[\eta]$ 의존성만을 고려하였다. 실험에서 측

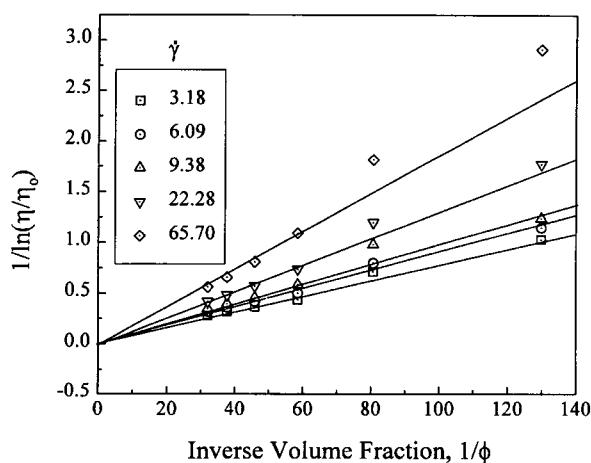


Fig. 8. $1/\ln(\eta/\eta_0)$ vs. $1/\phi$ curve fitting based on MF and Moony equation for CrO_2 particle suspensions.

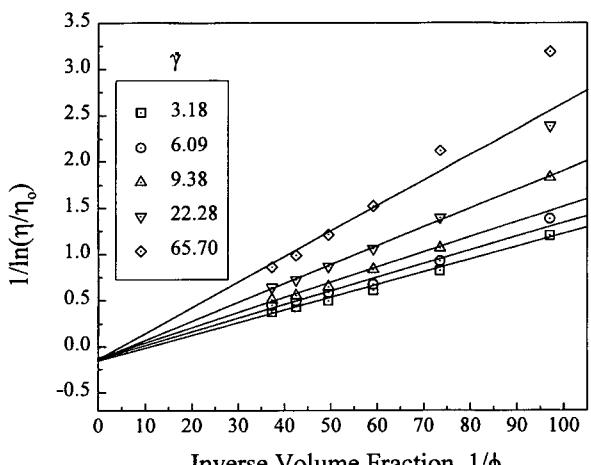


Fig. 9. $1/\ln(\eta/\eta_0)$ vs. $1/\phi$ curve fitting based on MF and Moony equation for $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ particle suspensions.

정한 점도를 curve fitting하여 얻값과 비구형 입자 회박 분산액 이론을 통해 얻은 $[\eta]$ 값과 비구형 입자 회박 분산액 이론을 통해 얻은 $[\eta]$ 값을 비교하면 본 실험에서 사용된 모든 입자 분산 용액의 측정값이 더 큰 것을 알 수가 있는데 이러한 사실은 우선 자성 입자간의 인력으로 인해 둉어리내에 분산 용매를 내포함으로써 실질적인 유체 역학적 부피 증가로 $[\eta]$ 를 증가시키기 때문이며, 입자 형태, 입자 크기 분포, 전단 속도에 의존하는 ϕ_∞ 값을 상수값으로 둔데서 기인하기도 하나 전자가 더 큰 영향을 미친다[25].

Smith와 Bruce [26]에 따르면, $[\eta]_\infty$ 를 $[\eta]$ 과 $\dot{\gamma}^{1/2}$ curve로부터 구할 수 있는데 Mooney식의 fitting을 통해 얻은 $[\eta]$ 를 그림 10에 나타내었다. 0.13-0.33의 $\dot{\gamma}^{1/2}$ 범위내에서 $[\eta]$ 의 선형 의존성을 볼 수가 있는데 절편값을 통해 $[\eta]_\infty$ 를 구해보면 유체 역학 이론으로부터 예측한 값보다 상당히 크다[27]. Kwon 등[27]은 입자 분산액의 유체 역학 이론에 따른 본성점도와 입자의 모양에 관한 관계식들을 훌쭉비(aspect ratio)에 대하여 분류 정리하였는데, Kuhn과 Kuhn의 식에 따르면 훌쭉비가 6인 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 은 본성점도가 7.11이고 훌쭉비가 11인 CrO_2 의 본성점도는 15.63이다. 그렇지만 본 실험 결과에서 본 연구진은 각각 20.68과 22.75의 값들을 얻을 수 있었다. 이러한 결과는 둉어리들이 존재하는 낮은 전단 속도 영역에서 측정된 점도값을 Mooney식으로 fitting 및 외삽하였기 때문이다.

한편 Hunter [28]등은 Bingham 모형을 가지고 floc 구조와 입자간력을 상호 관련시키기 위하여 유변학적 인자들을 사용하였다. 이와 같은 관계는 intuitive basis에 기초를 두고 있다[18]. 따라서 본 연구진은 이와 같은 기초 위에 혼탁액의 항복응력과 입자의 농도와의 관계를 살펴보기 위하여 그림 4과 5에서 구한 Casson식에 의한 항복응력을 입자의 부피 분율에 대하여 도식화한 결과가 그림 11이다. 입자의 종류에 상관없이 로그 함수적으로 선형성을

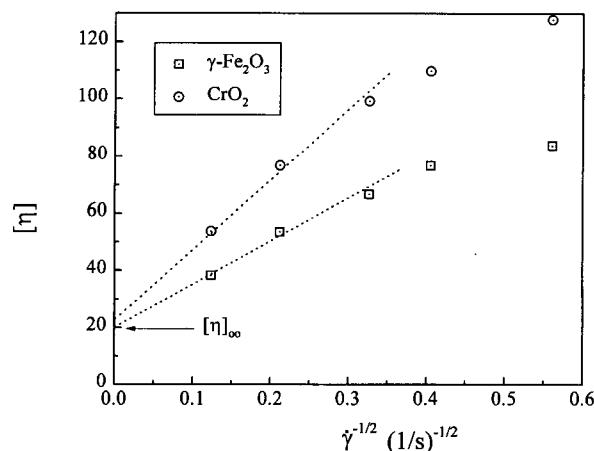


Fig. 10. The intercept of the asymptotic curve yields the intrinsic viscosity at infinite shear rate. The intrinsic viscosity determined from the Moony equation.

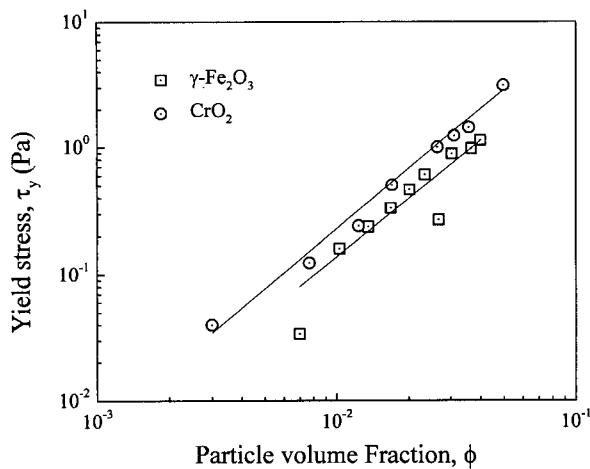


Fig. 11. Yield stress dependence on particle concentration.

나타내는 것을 볼 수 있다. 이는 입자의 농도에 따라서 혼탁액에서 입자들의 덩어리 구조화에 어떠한 경향이 있다는 것을 나타낸다. 이러한 의존성을 다음과 같은 scaling law로 표현하였다.

$$\tau_y \propto \phi^b \quad (6)$$

여기서 지수 b 는 입자간의 상호작용의 미세 증가와 농도에 따른 덩어리 생성을 설명하는 척도이다. 그림에서 항복응력의 선형성은 주어진 농도의 영역에서 입자들은 동일한 양식으로 덩어리를 이룬다는 것을 암시한다. 이와 같은 기초 위에서 본연구진은 그림에서부터 γ -Fe₂O₃ 혼탁액의 경우 항복응력이 입자분율의 1.51의 지수승에 비례하고, CrO₂ 혼탁액의 경우는 1.57의 지수승에 비례하는 결과를 얻었다.

4. 결 론

본 실험에서는 자성입자인 막대 모양의 γ -Fe₂O₃, CrO₂ 분산액에 대한 유연학적 거동을 측정하였다. 입자들의 점도 거동을 Casson식을 이용하여 분석한 결과 넓은 농도 범위에서 양호하게 일치하는 것을 확인하였다. 이 식으로부터 항복응력이 농도가 증가함에 따라 증가되는 것을 볼 수 있다.

한편, 입자의 부피 농도에 따른 점도거동의 변화가 평균장 이론 및 Mooney식에 의해 잘 묘사되었으며, 이로부터 얻은 고유 점도가 회박 분산액의 수력학 이론으로부터 얻는 값보다 큰 것은 입자간 고유인력에 기인하여 덩어리(flocs)가 존재하기 때문이며, 한편 실험에서 측정한 3.18~65.70 전단속도 범위에서 γ -Fe₂O₃ 고유 점도가 CrO₂의 고유 점도값보다 작은 것은 γ -Fe₂O₃ 입자가 CrO₂ 입자보다 더 밀집된 덩어리 구조를 이름으로써 덩어리 내에 분산 용매를 덜 포함하게되어 실질적인 유체 역학적 부피의 감소가 있게되므로 상대적으로 작은 값의 고유점도를 나타

낸다. 입자들간의 덩어리화가 어떻게 진행되는지를 확인하기 위하여 입자의 농도와 Casson식으로부터 구한 항복응력간의 관계를 조사하여, 항복응력은 입자분율의 1.54 ± 0.03 지수승에 비례하는 것을 확인하였다.

감 사

본 연구는 1998년도 한국과학재단 지원 (핵심기초연구; 과제번호: 981-1109-042-2)에 의하여 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. G. Bate, *Proc. IEEE*, **74**, 1515 (1986).
2. W. Nagashiro and T. Tsunoda, *J. Appl. Polym. Sci.*, **25**, 2961 (1980).
3. M. C. Yang, L. E. Scriven and C. W. Macosko, *J. Rheol.*, **30**, 1015 (1986).
4. H. Kanai and T. Amari, *Rheol Acta*, **34**, 303 (1995).
5. H. Gokturk and K. Maki, *J. Magn. Magn. Matr.*, **154**, 279 (1996).
6. R. C. Navarrete, L. E. Scriven and C. W. Macosko, *J. Colloid Interface Sci.*, **180**, 200 (1996).
7. H. J. Choi, Y. D. Park, P. L. Frattini and M. S. Jhon, *J. Appl. Phys.*, **75**(10), 5579 (1994).
8. T. M. Kwon, P. L. Frattini, L. N. Sadani and M. S. Jhon, *Colloids Surfaces*, **80**, 47 (1993).
9. M. S. Jhon, T. M. Kwon, H. J. Choi and T. E. Karis, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**, 3027 (1996).
10. T. M. Kwon, M. S. Jhon and H. J. Choi, *Bull. Korean Chem. Soc.*, **18**, 767 (1997).
11. T. E. Karis and M. S. Jhon, *J. Appl. Phys.*, **64**, 5843 (1988).
12. T. E. Karis and M. S. Jhon, *Colloids Surfaces*, **53**, 393 (1991).
13. T. M. Kwon, M. S. Jhon, H. J. Choi and T. E. Karis, *Colloids Surfaces*, **80**, 39 (1993).
14. T. M. Kwon, H. J. Choi and M. S. Jhon, *J. Magnetics Soc. Japan*, **18**(s1), 253 (1994).
15. B. van der Vorst, D. van den Ende, N. J. J. Aelmanns and J. Mellema, *Phys. Rev. E*, **56**, 3119 (1997).
16. I. M. Krieger and T. J. Dougherty, *Trans. Soc. Rheol.*, **3**, 137 (1959).
17. M. Mooney, *J. Colloid Sci.*, **6**, 162 (1951).
18. C. W. Macosko, *Rheology: Principles, measurements and applications*, VCH Publishers, New York, 1994, p.425-474.
19. H. Brenner, *Int. J. Multiphase Flow*, **1**, 195 (1974).
20. R. Simha, *J. Phys. Chem.*, **44**, 25 (1940).
21. L. G. Leal and E. J. Hinch, *J. Fluid Mech.*, **46**, 685 (1971).
22. H. L. Frisch and R. Simha, "The Viscosity of Colloidal Suspensions and Macromolecular Solutions", in *Rheology: Theory and Applications*, ed. F. R. Eirich, **1**, 525-613, Academic Press, New York (1956).
23. R. J. Farris, *Trans. Soc. Rheol.*, **12**, 281 (1968).
24. H. A. Barnes, J. F. Hutton and K. Walters, "An Introduction to Rheology", Elsevier, New York (1989).
25. T. M. Kwon, M. S. Jhon and H. J. Choi, *Materials Chem. Phys.*, **49**, 225 (1997).

26. T. L. Smith and C. A. Bruce, *J. Colloid Interface Sci.*, **72**, 13 (1979).
27. T. M. Kwon, M. S. Jhon and H. J. Choi, *J. Molecular Liquids*, **75**, 115 (1998).
28. R. J. Hunter, Foundations of Colloid Science, Vol. 1; Clarendon Press : Oxford, (1989).