

수분 활성화 실리카 겔 분산계의 전기유변학적 특성

안병길 · 최웅수 · 권오관 · 문탁진*

한국과학기술연구원 Tribology Center
*고려대학교 재료금속공학부

Electrorheological Properties of Water Activated Silica Gel Suspensions

Byung-Gil Ahn, Ung-Soo Choi, Oh-Kwan Kwon and Tak-Jin Moon*

Tribology Center, Korea Institute of Science and Technology
*Department of Material Science and Engineering, Korea University

Abstract—The electrorheological (ER) behavior of suspensions in silicone oil of silica gel powder (average particle size 49 μm) absorbed water was investigated at room temperature with electric fields up to 2.4 KV/mm. In this paper, for development of successful ER fluids used for wide temperature range later, we would like to know a fundamental understanding of water on ER effect. As a first step, the ER fluids involving water activated silica gel were measured not only the electrical characteristics such as dielectric constant, current density and electrical conductivity but also the rheological properties on the strength of electric field, the quantity of dispersed phase and absorbed water. From the experimental results that water absorbed to the particles directly affects to the surface charge density of electric double layer model proposed by Schwarz and makes dielectric constant and current density of ER fluids increase. The current density and dynamic yield stress (τ_y) of water activated silica gel suspensions was in exponential proportion to the strength of electric field, the quantity of dispersed phase and absorbed water. And the optimum water quantity and weight concentration of silica gel for electrorheological effect were 4~5 wt% and 15 wt%, respectively.

Key words—electrorheological fluid, dynamic yield stress, dielectric constant, current density, electrical conductivity.

1. 서 론

물질의 변형과 흐름에 대한 전기장의 영향은 오랜 기간 동안 연구자들에게 흥미로운 주제로 인식되어 왔다. 최근에 이르러서는 이와 같은 전기장의 효과에 관한 분야로써 ER 효과(electrorheological effect)가 새로운 관심을 끌고 있으며, 이러한 효과는 1947년에 미국의 Willis Winslow에 의해 발견되었기 때문에 "Winslow 효과"라 불리워지기도 한다. Winslow는 미량의 수분이 첨가된 실리카 현탁액(suspensions)과 같은 2상 용액에 강한 전기장이 가해지면 현탁액의 고체화가 급속히 나타나는 현상을 발견하였으며, 이러

한 형태의 반응이 개선된 밸브나 댐핑기구 등과 같은 기전요소에 응용될 수 있음을 발표하였다[1,2].

그러나 전기유변성유체(electrorheological fluid, ER fluid)가 갖는 본질적인 문제점, 즉 2상 용액이 갖는 가장 큰 단점인 침전 현상에 기인하는 소재의 불안정성 등으로 인하여 1970년대까지는 연구자의 관심을 끌지 못하였으나 1980년대 들어서면서 이러한 유체가 갖는 폭 넓은 응용성으로 인해 미국, 영국 및 일본 등과 같은 선진 여러 나라에서 우수한 성능의 ER 유체 개발 연구와 함께 이러한 소재를 이용한 응용장치의 연구가 활발히 진행되고 있다. ER 유체의 개발 분야는 절연 오일 내에 분산되어 있는 미세 입자가 외부로

부터 전기장이 가해질 때 형성하는 체인 구조를 설명하기 위해 유전율 또는 전기전도도를 기초로 한 ER 현상 모델링 연구와 함께 외부 전기장의 변화에 따른 ER 유체의 빙햄(Bingham) 거동 특성을 설명하려는 역학적 특성의 규명 연구가 진행되고 있다[3-5]. 우수한 성능의 ER 소재를 개발하기 위한 연구에서는 기존의 수분 활성화 ER 유체가 갖는 사용 온도의 한계성을 극복하기 위한 우수 ER 유체 개발, 즉 외부로부터의 전기장 부하시 발생하는 유발 쌍극자 모멘트(induced dipole moment) 변화가 우수한 물질을 첨가한 고온용 ER 유체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[6]. 또 다른 연구 분야로는 외부 전기장의 강도에 따라서 ER 유체의 가점성(apparent viscosity)이 변하는 성질을 이용한 기전요소 부품으로의 응용분야이다. Winslow에 의해 최초로 발명된 ER 클러치가 자동차 산업계의 큰 관심을 끌었으며, 현재까지도 ER 클러치와 ER 댐핑은 자동차 산업계가 큰 관심을 갖고 있는 분야이다. 그러나 ER 유체를 사용한 ER 클러치의 경우, 실제 자동차의 클러치에 적용하기 위해서는 충분한 토르크를 공급해야 하며 그렇기 위해서는 ER 장치가 비현실적인 규격(0.5×0.5 M 또는 0.1×14 M)을 지녀야 하는 문제점을 가지고 있다[7]. 이러한 문제점 때문에 ER 유체가 실제의 자동차에 응용될 수 있는 분야는 충격완화장치(shock absorber)와 엔진마운트(engine mount)로 한정되어진다. 그 밖에도 밸브, 박막 변환기(membrane transducer) 및 연동펌프(peristaltic pump) 등과 관련한 적용 연구가 진행되고 있다[8].

이와 같이 ER 효과가 갖는 무한한 잠재력을 현실화시키는데 있어서 가장 중요한 요소는 전기장에 대한 응답성이 우수한 새로운 ER 유체를 개발하는 것이다. 즉 우수한 ER 반응과 낮은 전기전도도를 나타내며, 고온에서도 안정적인 ER 효과를 나타내는 ER 유체가 연구목표라 하겠다. 현재 세계 여러 나라에서 광범위하게 진행되고 있는 비수계 ER 유체 개발 연구의 궁극적인 목적은 고온용 ER 유체를 개발하기 위해 연구가 수행되고 있다. 따라서 수분 활성화된 ER 유체의 경우에 있어서도 고온인 100°C 이상에서 나타나는 ER 효과의 감소가 보완될 수 있다면 수분 활성화 소재가 포함된 고온용 ER 유체의 개발도 충분히 가능하리라 생각된다.

본 연구에서는 고온용 ER 유체의 개발 연구에 앞서 수분 활성화된 실리카 겔이 첨가된 ER 유체의 전기유변

학적 성질을 고찰하고자 하였다. ER 유체의 유전상수(dielectric constant), 전류밀도(current density) 및 전기전도도(electrical conductivity) 등을 측정하였으며 아울러 ER 효과를 증대시키는데 있어서의 수분의 역할과 그에 따른 ER 유체의 특성 등을 조사하였다. 측정된 ER 유체의 전기적 성질을 유변 특성과 연관시키므로써 ER 유체의 모델링에 대한 기초 자료를 제시하고자 하였으며, 이는 향후 수행될 고온용 ER 유체 개발 연구에 대한 기초 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험

2-1. 전기유변성 유체 제조

실험에 사용된 실리카 겔 분산액은 평균 입자 크기가 49 μm, 기공의 지름이 60 Å인 실리카 겔(Sigma Chemical Co, 230~400 mesh) 분말과 1 kHz에서의 유전상수가 2.6인 50 cS 실리콘 오일(Shin-Etsu Silicone)을 혼합하여 제조하였다. 실리카 겔 분말의 기공에 일정량의 수분을 흡착시키기 위해 습도와 온도 조절이 가능한 가열식 볼-밀 박스(heating ball mill box)를 사용하였다. 볼-밀 박스내의 볼-밀 통에 건조시킨 실리카 겔 분말을 넣고 일정한 습도와 회전 속도로 일정 시간 동안 유지시켜 실험에 사용할 수분 흡착 실리카 겔 분말을 준비하였다. 흡착된 수분의 양은 다음의 식에 의해 계산하였다.

$$M = \frac{W - W'}{W} \times 100 \quad (1)$$

윗 식에서 W는 수분 활성화된 실리카 겔 분말의 무게이며, W'는 수분 활성화된 실리카 겔을 110°C의 진공 오븐에서 5시간 동안 건조시킨 후 측정된 무게이다. 이상과 같은 수분 활성화 방법을 이용하여 수분을 함유하지 않은 분말부터 약 9 wt%의 수분이 함유된 분말을 제조하였다. 절연 오일로 사용된 50 cS 실리콘 오일은 110°C의 온도를 갖는 진공 오븐내에 molecular sieve와 함께 24시간 동안 유지시키므로써 오일내의 수분을 완전히 제거하였다.

일정량의 수분을 흡착한 실리카 겔 분말과 수분이 완전히 제거된 50 cS 실리콘 오일을 무게 중량비로 혼합한 후, 미립자 분산을 위한 12시간 동안의 볼-밀 과정을 거쳐 실험에 사용할 ER 유체를 제조하였다.

2-2. 전기유변학적 특성 측정

실리카 겔 분산계의 전기적 특성을 고찰하기 위해 유체의 유전상수와 전류밀도 등을 측정하였다. 유체의 유전상수 측정은 25°C, 1 kHz의 조건하에서 LCR 미터(Hewlett Packard, HP 4263B)를 사용하였으며, 전류밀도 측정을 위해 사용된 전극의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 0.5~4.5 KV/mm의 DC 전기장에 대한 유체의 전류밀도($\mu\text{A}/\text{cm}^2$, j_f)를 측정하여 실리카 겔 분산계의 전기전도도(σ_f)를 계산하였으며, 그 계산식은 아래와 같다.

$$\sigma_f = \frac{\Delta E}{\Delta j_f} \quad (2)$$

수분 활성된 실리카 겔(25 wt%)과 50 cS 실리콘 오일(75 wt%)이 혼합된 실리카 겔 분산계의 전류밀도와 전기전도도 및 유전상수를 측정하므로써 수분이 ER 유체의 전기적 성질에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 아울러 일정량의 수분(4.29 wt%)을 흡착하고 있는 실리카 겔의 첨가량을 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 wt%로 증가시켜, 분산 미립자의 첨가량 증가에 따른 ER 유체의 전기적 특성 변화를 관찰하였다.

실리카 겔 분산계의 유변 특성을 고찰하기 위해 고전압 발생기(KEITHLEY, Model 248)가 부착된 couette cell 형태의 점도계(Rheology International Viscometer, England)를 사용하였으며, 고전압 발생기로부터 만들어진 DC 전압이 cup과 bob의 양면에 가해지도록 제작하였다. 유변 시험전에 전기장을 약 10초동안 가하

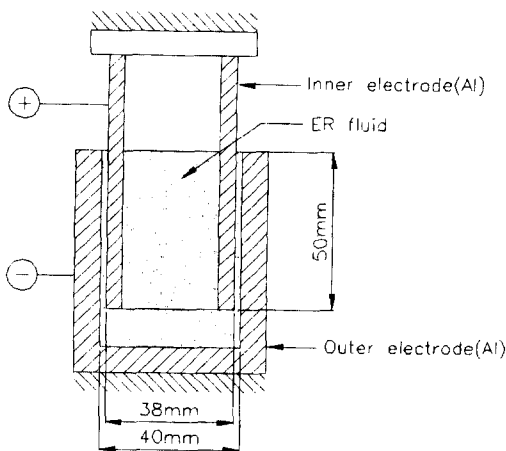


Fig. 1. Schematic diagram of electrode for measuring the current density of ER fluid.

여 ER 유체내의 미립자 사슬 형성이 정상 상태에 도달하도록 한 후, 일정한 전기장하에서 전단변형률(shear rate)을 증가시키면서 전단응력(shear stress)을 측정하여 그래프로 나타내었으며 측정된 전단변형률-전단응력 그래프로부터 전기유변성 유체의 동적항복응력(dynamic yield stress)을 얻을 수 있었다. 전기유변 실험의 정확성을 유지하도록 하기 위하여 분산계를 매번 재분산 시킨 후, 위의 실험 과정을 반복 수행하였다. 실험은 모두 25°C에서 진행되었으며, 유체의 유변 특성에 영향을 끼칠 수 있는 전기장의 강도, 미립자 첨가량, 전기전도도 및 실리카 겔의 수분 활성도 등에 따른 전기유변학적 물성을 측정하였다.

ER 유체의 경우 전기장에 반응하여 나타나는 겔보기 점도와 전기장이 가해지지 않은 상태에서 나타내는 겔보기 점도의 비가 매우 중요하다. 이러한 특성을 시험하기 위하여 "전기유변효과(electrorheological effect or relative shear stress, τ_R)"를 측정하였으며, 유체의 전기유변효과(τ_R)는 τ 와 τ_0 의 비로 표현되는 τ/τ_0 로 계산하였다. τ 는 전기장하에서, τ_0 는 전기장이 가해지지 않은 상태에서의 전단응력(shear stress)를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 전기적 특성

본 연구에서 제조한 수분 활성 실리카 겔 분산계의 전류밀도(j_f)를 측정하여 Fig. 2, 3, 4에 각각 도시하였다. Fig. 2는 수분의 흡착량을 달리한 실리카 겔 분말이 25 wt%, 수분을 완전히 제거한 50 cS 실리콘 오일이 75 wt%의 일정한 비율로 혼합된 실리카 겔 분산계의 전류밀도와 외부에서 가해진 전기장의 세기와의 관계를 알아보기 위하여 수행하였으며, Fig. 3은 일정한 전기장하에서 실리카 겔의 수분 흡착량 변화에 따른 분산계의 전류밀도와 전기전도도를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 4는 일정량의 수분(4.29 wt%)을 흡착시킨 실리카 겔의 첨가량 증가에 따른 유체의 전류밀도와 전기전도도 변화를 측정하여 도시한 것이다. Fig. 2, 3의 그래프에서 보면, 같은 양의 실리카 겔이 분산된 유체일지라도 흡착된 수분의 양에 따라 전류밀도와 전기전도도가 높게 측정됨을 알 수 있었다. 또한 외부로부터 가해지는 전기장의 세기와 실리카 겔의 수분 흡착량이 증가할수록 수분이 흡착된 실리카 겔 분산계의 전류밀도는 지수함수적으로 증가

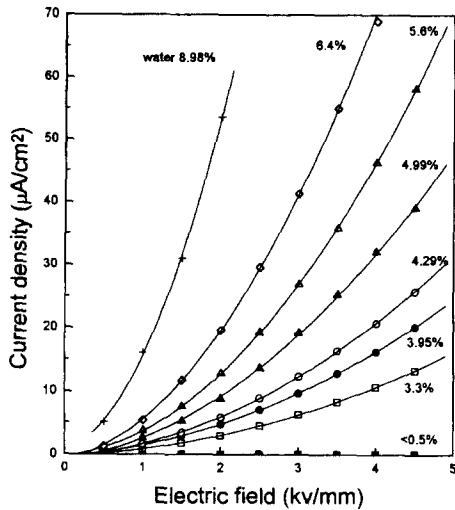


Fig. 2. Current density responses of silica gel ER fluids on the various electric fields under room temperature (25 wt% in 50 cS silicone oil).

함을 관찰할 수 있다. 일정량의 수분을 흡착하고 있는 실리카 겔 분산계의 전기전도도는 미립자의 첨가량에 비례함을 알 수 있으며, 유체의 전류밀도는 분산 미립

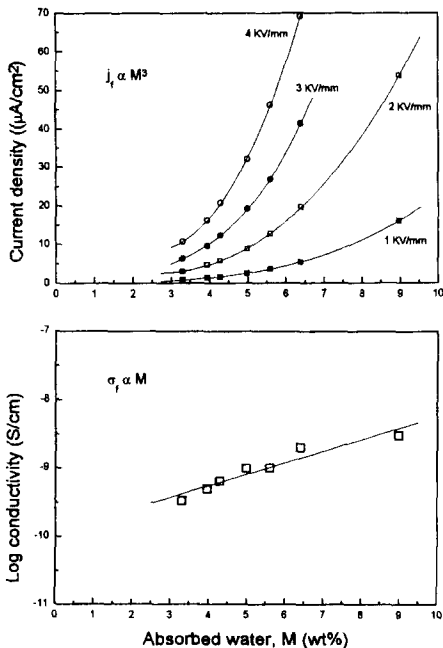


Fig. 3. Current density (j_f) and conductivity (σ_f) of silica gel ER fluids on the absorbed water under room temperature (25 wt% in 50 cS silicon oil).

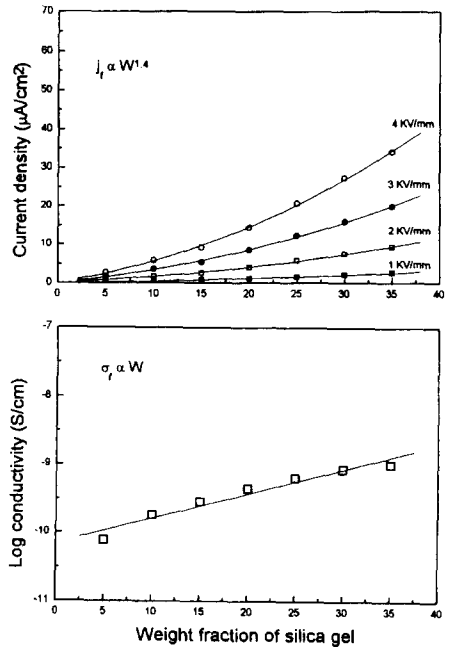


Fig. 4. Current density (j_f) and conductivity (σ_f) of silica gel ER fluids on the weight fraction of silica gel under room temperature (4.29% water absorbed silica gel in 50 cS silicone oil).

자 첨가량에 대하여 지수함수적으로 증가함을 Fig. 4에서 관찰할 수 있었다. 즉 수분 활성화된 실리카 겔 분산계에서 유체의 전류밀도는 전기장의 세기($j_f \propto E^{1.4}$), 수분 흡착량($j_f \propto M^{3.11}$) 및 분산 미립자 첨가량($j_f \propto W^{1.4}$)에 지수함수적으로 비례하였으며, 분산계의 전기전도도는 수분 흡착량($\sigma_f \propto M$)과 분산 미립자 첨가량($\sigma_f \propto W$)이 증가할수록 증가하는 비례관계임을 관찰할 수 있다.

Schwarz [9]는 구형 미립자 분산계에서의 유전상수 (dielectric constant, $\Delta\epsilon$) 증가를 다음의 식으로 나타내었으며,

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\epsilon_0}{2 \cdot \ln \xi_0^{-1}} \cdot \ln \frac{\xi_0^{-5} + \omega^2 \tau_m^2}{\xi_0 + \omega^2 \tau_m^2} \quad (3)$$

유전손실(dielectric loss, $\Delta\epsilon''$) 증가는 아래와 같이 나타내었다.

$$\Delta\epsilon'' = \frac{\Delta\epsilon_0}{\ln \xi_0^{-1}} \tan^{-1} \frac{1 - \xi_0}{\xi_0^{1/2}} \cdot \frac{\omega \tau_m}{1 + \omega^2 \tau_m^2} \quad (4)$$

윗 식에서 $\tau_m = 1/2\pi f$, $\xi_0 = e^{\omega/kT}$, ω 는 교류의 각 주파수

(angular frequency), f 는 정의된 특정 주파수를 나타내며, $\Delta \epsilon_0$ 는 정적인 유전상수(static dielectric constant)의 증가분으로 다음과 같다.

$$\Delta \epsilon_0 = \frac{9}{4} \cdot \frac{\varnothing}{(1 + \varnothing/2)^2} \cdot \frac{e_0^2 R \sigma_0}{\epsilon_r kT} \quad (5)$$

윗 식에서 \varnothing 는 분산 미립자의 부피 비율, ϵ_r 는 공기의 유전상수, σ_0 는 전기 이중층(electric double layer)에서의 표면충전밀도(surface charge density), e_0 는 절연 오일의 전기 충전값(electric charge), R 은 분산 미립자의 반경, k 는 볼츠만 상수(Boltzmann constant), T 는 절대 온도이다.

식 (3)에서 유전상수 증가분($\Delta \epsilon$)은 정적 유전상수 증가분 ($\Delta \epsilon_0$)에 비례함을 알 수 있다. 만약 T , f 및 α 의 값이 일정하다면 구형 미립자 분산계의 유전상수는 $\Delta \epsilon_0$ 에 비례할 것이다.

식 (5)에서 부피 비율 \varnothing 가 작고 T , R 및 e_0 가 일정하다면, $\Delta \epsilon_0$ 는 부피 비율 \varnothing 와 표면충전밀도 σ_0 에 비례할 것이다. 즉,

$$\Delta \epsilon_0 \propto \varnothing \cdot \sigma_0 \quad (6)$$

Fig. 5, 6은 수분 활성 실리카 겔 분산계의 유전 거동(dielectric behavior)에 대한 결과를 나타낸 것이다.

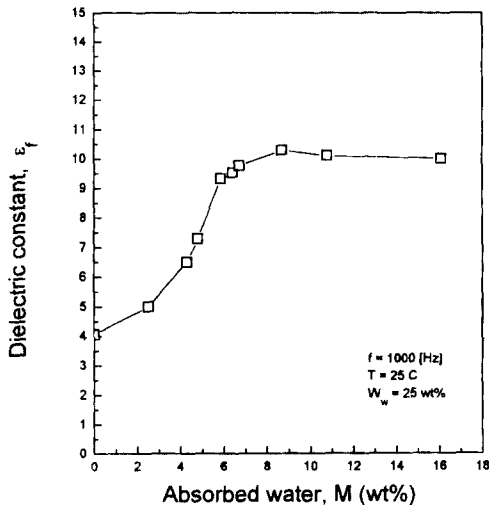


Fig. 5. Correlation between the dielectric constant and the fraction of absorbed water (25 wt% silica gel in 50 cS silicone oil).

Fig. 5에서 실리카 겔의 수분 흡착량이 증가함에 따라 전기유변성 유체의 유전상수 값은 수분이 6 wt%가 흡착될 때까지는 비례적으로 증가하였으나 수분 흡착량이 6 wt%를 넘어서면서 증가폭이 완만하게 된 후, 10 wt% 이상에서는 거의 일정하게 유지됨을 관찰할 수 있다. 이는 실리카 겔의 수분 흡착량이 증가할수록 실리카 겔의 무게 역시 증가하기 때문이라 사료된다. 일정 중량(25 wt%)의 실리카 겔을 첨가한 ER 유체를 제조하였기 때문에 수분의 흡착량이 증가할수록 분산된 실리카 겔의 첨가량은 감소하는 것에 기인한다고 생각된다. 따라서 수분 흡착량이 6 wt% 이상 첨가될 경우, 수분 흡착량의 증가에 따른 유체의 유전상수 값 변화는 크지 않음을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 다음에 설명하는 실리카 겔 분산계의 항복응력 측정 결과를 설명하는데 인용할 수 있었다.

Fig. 6은 수분 흡착량(4.29 wt%)을 일정하게 유지한 후, 실리카 겔 첨가량의 증가에 따른 분산계의 유전상수 변화를 측정하여 도시한 것이다. 실리카 겔 분산계의 유전상수는 실리카 겔의 첨가량에 대하여 비례적으로 증가함을 관찰할 수 있었다.

위의 실험을 수행한 후, 실리카 겔 분산계의 유전상수는 수분 흡착량(M , 10 wt% 이내)과 실리카 겔 첨가량(W_w)에 비례함을 알 수 있었으며, 유체의 유전상수 (ϵ)는 유전상수 증가량 ($\Delta \epsilon_0$)에 비례하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

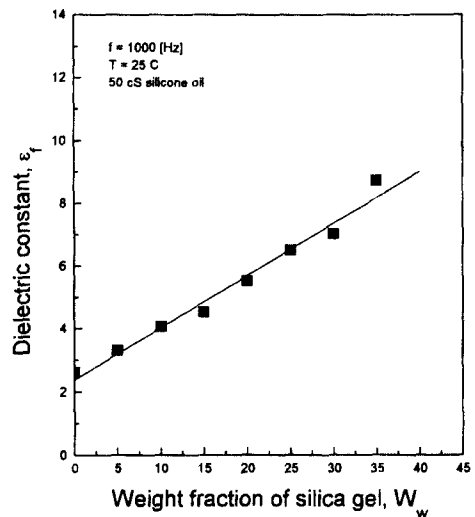


Fig. 6. Correlation between the dielectric constant and the weight fraction of 4.29% water absorbed silica gel.

$$\Delta \epsilon_0 \propto W_w \cdot M \quad (7)$$

따라서 식 (6)과 (7)에서 수분 흡착량(M)은 실리카 겔 분산계의 유전상수, 전기 이중층에서의 표면충전 밀도(σ_0) 등과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

3-2. 유변 특성

실리카 겔 분산계의 초기 점도(η_0), 즉 전기장이 가해지지 않은 상태하에서 측정되는 유체의 가점도가 ER 유체의 전기유변효과에 영향을 미치므로 실리카 겔 분산계의 초기 점도를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 도시하였다. 일정량의 실리카 겔이 실리콘 오일에 첨가될 경우, 수분의 흡착량이 증가할수록 유체의 초기 점도는 감소하는 현상을 나타내고 있다. 이는 흡착시킨 수분량이 증가함에 따라 실리카 겔 입자의 무게 역시 증가하기 때문에 일정량의 실리카 겔을 첨가할 경우 순수한 실리카 겔의 첨가량이 감소하는 것에 기인된 것이라 사료된다.

Fig. 8은 2.0 KV/mm의 전기장하에서 수분 활성화된 실리카 겔 분산계의 전단응력-전단변형률 변화를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 수분 활성화 실리카 겔 분산계에 전기장이 가해질 경우 빙행(Bingham)거동을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 일정량의 실리카 겔이 첨가된 수분 활성화 실리카 겔 분산계의 전단응력

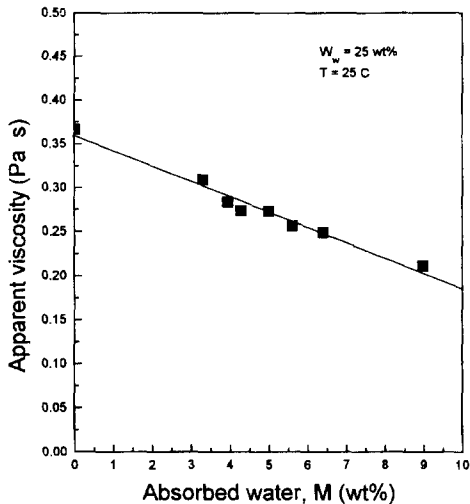


Fig. 7. Apparent viscosity of silica gel ER fluids on the fraction of absorbed water without electric field (25 wt% in 50 cS silicone oil).

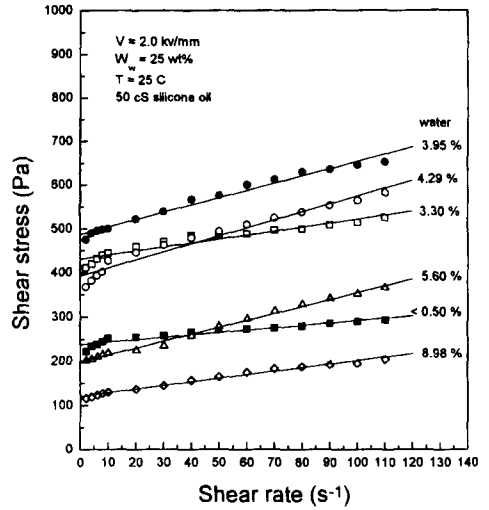


Fig. 8. Shear stress vs shear rate for water absorbed silica gels in 50 cS silicone oil at 2.0 kv/mm.

은 흡착된 수분의 양과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 건조된 실리카 겔의 경우 비교적 낮은 전단응력을 나타내었으나 수분 흡착량이 증가함에 따라 전단응력이 증가하는 현상을 보이고 있다. 수분의 흡착량이 3.95% 일 때 가장 큰 전단응력을 나타내었으며, 수분이 5% 이상 흡착될 경우에는 수분 흡착량이 증가함에 따라 전단응력이 급격히 감소함을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 앞 절에서 설명한 전기적 특성 결과로 설명될 수 있다. 유체의 유전상수는 수분 흡착량이 약 6%가 될 때 까지는 증가하였으나 그 이상 첨가 시 거의 일정한 값을 나타내고 있음을 Fig. 5에서 볼 수 있다. 실리카 겔 분산계의 전류밀도가 4.5 KV/mm에서 $20 \mu A/cm^2$ 이상일 경우 외부로부터의 전기장 부하시 두 전극 사이의 ER 유체에 전류가 통과하여 발생하는 non-ohmic 현상이 발생되며, 이는 가해준 외부 전기장의 전압구배를 낮추는 작용이 나타남을 고전압 발생기의 전압계로부터 확인할 수 있었다. 따라서 수분이 5% 이상 흡착될 경우 분산계가 갖는 높은 전류밀도에 의해 가해준 외부 전기장의 전압구배가 감소되며, 이는 곧 전단응력의 감소로 이어짐을 관찰할 수 있다. 따라서 가장 높은 전단응력을 나타내는 수분 활성화 실리카 겔 분산계의 수분 흡착량은 약 4~5%임을 알 수 있다.

Fig. 9, 10은 Fig. 7, 8의 결과로부터 얻어진 수분 활성화 실리카 겔 분산계의 전기유변효과(τ/τ_0)를 나타낸

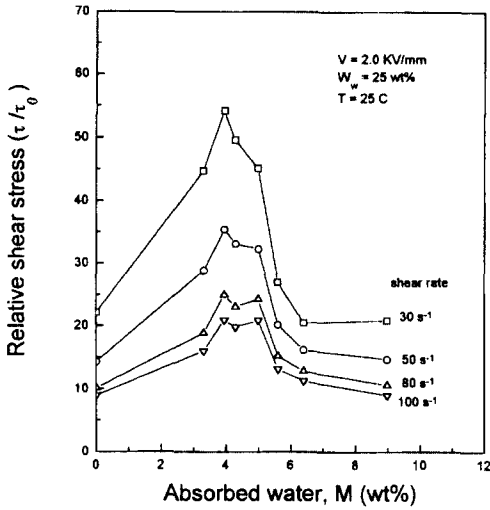


Fig. 9. Relative shear stress responses of silica gel ER fluids on the fraction on absorbed water under room temperature (25 wt% in 50 cS silicone oil).

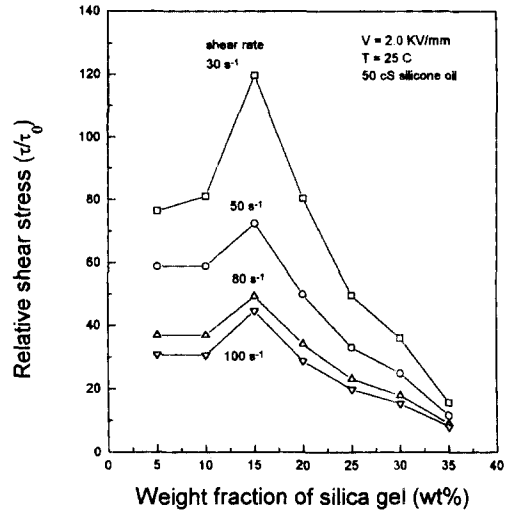


Fig. 10. Relative shear stress responses of 4.29% water absorbed silica gel ER fluids on the various silica gel concentrations.

것이다. Fig. 9는 수분 흡착량의 변화에 따른 실리카 겔 분산계의 전기유변효과 측정 결과로 전단변형률을 달리하여 나타낸 것이다. 수분이 4-5% 흡착되었을 때 가장 높은 전기유변효과를 나타내었으며, 5% 이상 수분이 흡착될 경우 유체의 전류밀도 증가에 기인된 전단응력의 감소로 인해 전기유변효과가 급격히 감소함을 관찰할 수 있다. Fig. 10은 수분 활성된 실리카 겔의 첨가량 변화에 따른 유체의 전기유변효과를 측정하여 나타낸 것이다. 본 연구에서 사용한 실리카 겔의 경우, 15 wt%가 첨가될 때 가장 높은 전기유변효과를 나타내었으며 15 wt% 이상 첨가될 때에는 실리카 겔의 첨가량이 증가됨에 따라 분산계의 전기유변효과가 급격히 감소하였다. 이러한 현상은 실리카 겔의 첨가량이 증가되면서 측정된 초기 전단응력(τ_0), 즉 전기장이 가해지지 않은 상태에서의 전단응력 증가량과 전기장하에서의 전단응력(τ) 증가량을 비교할 때, 15 wt% 때까지는 전기장하에서의 전단응력 증가량이 전기장이 가해지지 않은 상태에서의 전단응력 증가량 보다 더 크게 나타나고 있으나 15 wt% 이상 첨가시에는 전기장이 가해지지 않은 상태에서의 전단응력, 즉 초기 전단응력의 증가량이 더 크기 때문이라 사료된다.

응력 변화를 2.0 KV/mm의 전기장하에서 전단변형률을 1 s⁻¹에서 110 s⁻¹까지 증가시키면서 측정한 것이다. 수분 활성 실리카 겔 분산계가 전기장하에서 빙햄 거동을 보이고 있으며, 실리카 겔의 첨가량이 증가할수록 전단변형률에 대한 전단응력의 세기와 빙햄 거동시 나타나는 전단응력-전단변형률 그래프에서의 기울기, 즉 유체의 소성 점도(plastic viscosity) 역시 증가하

Fig. 11은 수분 흡착량을 4.29 wt%로 일정하게 유지시킨 실리카 겔의 첨가량 변화에 따른 분산계의 전단

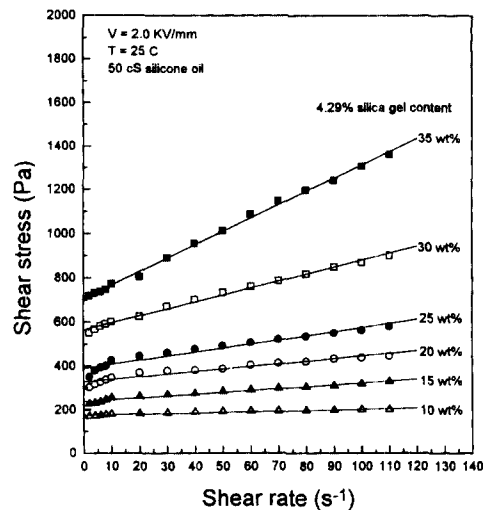


Fig. 11. Shear stress vs shear rate for silica gel content in 50 cS silicone oil under 2.0 kv/mm.

었다. 실리카 겔이 적게 첨가된 분산계에서는 일정한 전기장하에서 전단변형률이 증가하여도 전단응력의 크기는 증가하지 않고 거의 일정하게 나타나는 것을 관찰할 수 있다. 이는 전극간을 연결하고 있는 실리카 겔의 사슬 구조가 충분한 인력을 갖지 못하여 전단변형률이 증가함에 따라 끊어지는 현상이 발생되기 때문이라 사료된다. 실리카 겔의 첨가량이 증가하면 할수록 전단변형률의 증가에 기인한 실리카 겔 사슬의 단절 현상보다 실리카 겔의 첨가량 증가에 기인하는 사슬 구조의 재배열 현상이 더 크게 작용하기 때문이라 생각된다.

Fig. 12, 13은 상온에서 수분 활성 실리카 겔 분산계의 동력학적 항복응력(dynamic yield stress)을 전기장의 함수로 나타낸 것이다. 각 분산계의 동력학적 항복응력은 전단응력-전단변형률 그래프에서 전단변형률을 0으로 외삽시키므로써 일정한 값을 취할 수 있었다. Fig. 12는 수분 흡착량의 변화에 따른 실리카 겔 분산계의 동력학적 항복응력을 전기장의 함수로 나타낸 것이다. 많은 연구가들이 전기장의 세기가 ER 유체의 동력학적 항복응력에 미치는 영향을 조사해 왔으며, 그 일반적인 관계식은 다음과 같다[10].

$$\tau_y = AE^m \tag{8}$$

일반적으로 ER 유체의 항복응력은 전기장의 제곱승

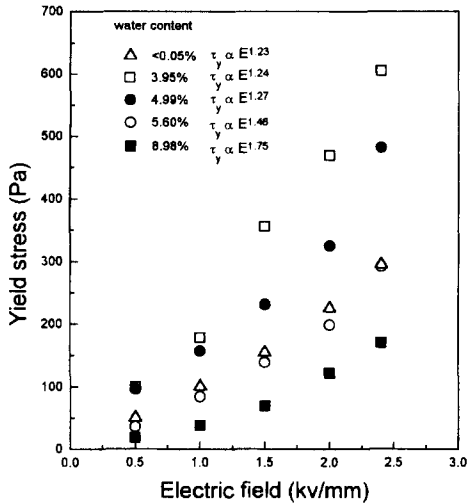


Fig. 12. Correlation between the yield stress and the electric field on the absorbed water content (25 wt% in 50 cS silicone oil).

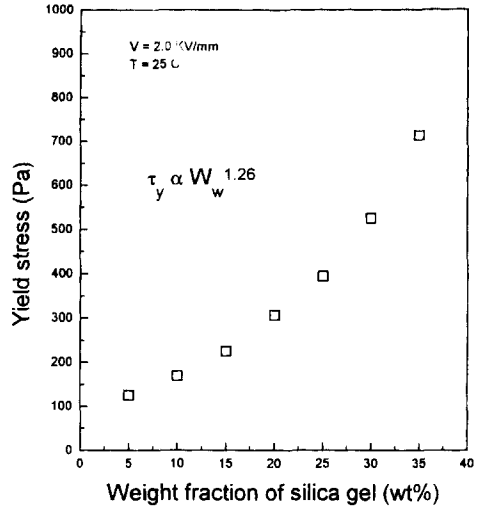


Fig. 13. Correlation between the yield stress and the weight fraction at 2.0 kv/mm (4.29% water absorbed silica gel, 50 cS silicone oil).

에 비례한다고 알려져 왔으나 많은 경우의 실험에서 항복응력이 이러한 E2 의 의존성으로부터 벗어나는 현상들이 보고되고 있다. 본 연구에서 사용한 수분 활성 실리카 겔 분산계의 경우, m 의 값이 1.23~1.75로 나타남을 알 수 있었으며, 실리카 겔의 수분 흡착량이 증가할수록 전기장에 대한 의존성을 나타내는 m 의 값이 증가하여 2에 근접하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 13은 실리카 겔의 첨가량 변화에 따른 분산계의 동력학적 항복응력을 전기장의 함수로 나타낸 것으로 수분 활성 실리카 겔 분산계의 동적 항복응력(τ_y)이 분산 미립자인 수분 활성 실리카 겔의 첨가량(W_w)에 지수함수적으로 비례함을 보여준다($\tau_y \propto W_w^{1.26}$).

4. 결 론

본 연구에서는 상용성이 가능한 고온용 ER 유체의 개발 연구를 수행하기에 앞서 ER 유체내에서 작용하는 수분의 기능에 대한 기본적 이해를 도모하고자 하였으며, 수분 활성 실리카 겔 분산계의 전기유변학적 특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1. 수분이 활성화된 실리카 겔 분산계의 전류밀도(j_f)는 전기장의 세기($j_f \propto E^{1.8}$), 수분 흡착량($j_f \propto M^{3.6}$) 및 분산 미립자의 첨가량($j_f \propto W_w^{1.4}$)에 지수함수적으로

비례하였으며, 실리카 겔 분산계의 전기전도도(σ_f)는 수분 흡착량($\sigma_f \propto M$)과 분산 미립자의 첨가량($\sigma_f \propto W_w$)에 비례하였다.

2. 실리카 겔 분산계의 유전상수는 실리카 겔의 수분 흡착량과 실리카 겔의 첨가량에 비례하였으며, 실리카 겔의 수분 흡착량은 분산계의 유전상수 및 전기 이중층에서의 표면충전밀도 등과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

3. 일정한 전기장하에서 가장 높은 전단응력을 나타내는 실리카 겔 분산계의 수분 흡착량은 4~5%임을 알 수 있었으며, 수분 흡착량이 5 wt% 이상일 경우 전류 밀도의 증가에 기인된 외부 전기장의 전압구배 감소가 발생되어 전단응력의 급격한 감소가 발생되었다.

4. 일정량의 수분이 활성화된 실리카 겔을 포함한 실리카 겔 분산계의 전기유변효과(τ/τ_0)는 수분 흡착량(M)은 4~5 wt%, 실리카 겔 첨가량(W_w)은 15 wt% 일 때 가장 높게 측정되었다.

5. 본 연구에서 사용된 수분 활성화 실리카 겔 분산계의 동력학적 항복응력(τ)은 전기장(E)과 실리카 겔의 첨가량(W_w)에 대하여 각각 지수함수($\propto E^{1.23-1.75}$, $\propto W_w^{1.26}$)적으로 증가함을 알 수 있었다.

기호설명

- E : 전기장 강도
- j_l : ER 유체의 전류밀도($\mu A/cm^2$)
- σ_f : ER 유체의 전기전도도
- τ_0 : 전기장이 가해지지 않은 상태에서의 ER 유체 전단응력
- τ : 전기장이 가해진 상태에서의 ER 유체 전단응력
- τ_R : 전기유변효과(τ/τ_0)
- $\dot{\gamma}$: ER 유체의 전단변형률
- τ_y : ER 유체의 동적항복응력
- M : 수분 흡착량
- W_w : 실리카 겔 첨가량
- $\Delta \epsilon$: 유전상수 증가분
- $\Delta \epsilon_0$: 정적인 유전상수의 증가분

- ϵ_r : 공기의 유전상수
- σ_0 : 전기 이중층에서의 표면충전밀도
- ϵ_0 : 절연 오일의 전기 충전값
- R : 분산미립자의 반경
- k : 볼츠만 상수
- T : 절대 온도
- α : 활성화 에너지
- \emptyset : 분산미립자의 부피 분율

참 고 문 헌

1. Winslow, W.M., "Induced Fibration Suspension," J. of Physics. Vol. 20, pp. 1137-1140, 1949
2. Winslow, W.M., U.S. Patent 2661596, 1953
3. Jones, T.B., "Orientation of Particle Chains in AC Electric Fields," Proceedings of Second International Conference on ER fluid, pp. 14-25, 1990
4. Tetsuo Miyamoto and Motonori Ota, "Theoretical and Experimental Study on ERF's Yield Stress," The Japan Society of Mechanical Engineers, Part B, Vol. 59, No. 562, pp. 1822-1828, 1993
5. Felici, N., Foulc, J.N., and Atten, P., "A Conduction Model of Electrorheological Effect," Proceedings of the Fourth International Conference on ER fluid, July 20-23, pp. 139-152, 1993
6. Filisko, F.E., "Rheological Properties and Models of Dry ER Materials," Proceedings of the International Conference on ER fluid, 15-16 October, 1991, Carbondale, Illinois, USA, pp. 116-128
7. Duclos, T.G., "Design of Devices Using Electrorheological Fluids," Soc. Automotive Eng. Tech. Paper Ser No. 881134, pp. 1-5, 1988
8. Gorodkin, R.G., Korobko, Ye. V., Blokh, G.M., Gleb, V.K., Sidorova, G.I. and Ragothar, M.M., "Applications of Electrorheological Effect in Engineering Practice," Fluid Mech. Sov. Res., Vol. 4, pp. 48-61, 1979
9. Schwarz, G., J. Phys. Chem. 66 (1962) pp. 2636
10. Gamota, D.R. and Filisko, F.E., J. of Rheol., 35(3), pp. 399, 1991