

# 인산처리 셀룰로오스를 첨가한 비수계 ER 유체의 전기유변학적 특성

안병길 · 최웅수 · 권오관 · 문탁진\*

한국과학기술연구원 TRIBOLOGY CENTER  
\*고려대학교 재료금속공학부

## Electrorheological Properties of Anhydrous ER Suspensions Based on Phosphated Cellulose

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

*Tribology Center, Korea Institute of Science and Technology  
\*Division of Material & Metallic Engineering, Korea University*

**Abstract**—The electrorheological (ER) behavior of suspensions in silicone oil of phosphated cellulose particles (average particle size 17.77  $\mu\text{m}$ ) was investigated at room temperature with electric fields up to 2.5 KV/mm. In this paper, for development of anhydrous ER suspensions using at wide temperature range, we would like to know fundamental understandings on the ER activity. As a first step, the anhydrous ER suspensions dispersed the phosphated cellulose particles were measured, and not only the electrical characteristics such as dielectric constant, current density and electrical conductivity but also the rheological properties on strength of electric field and quantity of dispersed phase were studied. From the experimental results, the anhydrous ER suspensions dispersed phosphated cellulose particles showed a stable current density and very high performance of ER effect ( $\tau/\tau_0=1030$ ) on the 2.5 KV/mm and the dynamic yield stress ( $\tau_y$ ) was in exponential proportion to the strength of electric fields.

**Key words**—phosphated cellulose, anhydrous ER suspensions, 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 극소량의 수분이 첨가된 실리카 현탁액과 같이 2 상 용액에 대해 강한 전기장이 가해지면 현탁액의 고체화가 급속히 나타나는 현상을 발견하였으며, 이러한 형태의 반응이 개선된 밸브나 댐핑기구 등과 같은 기전

요소에 응용될 수 있음을 발표하였다[1].

전기장에 대한 이러한 ER 변이를 설명하는 유변학적 요소들은 항복응력과 고정전단점도(steady shear viscosity) 등으로 표현된다. 지금까지 전기유변성 유체(electrorheological fluid, ER fluid)는 빙햄 소성(Bingham plastic) 거동으로 모델링 되어 왔다[2-5]. 이러한 모델링은 최소의 항복응력이 나타난 후에 유체의 흐름이 관찰된다는 것을 의미하는 것이다. 빙햄 거동을 하는 물질에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\tau = \tau_y + \eta_{pl} \cdot \dot{\gamma}$$

여기서  $\tau$ 는 ER 유체의 전단응력,  $\tau_y$ 는 동적항복응력(dynamic yield stress),  $\eta_{pl}$ 은 소성점도(plastic viscosity),

$\dot{\gamma}$ 는 전단변형율(shear rate)을 나타낸다. ER 유체에 전기장이 가해질 경우 유체의 소성점도는 변화하지 않으나 동적항복응력은 급격히 증가한다. 이상과 같은 거동을 보이는 ER 유체의 유용한 특징은 전기장 세기의 증가(또는 감소)에 의해 유체의 동적항복응력이 증가(또는 감소)되어지며, 그 변화의 범위가 비교적 넓고 연속적이며 가역적이라는 것과 그 변동속도가 매우 빠르다는 것이다[6].

일반적으로 ER 효과를 나타내는 ER 유체는 크게 2가지 종류로 분류할 수 있다. 첫 번째는 수분을 첨가제로 사용하여 입자의 분극화를 유도하는 wet-base형이고, 두 번째는 외부 전기장의 영향으로 입자 내부에 형성된 유발 쌍극자(induced dipole) 간의 상호작용에 의하여 입자와 입자 사이에 전기적인 흡인력이 발생하는 dry-base형이 있다. Wet-base형은 수분의 역할로 ER 반응을 증대시키는 장점을 가진 반면, ER 장비의 디자인에 대한 심각한 문제점을 야기하는 부정적인 면 또한 가지고 있다. 수분 활성 ER 유체의 가장 큰 단점은 사용 온도 범위의 한계성이다. 수분 활성 ER 유체는 온도가 증가함에 따라 유체 내부의 수분이 증발됨으로써 결과적으로는 유체 내부의 수분이 ER 효과를 감소시키는 작용을 한다. 수분의 첨가에 따른 또 다른 문제점으로는 유전파괴, 부식 및 높은 전력소비를 야기시킨다[7].

근래에 와서는 aluminosilicate[8]와 poly(acene quinones)[9] 등을 첨가한 비수계 ER 유체가 집중적으로 연구되고 있다. 비수계 ER 유체 내에서는 분산 미립자 사이에 형성되는 "water bridge" 메카니즘과 "전기 이중층(electric double layer)"에 의한 상호작용 현상을 관찰하기가 불가능하다. 대부분의 비수계 ER 유체가 갖는 메카니즘은 분산 미립자의 분극(polarization)에 의한 사슬 구조의 형성이다. Aluminosilicate의 전기전도도는 정확히 알 수 없지만, aluminosilicate를 분산시킨 분산계의 전류밀도는 수분 활성 ER 유체와 거의 유사한 값을 나타낸다. Poly(acene quinones) 분산계 또한 매우 높은 전류밀도를 나타내고 있어 사용 온도의 증가시 나타나는 전류밀도의 급격한 상승을 고려할 때, 60°C 이상의 고온에서는 사용하기 어려운 단점을 지니고 있다. 일반적으로 높은 유전상수(dielectric constant) 값을 갖는 소재는 거의 모두가 높은 전기전도도를 수반하므로 전기장에 의한 사슬 구조의 형성시 분산계의 전류밀도가 증가하는 문제점을 야기시킨

다. ER 유체를 기전요소에 적용시킬 때, ER 유체의 높은 전기전도도는 여러 가지 문제점을 유발시킬 수 있다.

본 연구에서는 60°C 이상의 고온에서도 사용이 가능한 낮은 전류밀도의 비수계 ER 유체를 개발한 후, 비수계 ER 유체의 전기유변 특성에 대한 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 비수계 ER 유체는 실리콘 오일(50 cS)과 본 연구에서 인산 에스테르 반응[10]을 도입하여 개발한 인산처리 셀룰로오스 미립자를 일정 부피비로 혼합하여 제조하였다. 인산처리 셀룰로오스가 첨가된 비수계 ER 유체의 유전상수, 전류밀도 및 전기전도도 등을 측정하였으며, 분산 미립자의 첨가량 변화에 따른 전기유변효과(electrorheological effect or relative shear stress,  $\tau_r = \tau/\tau_0$ )의 변화 역시 관찰하였다. 인산처리 셀룰로오스 분산계의 전기유변학적 특성을 고찰하므로써 기전요소로의 상용성이 가능한 고온용 비수계 ER 유체의 개발 연구에 대한 기초 자료를 제시하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 전기유변성 유체 제조

본 연구에서는 비수계 ER 유체로서 인산처리 셀룰로오스 분산계를 제조하였다. 인산 에스테르 반응을 수행하기 위해 준비된 셀룰로오스(Sigmacell, Sigma Chemical Co.)의 평균 입자 크기는 20  $\mu\text{m}$ 이었으며, 절연 오일은 20°C, 1 kHz에서의 유전상수가 2.9인 50 cS 실리콘 오일(Shin-Etsu Silicone Co.)을 사용하였다. 실험에 사용된 셀룰로오스 분말은 인산 에스테르 반응 공정, 건조 공정, sieving 공정 등을 거쳐 전기장에 대한 입자의 ER 반응을 향상시킨 비수계 ER 유체용 인산처리 셀룰로오스 미립자로 변환되었다.

#### 2-1-1. 셀룰로오스의 인산 에스테르 반응 공정

일정량의 셀룰로오스 분말을 일정 농도의 인산 ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )과 요소( $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ ) 수용액에 24시간동안 함침시킨 후, 수분의 양이 셀룰로오스 무게의 약 200% 정도가 되도록 수분을 제거하였다. 50~60°C의 건조기 안에 셀룰로오스 분말을 넣고 뜨거운 공기를 불어넣으면서 수분의 양이 약 5% 내외가 될 때까지 건조시킨다. 건조된 셀룰로오스 분말을 120°C의 온도로 조절된 건조기에서 120분간의 열처리 과정을 수행하여 인산처리 셀룰로오스 분말을 제조하였다. 셀룰로오스

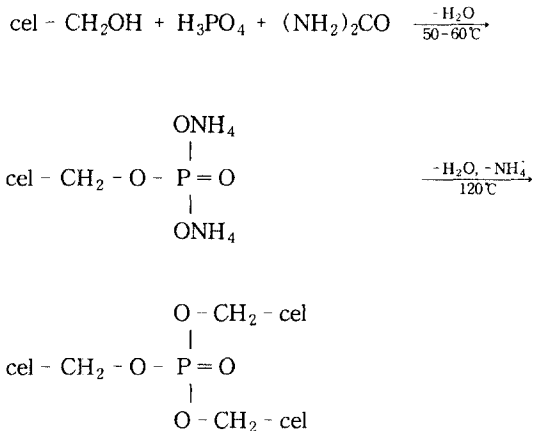


Fig. 1. Phosphoric ester reaction of cellulose in the presence of H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> and (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CO.

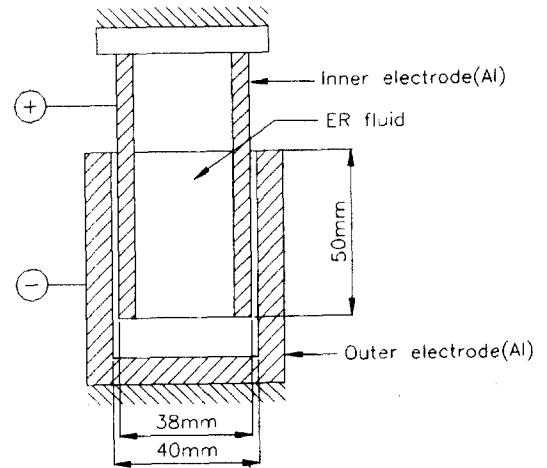


Fig. 2. Schematic diagram of electrode for measuring the current density and dielectric constant of ER fluids.

의 인산 에스테르 반응에 의한 열분해 과정을 Fig. 1에 도시하였다.

2-1-2. 건조공정 및 sieving 공정

인산 에스테르 반응 공정을 거친 셀룰로오스 분말의 표면에 남아있는 미반응 인산과 요소를 제거하고, 인산처리 셀룰로오스 미립자의 pH를 중성으로 조절하기 위해 증류수로 약 5~6회 정도 세척한 후, 100°C의 진공 건조기에서 24시간 동안 유지시켜 수분을 제거하였다. 수분이 제거된 인산처리 셀룰로오스 미립자의 평균 입자 크기를 조절하기 위해 26 μm로 조절된 sieve shaker에서 sieving 공정을 수행하였다. 일정한 입자 크기로 조절된 인산처리 셀룰로오스 미립자의 수분을 완전히 제거하기 위해 100°C의 진공 건조기에서 48시간 동안 유지시켰다.

이상과 같은 제조공정으로 만들어진 비수계 ER 유체용 인산처리 셀룰로오스 미립자와 수분이 완전히 제거된 50 cS 실리콘 오일을 일정 부피비로 혼합하여 실험에 사용할 비수계 ER 유체를 제조하였다.

2-2. 전기유변학적 특성 측정

ER 유체의 전기적 성질을 고찰하기 위해 ER 유체의 유전상수와 전기전도도 등을 측정하였다. ER 유체의 유전상수는 LCR 미터(Hewlett Packard, HP 4263B)를 사용하여 측정하였으며, 전류밀도와 유전상수의 측정을 위해 사용된 ER 유체용 전극의 개략도를 Fig. 2에 도시하였다. 0.5~4.5 KV/mm의 DC 전기장에 대한 유체의 전류밀도 ( $J_f, \mu\text{A}/\text{cm}^2$ )를 측정하여 ER 유체

의 전기전도도( $\sigma_f$ )를 계산하였으며, 그 계산식은 아래와 같다.

$$\sigma_f = \frac{\Delta E}{\Delta V_f} \tag{1}$$

전기장 변화에 대한 ER 유체의 유변 성질을 고찰하기 위해 고전압 발생기(KEITHLEY, Model 248)가 부착된 couette cell 형태의 점도계를 사용하였으며, 고전압 발생기로부터 만들어진 DC 전압이 점도계의 cup과 bob 양면에 가해지도록 제작하였다. 유변시험을 수행하기 전에 전기장을 약 10초동안 가하여 유체내의 미립자 사슬 형성이 정상 상태에 도달하도록 하였다. 그 후 일정한 전기장하에서 전단변형율을 증가시키면서 전단응력을 측정하였으며, 측정된 전단변형율-전단응력 그래프로부터 ER 유체의 동적항복응력을 얻을 수 있었다. 온도 조건은 20°C의 상온이었으며, ER 유체의 유변 성질에 영향을 끼칠 수 있는 전기장의 강도, 셀룰로오스 미립자의 첨가량 등에 따른 전기유변학적 물성을 측정하였다.

ER 유체의 경우, 전기장에 반응하여 나타나는 겔보기 점도(apparent viscosity)와 전기장이 가해지지 않은 상태에서 나타나는 겔보기 점도의 비가 매우 중요하다. 이러한 특성을 시험하기 위하여 "전기유변효과( $\tau_a$ )" [11]를 측정하였으며, 유체의 전기유변효과는  $\tau_a$ 와  $\tau_0$ 의 비로 표현되는  $\tau/\tau_0$ 로 계산하였다. 즉 전기장하에서,  $\tau_a$ 는 전기장이 가해지지 않은 상태에서의 전단응력을 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 인산처리 셀룰로오스 입자의 분석

본 실험에서 제조된 인산처리 셀룰로오스 비립자의 밀도를 피크노미터(pycnometer)를 사용하여 측정된 결과, 그 값이  $1.4 \pm 0.3$  g/ml이었으며, 입도 분석 기기인 image analysis system (Omnimet 2, UK)으로 측정된 평균 입자 크기는  $17.77 \mu\text{m}$ 이었다. 측정된 인산처리 셀룰로오스 분말의 입도분포를 Fig. 3에 도시하였다.

한편 Fig. 4는 인산처리 셀룰로오스 비립자의 열안정성을 실험하기 위해 측정된 DSC의 그림이다. 본 연구에서 개발한 인산처리 셀룰로오스 비립자는  $200^\circ\text{C}$  이하의 온도에서는 매우 안정적인 열안정성을 나타내었으며,  $230^\circ\text{C}$  이상의 온도에서 열분해가 발생됨을 알 수 있었다. 특히  $100^\circ\text{C}$  내외의 온도에서 열량 변화가 거의 없는 것으로 보아 셀룰로오스 비립자의 표면에 수분이 거의 함유되어 있지 않은 비수계 ER 유체용 비립자임을 알 수 있었다.

#### 3-2. 전기적 특성

본 연구에서 제조한 비수계 ER 유체, 즉 인산처리 셀룰로오스 분산계의 전류밀도를 전기장을 변화시키며 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 도시하였다. Fig. 5에서 보면, 인산처리 셀룰로오스가 첨가된 비수

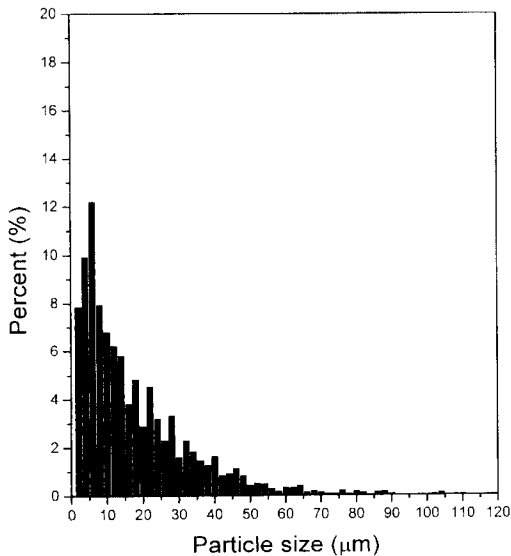


Fig. 3. Size distribution of phosphated cellulose particles (average particle size:  $17.77 \mu\text{m}$ ).

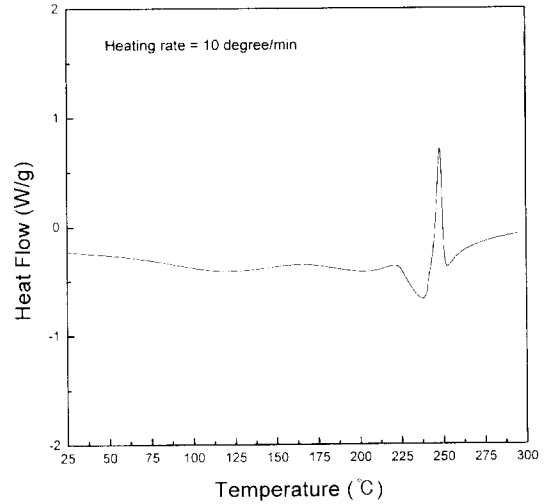


Fig. 4. DSC curve of phosphated cellulose.

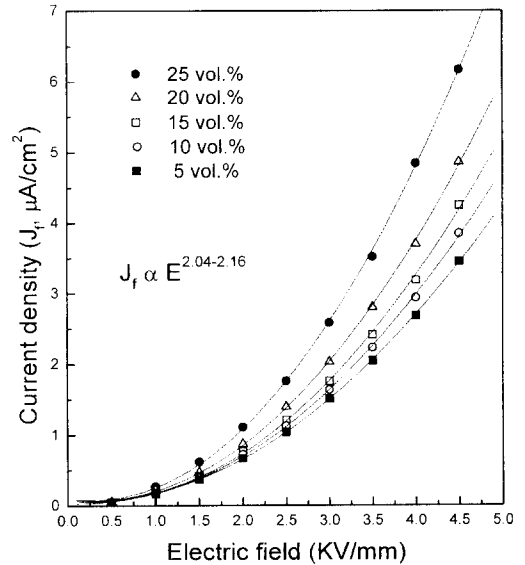


Fig. 5. Current density responses of phosphated cellulose ER fluids on the various electric fields (temperature  $20^\circ\text{C}$ ).

계 ER 유체의 전류밀도는 전기장이 증가할수록 지수 함수적으로 증가함을 관찰할 수 있다. ( $J_f \propto E^{2.04-2.16}$ ) 일반적으로 ER 유체가  $4.0 \text{ KV/mm}$ 의 전기장하에서  $20 \mu\text{A/cm}^2$  이내의 전류밀도를 나타낼 경우, 매우 안정적인 전기적 특성을 갖는 것으로 알려져 있다[11]. 인산처리 셀룰로오스 분산계의 전류밀도는  $20^\circ\text{C}$ ,  $4.0 \text{ KV/mm}$ 의 전기장하에서  $5 \mu\text{A/cm}^2$  내외의 매우 낮은 전류밀도를 나타내고 있어  $60^\circ\text{C}$  이상의 온도에서도

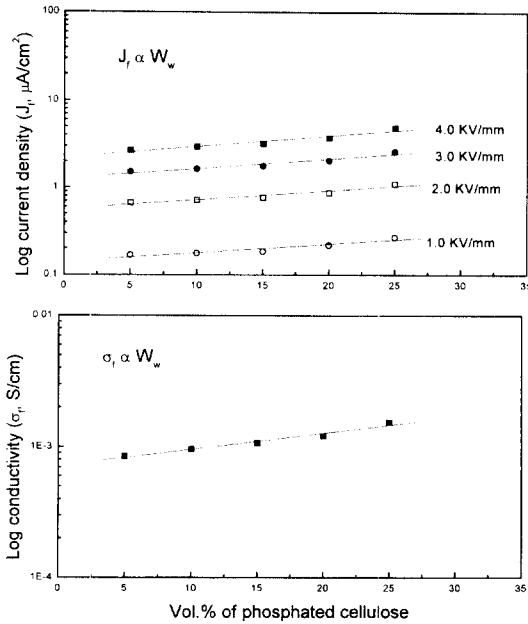


Fig. 6. Current density and conductivity of phosphated cellulose ER fluids on the volume fractions (temperature 20°C).

안정적인 전류밀도를 나타낼 것으로 사료된다. 전기장에 대한 셀룰로오스 분산계의 낮은 전류밀도는 ER 유체를 기전요소로 적용시킬 때 발생하는 ER 유체의 전기적 단점, 즉 높은 전류밀도에 의해 유발될 수 있는 전기 쇼트(short) 또는 통전 현상에 의한 전기에너지의 과소비 등과 같은 치명적인 문제점을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 6은 인산처리 셀룰로오스 미립자의 첨가량 변화에 따른 ER 유체의 전류밀도와 전기전도도를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보면, 일정한 전기장하에서 인산처리 셀룰로오스 분산계의 전류밀도( $J_r \propto W_w$ )와 전기전도도( $\sigma_r \propto W_w$ )가 분산미립자인 셀룰로오스의 첨가량( $W_w$ )에 비례함을 알 수 있다. 즉 인산처리 셀룰로오스 분산계의 전류밀도는 전기장의 세기에 대하여 지수함수적으로 비례하며, 일정한 전기장하에서 측정되는 분산계의 전류밀도와 전기전도도는 셀룰로오스의 첨가량에 비례함을 관찰할 수 있었다.

구형 미립자 분산계에서의 유전상수( $\Delta\epsilon$ ) 증가를 Schwarz[12]는다음의 식으로 나타내었으며,

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

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

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

윗 식에서  $\tau_m = 1/2\pi f$ ,  $\xi_0 = e^{-\alpha T}$ ,  $\omega$ 는 교류의 주파수,  $f$ 는 정의된 특정 주파수를 나타내며,  $\Delta\epsilon_0$ 는 정적인 유전상수의 증가분으로 다음과 같다.

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

윗 식에서  $\varnothing$ 는 분산 미립자의 부피 분율,  $\epsilon_r$ 는 공기의 유전상수,  $\sigma_0$ 는 전기 이중층에서의 표면충전밀도(surface charge density),  $e_0$ 는 절연 오일의 전기 충전값,  $R$ 은 분산 미립자의 반경,  $k$ 는 볼츠만 상수,  $T$ 는 절대 온도이다.

식 (2)에서 유전상수 증가분은 정적 유전상수 증가분에 비례함을 알 수 있으며, 만약  $T$ ,  $f$  및  $\alpha$ 의 값이 일정하다면 구형 미립자 분산계의 유전상수 증가는  $\Delta\epsilon_0$ 에 비례할 것이다.

식 (4)에서 부피 분율  $\varnothing$ 가 작고  $T$ ,  $R$ 과  $e_0$ 가 일정하다면,  $\Delta\epsilon_0$ 는 부피 분율  $\varnothing$ 와 표면충전밀도  $\sigma_0$ 에 비례할 것이다.

$$\Delta\epsilon_0 \propto \varnothing \cdot \sigma_0 \quad (5)$$

Fig. 7은 인산처리 셀룰로오스 분산계의 유전거동(dielectric behavior)에 대한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 인산처리 셀룰로오스의 첨가량이 증가함에 따라 분산계의 유전상수 값 역시 비례적으로 증가함을 관찰할 수 있다. 표면충전밀도를 일정하게 유지한 인산처리 셀룰로오스의 첨가량과 분산계의 유전상수 값이 비례관계를 나타내고 있으므로 인산처리 셀룰로오스 분산계가 식 (5)의 관계식과 일치함을 알 수 있었다.

ER 분산계에 첨가된 인산처리 셀룰로오스 입자의 유전상수( $K_p$ )는  $K_{eff} = K_p \varnothing + K_f(1 - \varnothing)$  [13]의 식에 의해 계산할 수 있다. 식에서  $K_{eff}$ 는 인산처리 셀룰로오스 분산계의 유전상수,  $K_f$ 는 절연오일의 유전상수이며,  $\varnothing$ 는 분산 미립자의 부피 분율이다. 윗 식에 의해 계산된 인산처리 셀룰로오스 입자의 고유 유전상수는  $10.0 \pm 0.05$ 로 계산되었다.

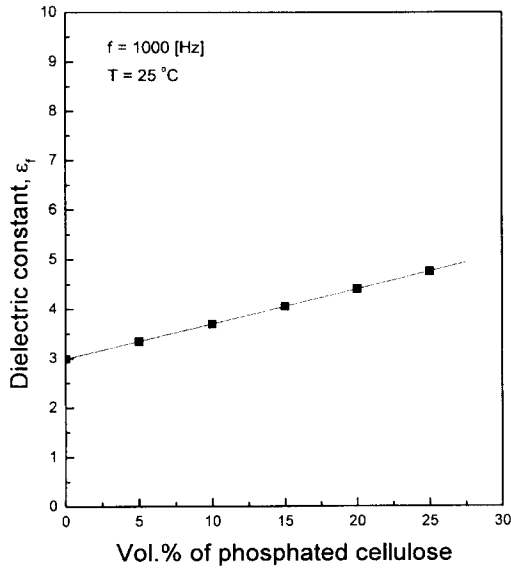


Fig. 7. Correlation between the dielectric constant and the vol.% of phosphated cellulose.

### 3-3. 유변 특성

ER 유체의 초기 점도( $\eta_0$ ), 즉 전기장이 가해지지 않은 상태에서 측정되는 유체의 겔보기 점도가 전기 유변효과에 큰 영향을 미치므로 인산처리 셀룰로오스 분산계의 가점도를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 8에서 인산처리 셀룰로오스 미립자의 첨가량이 증가할수록 ER 분산계의 가점도가 지수함수( $\eta_0 \propto W_w^{1.49}$ )적으로 증가함을 관찰할 수 있다. 이는 셀룰로오스 입자의 첨가량 증가가 전기장에 대한 ER 유체의 "ER 강도" 증가로 나타날 수 있으나, 지수함수적으로 반응하는 초기 점도의 급격한 상승에 기인되어 전기 유변효과의 급격한 감소로 이어질 수 있음을 유추할 수 있게 하는 결과라 하겠다.

Fig. 9는 2.5 KV/mm의 전기장하에서 인산처리 셀룰로오스의 첨가량 변화에 따른 분산계의 전단응력 변화를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 인산처리 셀룰로오스 분산계가 전기장하에서 빙행 거동을 보이고 있음을 알 수 있으며, 셀룰로오스의 첨가량이 증가할수록 전단변형율에 대한 전단응력의 세기와 빙행 거동시 나타나는 전단응력-전단변형율 그래프에서의 기울기, 즉 유체의 소성점도 역시 증가함을 관찰할 수

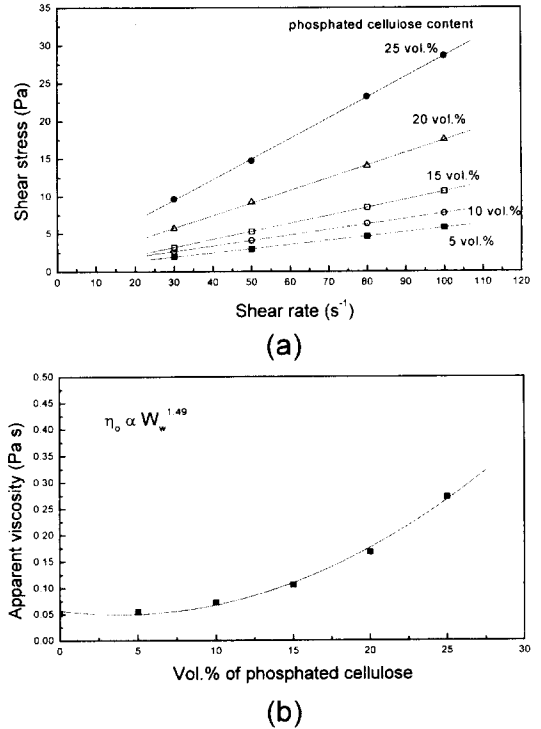


Fig. 8. Apparent viscosity behavior of phosphated cellulose ER suspensions without electric fields. (a) shear stress vs. shear rate. (b) apparent viscosity vs. vol.% of phosphated cellulose.

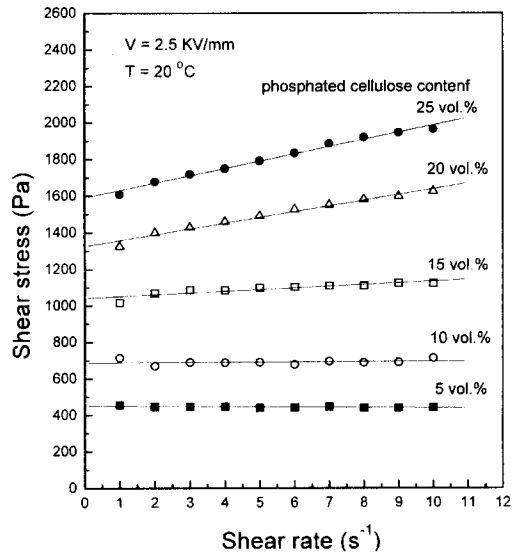


Fig. 9. Shear stress vs. shear rate for phosphated cellulose content in 50 cS silicone oil under 2.5 KV/mm.

있었다. 셀룰로오스 미립자가 적게 첨가된 분산계에서는 일정한 전기장하에서 전단변형율이 증가하여도 전단응력의 크기는 증가하지 않고 거의 일정하게 나타나는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 전기장에 의해 형성되는 셀룰로오스 입자의 사슬 구조가 충분한 인력을 갖지 못함으로써 나타나는 현상이라 사료된다. 즉 분산 미립자의 불충분한 인력하에서 계속적인 전단변형율의 증가가 사슬 구조의 끊어짐 현상으로 나타나는 것이라 할 수 있다[14]. 셀룰로오스의 첨가량이 증가하면 할수록 전단변형율의 증가에 기인한 사슬 구조의 단절 현상보다 셀룰로오스 입자의 첨가량 증가에 기인하는 사슬 구조의 급격한 재배열 현상이 더 크게 작용하기 때문에 첨가량이 증가하면 전기장하에서의 소성점도, 다시 말해 전단응력-전단변형율 그래프의 기울기가 증가하는 것이라 생각된다.

Fig. 10은 Fig. 8, 9의 결과로부터 계산된 인산처리 셀룰로오스 분산계의 전기유변효과를 그래프로 나타낸 것이다. 본 연구에서 개발한 인산처리 셀룰로오스 미립자의 경우, 15 vol.%가 첨가되었을 때 가장 높은 값인 1030의 전기유변효과를 나타내었다. 일반적인 ER 분산계의 전기유변효과가 100 내외의 수치[14]를 나타내는 것과 비교할 때, 본 연구에서 개발한 무수 ER 유체의 ER 특성이 어느 정도 인지는 쉽게 유추할 수 있다. 즉 15 vol.%의 인산처리 셀룰로오스가 첨가

된 ER 분산계의 경우, 2.5 KV/mm의 전기장이 가해질 때의 점도가 초기 점도보다 약 1000배나 높다는 것을 의미한다. 인산처리 셀룰로오스 입자의 첨가량이 15 vol.%를 넘어서면서 ER 분산계의 전기유변효과가 급격히 감소함을 알 수 있다. 이러한 현상은 Fig. 8에서 측정된 ER 분산계의 초기 점도 변화( $\eta_0 \propto W_w^{1.49}$ )로부터 유추할 수 있다. 즉 셀룰로오스 미립자의 첨가량이 증가함으로써 나타나는 초기 점도의 시수함수적인 증가, 즉 전기장이 가해지지 않은 상태에서 측정되는 전단응력의 급격한 증가율과 전기장에 반응하여 나타나는 유체의 전단응력 증가율을 비교할 때, 15 vol.% 이하의 첨가량에서는 전기장에 반응하여 나타나는 유체의 전단응력 증가율이 전기장이 가해지지 않은 상태에서 측정되는 초기 전단응력의 증가율보다 더 크게 나타나고 있으나, 15 vol.% 이상 첨가시에는 유체의 초기 전단응력 증가율이 유체의 전단응력 증가율보다 크게 나타나기 때문이라 사료된다.

Fig. 11은 인산처리 셀룰로오스 분산계의 동적항복 응력을 전기장의 함수로 나타낸 것이다. 일반적으로 ER 분산계의 동적항복응력은 Fig. 9와 같은 전단응력-전단변형율의 그래프에서 전단변형율을 0으로 외삽시킴으로써 일정한 값을 취할 수 있다[13]. 많은 연구자들이 전기장의 세기가 ER 분산계의 동적항복응

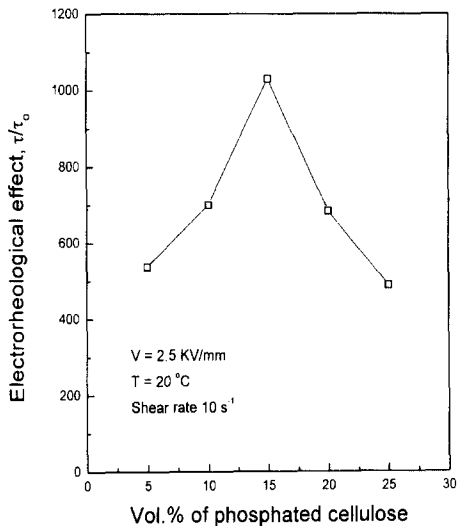


Fig. 10. Electrorheological effect responses of phosphated cellulose ER fluids on the volume % of phosphated cellulose.

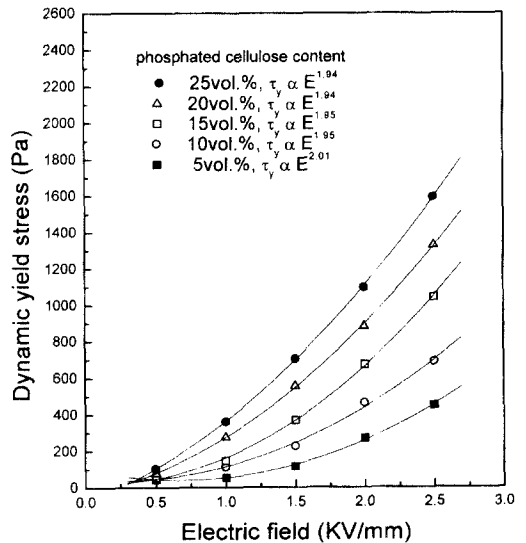


Fig. 11. Correlation between the yield stress and the electric fields for the phosphated cellulose content in 50 cS silicone oil.

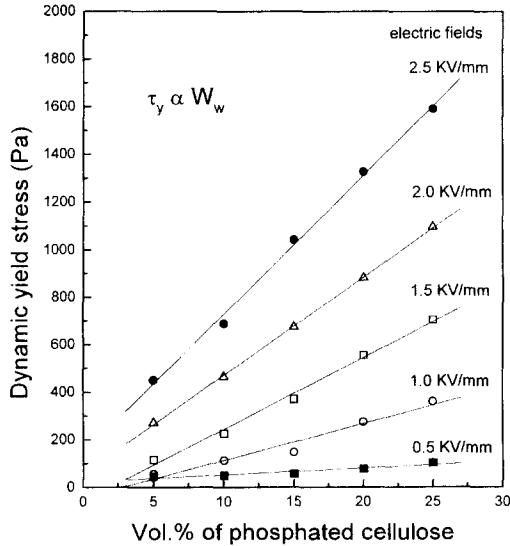


Fig. 12. Correlation between the dynamic yield stress and the volume % of phosphated cellulose (temperature 20°C, 50 cS silicon oil).

력에 미치는 영향을 조사해 왔으며, 그 일반적인 관계식은 다음과 같다[14, 15].

$$\tau = AE^m \quad (6)$$

일반적인 ER 분산계의 경우, 동적항복응력은 전기장의 제곱승에 비례한다고 알려져 왔으나 많은 경우의 실험에서 동적항복응력이 이러한  $E^2$ 의존성으로부터 벗어나는 현상들이 보고되고 있다. 본 연구에서 개발한 인산처리 셀룰로오스 분산계의 경우,  $m$ 의 값이 1.94~2.01로 나타남을 알 수 있었다.

Fig. 12는 일정한 전기장하에서 인산처리 셀룰로오스 분산계의 동적항복응력 변화를 분산 미립자 첨가량의 함수로 나타낸 것이다. Fig. 12의 그래프로부터 본 연구에서 개발한 비수계 ER 유체용 인산처리 셀룰로오스 분산계의 동적항복응력과 분산 미립자인 인산처리 셀룰로오스 미립자의 첨가량 사이에는 일정한 전기장에서 비례 관계가 나타남을 알 수 있다( $\tau \propto W_w$ ).

#### 4. 결 론

본 연구에서는 상용성이 가능한 고온용 비수계 ER 유체의 개발을 위해 인산 에스테르 반응으로 제조된 인산처리 셀룰로오스 미립자를 개발하였으며, 비수계 ER 유체의 전기유변학적 특성을 실험적으로 고찰하

여 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1. 본 연구에서 개발한 비수계 ER 유체용 인산 에스테르 반응 셀룰로오스 미립자(평균 입자 크기 17.77  $\mu\text{m}$ )는 전기장에 대한 ER 반응이 우수하였으며, 200 °C 이내의 온도에서 매우 안정적인 열안정성을 나타내었다.

2. 인산처리 셀룰로오스 분산계의 유전상수( $\epsilon_f$ ), 전류밀도( $J_f$ ) 및 전기전도도( $\sigma_f$ )는 인산처리 셀룰로오스 미립자의 첨가량( $W_w$ )과 비례 관계( $\epsilon_f, J_f, \sigma_f \propto W_w$ )를 나타내었으나, 인산처리 셀룰로오스 분산계의 전류밀도는 전기장의 세기( $E$ )에 대하여 지수함수적인 비례 관계( $J_f \propto E^{2.04-2.16}$ )를 나타내었다.

3. 인산처리 셀룰로오스 미립자의 첨가량 증가에 대한 분산계의 초기 전단응력( $\tau_0$ ) 변화는 지수함수적으로, 전기장 강도의 증가에 대한 전단응력( $\tau$ )의 변화는 비례적으로 증가하였으며, 15 vol.%의 인산처리 셀룰로오스 미립자가 첨가된 ER 유체가 전기장 변화(2.5 KV/mm)에 대한 전기유변효과( $\tau/\tau_0=1030$ )의 측정값이 가장 높게 측정되었다.

4. 인산처리 셀룰로오스 분산계의 동력학적 항복응력( $\tau_y$ )은 전기장에 대해서는 지수함수( $\tau_y \propto E^{1.94-2.01}$ )적으로, 인산처리 셀룰로오스 미립자의 첨가량에 대하여는 비례( $\tau_y \propto W_w$ )적으로 증가함을 알 수 있었다.

5. 인산처리 셀룰로오스가 첨가된 비수계 ER 유체가 매우 낮은 전류밀도와 우수한 ER 반응을 나타냄으로써 기전요소로의 상용화가 가능하리라 사료된다.

#### 기호설명

$E$	: 전기장 강도
$J_f$	: ER 유체의 전류밀도 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )
$\sigma_f$	: ER 유체의 전기전도도
$\tau_0$	: 전기장이 가해지지 않은 상태에서의 ER 유체 전단응력
$\tau$	: 전기장이 가해진 상태에서의 ER 유체 전단응력
$\tau_R$	: 전기유변효과( $\tau/\tau_0$ )
$\dot{\gamma}$	: ER 유체의 전단변형률
$\tau_y$	: ER 유체의 동적항복응력
$W_w$	: 인산처리 셀룰로오스 미립자의 첨가량 (vol.%)
$\Delta$	: 유전상수 증가분



- $\Delta\epsilon_0$  : 정적인 유전상수의 증가분  
 $\epsilon_r$  : 공기의 유전상수  
 $\sigma_0$  : 전기 이중층에서의 표면충전밀도  
 $e_0$  : 절연 오일의 전기 충전값  
 $R$  : 분산 미립자의 반경  
 $k$  : 볼츠만 상수  
 $T$  : 절대 온도  
 $\alpha$  : 활성화 에너지  
 $\emptyset$  : 분산 미립자의 부피 분율

### 참고문헌

1. Winslow W. M., "Induced Fibration Suspension," J. of Physics, Vol. 20, pp. 1137-1140, 1949.
2. Thomas C. Halsey & James E. Martin, "Electro Rheological Fluid," Scientific American, Oct, 1993.
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. Wei Chenguam & Wei Aixia, "The Research in the Applications of ER Technology in Engineering," Proceedings of the International Conference Electrorheological Fluids, pp. 465-469, Oct. 1991.
7. Therese C. Jordan & Montgomery T. Shaw, "Electrorheology," IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol.24, No.5, Oct., 1989.
8. Frank E. Filisko & Leonard H. Radzilowski, "An Intrinsic Mechanism for the Activity of Alumino-Silicate based Electrorheological Materials," J. of Rheology, Vol. 34, No.4, pp.539-552, May, 1990.
9. Block H. & Kelly J. P., U.S. Patent 4687589, 1987.
10. Ermolenko I. N., Lyubliner I. P. and Gulko N. V., "Chemically Modified Carbon Fibers," VCH Publishers, New York, pp.129-134, 1990.
11. Block H., Kelly J. P., Qin A. and Watson T., "Materials and Mechanism in Electrorheology," Langmuir, 6, 6, 1990.
12. Schwarz, G., J. Phys. Chem. 66 (1962) pp. 2636.
13. Conrad H., Sprecher A. F., Choi Y. and Chen Y., "The Temperature Dependence of the Electrical Properties and Strength of Electrorheological Fluids," J of Rheology 35 (7), Oct., 1991.
14. 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.
15. Gamota, D. R. and Filisko, F. E., J. of Rheol., 35(3), pp. 399, 1991.