

인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전기유변학적 특성에 대한 계면활성제의 영향

안병길 · 최용수 · 권오관

한국과학기술연구원 Tribology Research Center

The Effect of Surfactant on the Electrorheological Properties of Phosphoric Ester Cellulose ER Fluids

B. G. Ahn, U. S. Choi and O. K. Kwon

Tribology Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, Korea

Abstract – The electrorheological (ER) behavior of suspensions in silicone oil of phosphoric ester cellulose particles (average particle size : $18 \pm 1 \mu\text{m}$) coated with octadecylamine ($\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{NH}_2$) as surfactant was investigated at room temperature. For development of anhydrous ER suspension using at real application, it should be researched how can reduce deposition of ER particles in ER suspension. Anhydrous ER suspensions mixing with phosphoric ester cellulose particles coated with octadecylamine were measured. As increasing the coating concentration of octadecylamine, not only analysis of electrical properties such as dielectric constant, current density and electrical conductivity but also rheological properties of ER suspensions were studied. From the experimental results, coating concentration of surfactant had large influence to ER properties of anhydrous ER suspension. Current density, conductivity and electrorheological effect (τ/τ_0) of ER suspension were linearly reduced with increasing the coating concentration of octadecylamine. But ER suspensions dispersed the phosphoric ester cellulose particles coated with octadecylamine showed reducing deposition of ER particles and could be redispersed easily.

Key words – surfactant, anhydrous ER fluids, electrorheological effect (τ/τ_0).

1. 서 론

물질의 변형과 흐름에 대한 전기장의 영향은 오랜 기간 동안 연구자들에게 매우 흥미로운 주제로 인식 되어 왔다. 최근에 이르러서는 이와 같은 전기장의 효과에 관한 분야로서 ER 효과(electrorheological effect)가 새로운 관심을 끌고 있으며, 이러한 효과는 1947년에 미국의 Willis Winslow에 의해 발견되었기 때문에 “Winslow 효과”라 불려지기도 한다. Winslow는 미량의 수분이 첨가되어 있는 실리카 현탁액(suspensions)과 같이 2상 용액에 대해 강한 전기장이 외부로부터 가해지면 현탁액의 고체화가 급속히 나타나는 현상을 발견하였으며, 이러한 형태의 반응이 개선된 밸브나 댐핑기구 등과 같은 기전 요소에 응용될 수 있음을

발표하였다.[1,2]

그러나 전기유변성 유체(electrorheological fluid, ER fluid)가 갖는 본질적인 문제점, 즉 2상 용액이 나타내는 가장 큰 단점인 분산 미립자의 “침전 현상”에 기인하는 소재의 불안정성 등으로 인하여 1970년대까지는 연구자의 관심을 끌지 못하였던 것 또한 사실이다. 1980년대 후반에 들어서면서 이러한 유체가 갖는 폭넓은 응용성으로 인해 전진 여러 나라에서는 외부 전기장에 대하여 우수한 ER 반응을 나타내는 “ER 유체의 개발 연구”와 함께 ER 유체내의 “분산 미립자 침전 현상” 완화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3-6]. ER 유체가 여러 가지의 응용 가능성을 갖는 첨단 소재임에도 불구하고 아직까지 실제적인 응용제품이 개발되지 못한 이유로서는 ER 유체의

전기장에 대한 낮은 ER 특성뿐만 아니라 분산 미립자의 “침전 현상”에 의한 ER 유체의 안정성 부재를 가장 큰 원인으로 지목할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 절연오일과 유사한 비중의 분산 미립자를 사용하거나 분산 미립자와 절연오일 사이의 계면활성을 향상시키기 위한 계면활성제를 첨가하는 방법들이 널리 사용되어 왔다.

본 연구에서는 분산 미립자의 침전 현상 완화와 분산 미립자의 재분산을 용이하도록 하기 위해 첨가되는 계면활성제가 ER 유체의 전기유변특성에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 먼저 ER 유체용 분산 미립자로는 비중이 비교적 낮은 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 사용하였으며, 분산 미립자의 입자 크기를 조절하기 위해 시빙(sieving) 공정을 수행하였다. 또한 분산 미립자의 표면을 계면활성제로 코팅함으로써 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자와 절연오일 사이의 계면 활성력을 증가시키고자 하였다. 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자에 계면활성제 코팅 농도를 달리하면서 제조한 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 첨가된 비수계 ER 유체의 전단응력(shear stress), 유전상수(dielectric constant), 전류밀도(current density) 및 전기유변효과(electrorheological effect, τ/τ_0) 등을 측정함으로써 ER 유체에 있어서 분산 미립자의 계면활성제 코팅 농도가 ER 유체의 전기유변 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였다.

2. 실험

2-1. ER 유체 제조

본 연구에서는 인산 에스테르 반응으로 제조된 셀룰로오스 미립자를 첨가하여 비수계 ER 유체를 제조하였다. 셀룰로오스의 인산 에스테르 반응을 수행하기 위해 준비된 셀룰로오스(Sigmacell, Sigma Chemical Co.)의 평균 입자 크기는 $20 \mu\text{m}$ 이었으며, 절연오일은 25°C , 1 kHz 에서의 유전상수가 2.8인 10 cS 실리콘 오일(Shin-Etsu Silicone Co. Japan)을 사용하였다. 실험에 사용된 셀룰로오스 미립자는 그 자체의 특성상 낮은 전기전도도를 나타내나, 셀룰로오스의 인산 에스테르(phosphoric ester) 반응 공정, 건조 공정, 시빙 공정 등을 거침으로써 외부 전기장에 대한 미세 입자의 ER 반응을 향상시킨 비수계 ER 유체용 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자로 변환되었다 [7,8].

ER 유체의 분산매로는 10 cS의 실리콘 오일을 사용하였다. 실리콘 오일은 $-50^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 의 넓은 온도 범위에서 우수한 열안정성을 나타내고 있으며, 전기전도도가 10^{-14} S/cm 로 전기 절연성이 매우 우수하다. 표면장력 또한 21 mN/m 로 매우 낮으며, 온도 변화에 따른 점도 변화가 크지 않은 성질을 지니고 있다. 본 연구에서 사용된 실리콘 오일의 비중은 0.96이었으며, 본 연구에서 사용한 LCR 미터(Hewlett Packard, HP 4263B)를 사용하여 측정된 유전상수 값은 2.81로 측정되었다.

비수계 ER 유체의 제조를 위해서 셀룰로오스의 인산 처리 몰수와 요소의 처리 몰수를 각각 2 M과 4 M로 고정시킨 후, 150°C 에서 열처리 공정을 거친 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자들을 10 cS의 실리콘 오일에 20%의 부피 분율로써 일정하게 첨가하였다. 셀룰로오스 미립자와 실리콘 오일의 균일한 혼합을 위해 혼합 용액을 24시간 동안 볼-밀에서 교반시켜 주었다.

2-2. ER 유체에 대한 계면활성제 반응 공정

본 연구에서 제조한 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자와 절연오일인 10 cS 실리콘 오일 사이의 계면활성을 위해 분산 미립자 표면에 octadecylamine ($\text{C}_{18}\text{H}_{37}\text{NH}_2$)을 계면활성제로써 소량 코팅하였다.

먼저 octadecylamine을 acetone에 일정한 중량 비율로 용해시킨 후, 이 용액 중량의 10%가 되도록 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 혼합한다. 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 혼합한 후, 48시간 동안의 볼-밀 공정을 수행하였다. 볼-밀 공정 후, 필터링 공정과 24시간 동안의 상온 건조 공정을 거쳐 octadecylamine이 반응된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 제조하였다. 상온에서 건조된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 입자 크기를 조절하기 위해 $26 \mu\text{m}$ 의 sieve를 사용하는 sieving 공정을 수행하였다. 입자 크기가 일정하게 조절된 ER 유체용 미립자를 100°C 의 진공 오븐에서 48시간동안 유지시켜 수분 및 아세톤을 완전히 제거하였다.

2-3. 전기유변학적 특성 측정

ER 유체의 전기적 성질을 고찰하기 위해 ER 유체의 유전상수(ϵ_r), 전류밀도($j_r, \mu\text{A/cm}^2$) 및 전기전도도($\sigma_r, \text{ S/m}$) 등을 측정하였다. ER 유체의 유전상수는 LCR 미터를 사용하였으며, 유전상수, 전류밀도 및 전

기전도도의 측정을 위해 사용된 ER 유체용 전극의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 고전압 발생기(KEITHLEY, Model 248)의 DC 전기장을 0.5~4.5 KV/mm의 범위에서 0.5 KV/mm씩 증가시켰으며, 전기장 부하시 측정되는 전류의 양을 측정하여 ER 유체의 전류밀도를 계산하였다. Fig. 1에 도시한 원통형 전극의 면적은 대수평균을 이용하여 계산한 결과 59.69 cm²이었으며, ER 유체의 전류밀도 계산식은 다음과 같다.

$$j_f = \frac{I_f}{A} \tag{1}$$

구해진 전류밀도를 이용하여 ER 유체의 전기전도도를 다음의 식으로 계산하였다.

$$\sigma_f = \frac{\Delta j_f}{\Delta E} \tag{2}$$

여기서 A는 전극 사이에 채워진 ER 유체와 접촉하는 전극의 면적, I_f는 주어진 전기장 하에서 흐르는 전류, E는 가해진 전기장이다.

전기장 변화에 대한 ER 유체의 유변 성질을 고찰하기 위해 고전압 발생기가 부착된 couette cell 형태의 점도계를 사용하였으며, 고전압 발생기로부터 만들어진 DC 전압이 점도계의 cup과 bob 양면에 가해지도록 제작하였다. Fig. 2는 유변 성질 측정을 위해 본 연구에서 사용된 점도계의 cup과 bob에 대한 개략도이다. 유변시험을 시작하기 전에 전기장을 약 10

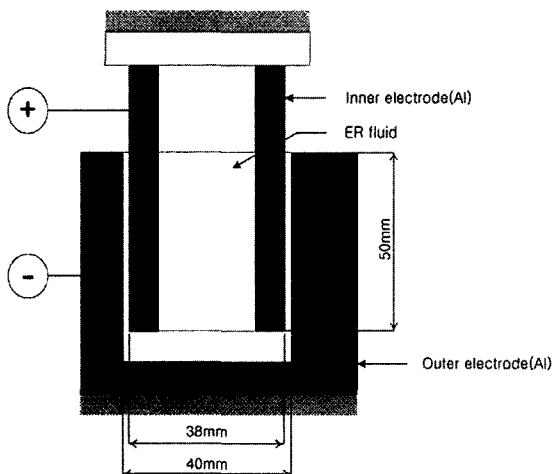


Fig. 1. Schematic diagram of electrode for measuring the electrical properties of ER fluids.

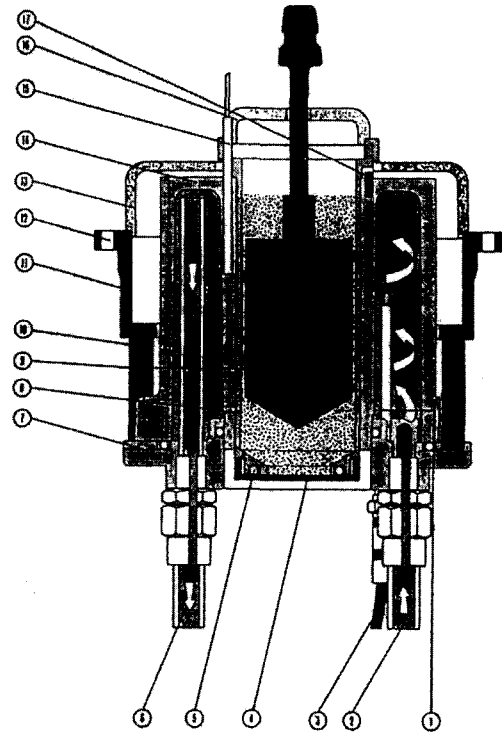


Fig. 2. Schematic diagram of viscometer for ER fluids. 1: thermocouple, 2: thermal liquid-inlet, 3: cable f thermocouple, 4: bottom of measuring cup, 5: packing ring, 6: thermal liquid-outlet, 7: over, 8: measuring cup, 9: measuring bob, 10: insulating distance pins, 11: holding flange, 12: bore for fixing screw M5, 13: plastic cover, 14: thermal liquid circulation chamber, 15: temperature probe of thermocouple, 16: plastic cover, 17: positioning pin for measuring cup.

초동안 가하여 유체내의 미립자 사슬형성이 정상 상태에 도달하도록 한 후, 일정한 전기장과 전단변형율(shear rate) 하에서 ER 유체의 전단응력을 측정하였다.

ER 유체의 경우, 전기장에 반응하여 나타나는 겔보기 점도(apparent viscosity)와 전기장이 가해지지 않은 상태에서 나타내는 겔보기 점도의 비가 매우 중요하다. 계면활성제 첨가에 따른 ER 유체의 특성을 시험하기 위하여 계면활성제 첨가에 따른 전기유변 효과(electrorheological effect or relative shear stress, τ_r)[9]의 변화를 측정하였으며, ER 유체의 전기유변 효과(τ_r)는 τ 와 τ_0 비로 표현되는 τ/τ_0 로 계산하였다. τ 는 전기장하에서, τ_0 는 전기장이 가해지지 않은 상태에서 측정되는 전단응력을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 계면활성제가 첨가된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 분석

본 실험에서 제조된 계면활성제 코팅 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 밀도를 피크노미터(pycnometer)를 사용하여 측정한 결과, 그 값이 $1.42 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ 이었으며, 입도 분석 기기인 Image Analysis System (Omnimet 2, UK)으로 측정한 평균 입자 크기는 $18 \pm 1 \mu\text{m}$ 이었다. 측정된 계면활성제 코팅 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 입도분포를 Fig. 3에 도시하였다.

한편, Fig. 4는 계면활성제 코팅 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 열안정성을 측정하기 위해 측정된 TG-DTA 그림을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보면, 본 연구에서 개발한 계면활성제 코팅 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자는 200°C 이하의 온도에서 매우 안정적인 열안정성을 나타내었으며, 100°C 내외의 온도에서 열량 및 무게 변화가 거의 없음을 관찰할 수 있으므로 ER 유체용 분산 미립자 표면에 수분이 거의 함유되지 않은 비수계 ER 유체용 미립자임을 알 수 있다.

Fig. 5는 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 표면 분석을 위한 SEM 사진이다. 이 사진은 미립자 표면

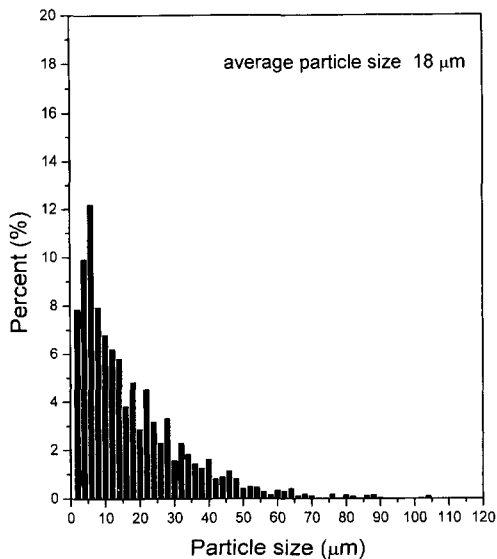
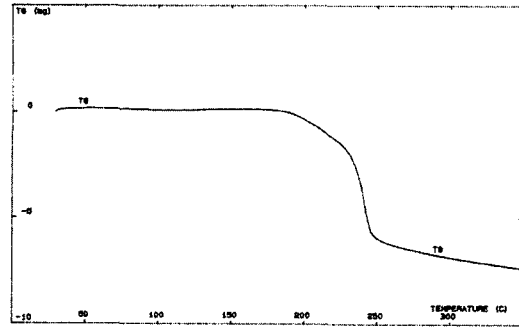
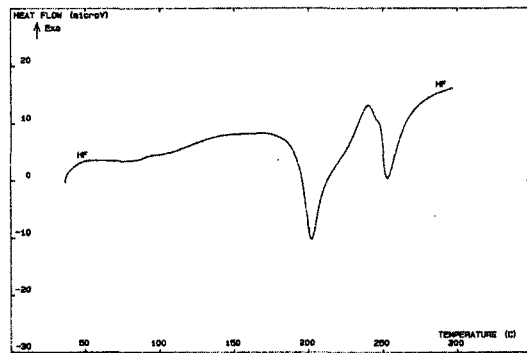


Fig. 3. Number distribution of particle size of phosphoric ester cellulose particles.

에 대한 gold 코팅 작업을 수행하지 않고 촬영한 사진으로써 본 연구에서 제조한 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 반전도성 물질임을 나타내는 결과라



(a) TGA



(b) DTA

Fig. 4. TGA (a) and DTA (b) curves of phosphoric ester cellulose particles coated by surfactant.

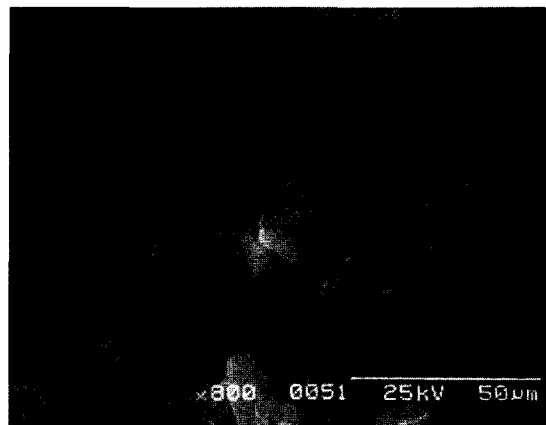


Fig. 5. SEM micrograph of phosphoric ester cellulose particles.

할 수 있다. SEM 사진에서 보면, 미립자의 크기가 측정치와 비슷한 $20\mu\text{m}$ 내외임을 알 수 있으며, 불규칙적인 모습을 나타내고 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 계면활성제가 코팅된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 분산된 ER 유체의 침전 완화 현상을 관찰하기 위해 미립자의 분산 후 24시간이 지난 뒤에 촬영한 사진이다. 사진에서 계면활성제인 octadecylamine을 코팅시킨 미립자가 계면활성제가 코팅되지 않은 미립자보다 침전 현상이 현저히 완화된 것을 관찰할 수 있으며, 분산 미립자의 재분산 역시 계면활성제가 코팅된 미립자가 더 용이함을 관찰할 수 있었다.

3-2. 전기적 특성

본 연구에서 제조한 비수계 ER 유체, 즉 계면활성제인 octadecylamine이 코팅된 인산 에스테르 셀룰로오스 분산계의 전류밀도(j)와 전기전도도(σ)를 25°C 의 상온에서 측정하여 Fig. 7, 8에 각각 도시하였다. Fig. 7은 계면활성제인 octadecylamine의 코팅 농도를 달리하여 제조한 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 20 vol.%, 수분을 완전히 제거시킨 10 cS 실리콘 오일이 80 vol.%의 일정한 혼합 비율로 제조된 셀룰로오스 ER 유체의 전류밀도와 외부에서 가해진 전기장의 세기와의 관계를 시험하기 위해 수행하였으며, Fig. 8은 일정한 전기장하에서 계면활성제의 코팅 농도 변화에 따른 비수계 ER 유체의 전류밀도와

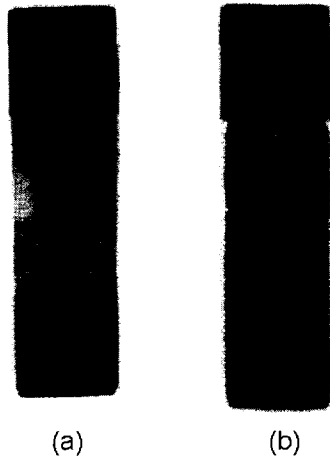


Fig. 6. Photos of ER fluids after passing 24 hrs. (a) without octadecylamin, (b) octadecylamine 0.25 wt.% coating.

전기전도도를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 7, 8의 그래프에서 보면, 같은 양의 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 분산될지라도 계면활성제의 코

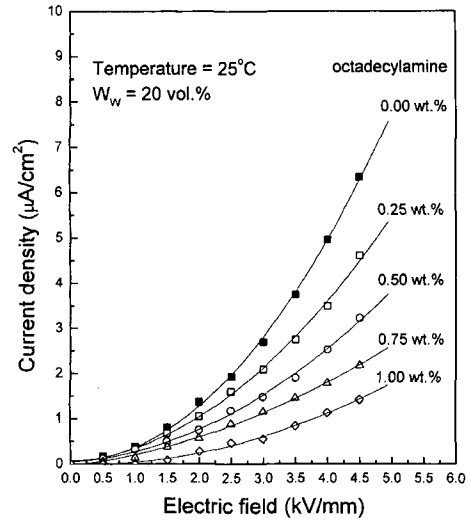


Fig. 7. Current density as a function of electric field for phosphoric ester cellulose treated by various wt.% of octadecylamine in 10 cS silicone oil under room temperature.

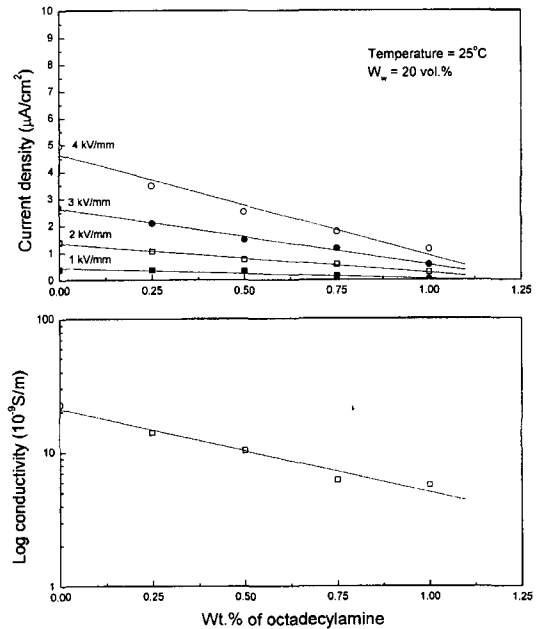


Fig. 8. Current density and conductivity of phosphoric ester cellulose ER fluid on the wt.% of octadecylamine under room temperature.

팅 농도에 따라 ER 유체의 전류밀도와 전기전도도가 다르게 측정됨을 관찰할 수 있다. 분산 미립자에 대한 계면활성제의 코팅 농도가 증가할수록 일정한 전기장하에서 측정되는 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전류밀도가 낮게 측정되었으며, 외부로부터 가해지는 전기장의 세기가 증가할수록 계면활성제가 코팅된 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전류밀도가 “power law”적으로 증가함을 Fig. 7에서 관찰할 수 있다.

계면활성제가 코팅된 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전기전도도를 측정한 Fig. 8에서 보면, ER 유체의 전기전도도는 계면활성제의 코팅 농도가 증가함에 따라 감소하였으므로 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자에 대한 계면활성제의 코팅 농도가 ER 유체의 전기전도도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

구형 미립자 분산계에서의 유전상수(dielectric constant, $\Delta\epsilon$) 증가를 Schwarz[10]는 분산 미립자의 부피 분율 ϕ 가 작고 절대온도 T와 분산 미립자의 반경 R 및 절연오일의 전기충전값(electric charge)인 e_0 가 일정하다면, 다음의 식으로 나타낼 수 있음을 주장하였다.

$$\Delta\epsilon \propto \phi \cdot \sigma_0 \quad (3)$$

윗 식에서 σ_0 는 분산 미립자의 표면충전밀도를 나타낸다.

Fig. 9는 분산 미립자의 혼합량을 20 vol.%로 일정하게 유지한 후, 계면활성제의 코팅 농도 변화에 따른 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 유전상수를 측정하여 그래프로 도시한 것이다. 그래프에서 보면, 일정량의 분산 미립자가 혼합되어도 계면활성제인 octadecylamine의 코팅 농도에 따라 유전상수 값이 다르게 측정됨을 관찰할 수 있다. 즉 계면활성제의 코팅 농도가 증가할수록 ER 유체의 유전상수 값은 감소하였으며, 이는 계면활성제의 코팅에 의한 분산 미립자 자체의 유전상수 감소에 기인된 것이라 사료된다.

위의 실험을 수행한 후, 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 유전상수는 계면활성제의 코팅 농도가 증가하면 감소함을 관찰할 수 있었다. ER 유체의 유전상수(ϵ)는 유전상수 증가량($\Delta\epsilon$)에 비례하므로 식 (3)에서의 유전상수 증가량은 다음과 같이 설명할 수 있다. 일정량의 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 분산된 ER 유체의 경우, 계면활성제인 octadecylamine

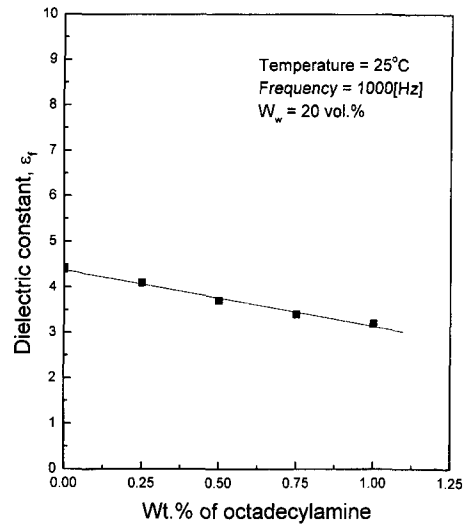


Fig. 9. Correlation between the dielectric constant and the weight fraction of octadecylamine.

의 코팅 농도 증가는 곧 분산 미립자의 표면충전밀도 감소로 나타남을 Fig. 9와 식 (3)을 비교하여 유추할 수 있었다.

3-3. 유변 특성

ER 유체의 초기 점도(η_0), 즉 전기장이 가해지지 않은 상태에서 측정되는 유체의 가점도가 ER 유체의 전기유변효과에 큰 영향을 미치므로 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자에 계면활성제를 코팅시킨 ER 유체의 가점도를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 10은 인산 에스테르 셀룰로오스에 계면활성제인 octadecylamine을 일정 농도로 코팅시킨 후, 계면활성제가 코팅된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 10 cS의 실리콘 오일에 20 vol.%의 일정량으로 혼합하여 만든 비수계 ER 유체의 초기 점도(η_0)를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다.

Fig. 10의 결과에서 보면, 다른 농도의 octadecylamine이 코팅된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 첨가되어도 분산 미립자의 혼합 분율을 일정하게 유지한다면 모든 ER 유체의 초기 점도가 거의 유사하게 나타나고 있음을 그래프에서 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 분산 미립자에 대한 계면활성제의 코팅 농도가 ER 유체의 초기 점도에 큰 영향을 미치지 않음을 나타내는 결과라 할 수 있다.

Fig. 11은 50 s^{-1} 의 일정한 전단변형율하에서 인산

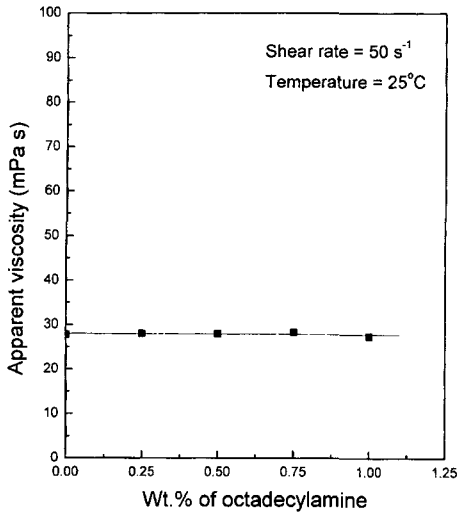


Fig. 10. Apparent viscosity of phosphoric ester cellulose ER fluids on the various wt.% of octadecylamine (10 cS silicone oil).

에스테르 셀룰로오스 미립자를 10 cS 실리콘 오일에 20 vol.%의 일정한 첨가량으로 혼합하여 만든 비수계 ER 유체의 전단응력 변화를 계면활성제의 코팅 농도와 전기장 변화에 따라 측정하여 그래프로 나타낸 것이며, Fig. 12는 Fig. 10과 11에서 측정된 결과로부터 분산 미립자에 대한 계면활성제의 코팅 농도와 전기장 변화에 따른 전기유변효과($\tau_r = \tau/\tau_0$)를 계산한

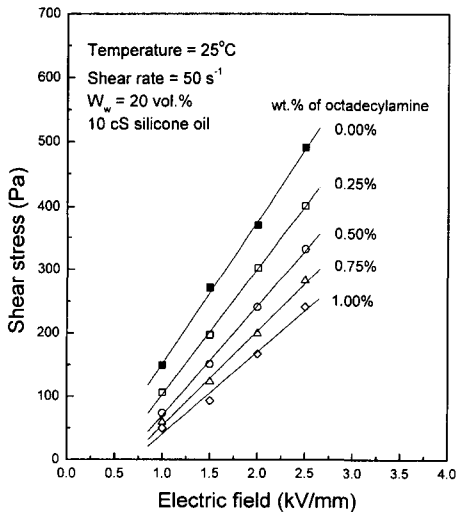


Fig. 11. Shear stress as a function of electric field strength for phosphoric ester cellulose ER fluids on the wt.% of octadecylamine.

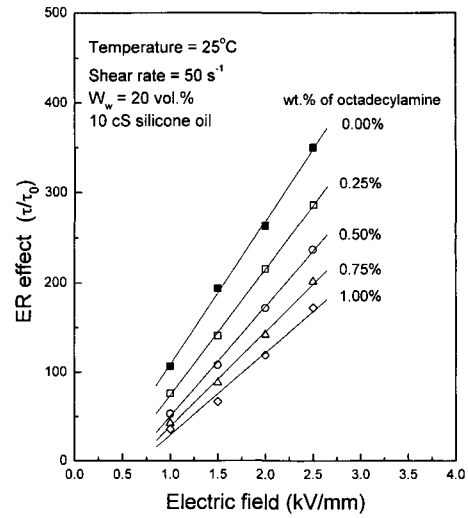


Fig. 12. Electrorheological effect of phosphoric ester cellulose ER fluids on the various electric field.

여 그래프로 나타낸 것이다. Fig. 11과 12의 결과에서 보면, 두 그래프가 거의 유사한 모양을 나타내고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 10의 결과로부터 기인된 것이다. 전기유변효과의 계산에 사용된 τ_0 , 즉 전기장이 가해지지 않은 상태에서 측정되는 전단응력 값이 계면활성제인 octadecylamine의 코팅 농도에 관계없이 거의 일정하게 나타나기 때문이다. ER 유체에 있어서 전기장 변화에 대한 전기유변효과의 계산은 τ/τ_0 로 하기 때문에 전단응력 변화를 나타낸 Fig. 11과 전기유변효과를 나타내는 Fig. 12의 그래프가 유사한 모양을 나타내는 것이다.

Fig. 11과 12의 그래프에서 보면, 일정한 분산 미립자 첨가량과 일정한 전기장하에서 계면활성제의 코팅 농도가 증가할수록 ER 유체의 ER 효과는 감소하고 있음을 관찰할 수 있다. 따라서 ER 유체용 분산 미립자에 계면활성제를 첨가할 경우, 침전 완화 및 분산 미립자의 재분산에 대한 효과는 우수하게 나타날 수 있으나 전기장에 대한 ER 효과는 급격히 감소함을 관찰할 수 있었다. 이러한 ER 효과의 감소는 계면활성제 코팅에 따른 표면충전밀도 감소, 즉 분산 미립자의 전류밀도, 전기전도도 및 유전상수의 감소에 기인된 것임을 앞 절의 실험결과로부터 유추할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 분산 미립자의 침전 현상이 완화된

ER 유체, 즉 상용성이 가능한 비수계 ER 유체의 개발을 위해 인산 에스테르 반응으로 제조된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자에 계면활성제로써 octadecylamine을 미립자 표면에 일정 농도로 코팅하여 계면활성제가 비수계 ER 유체의 전기유변학적 특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였으며, 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1. 계면활성제인 octadecylamine이 코팅된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 열안정성을 조사하기 위한 TG-DTA 측정결과, 200°C 내의 온도에서 안정적인 열안정성을 나타냄을 관찰할 수 있었으므로 계면활성제가 코팅된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 ER 반응을 나타내는 비수계 ER 유체용 미립자임을 알 수 있었다.

2. 계면활성제인 octadecylamine이 코팅된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 분산된 ER 유체의 경우, 분산 미립자의 침전 완화 현상과 분산 미립자의 재분산 용이성을 관찰할 수 있었다.

3. 분산 미립자에 대한 계면활성제의 코팅 농도가 증가할수록 일정량의 인산 에스테르 셀룰로오스가 혼합된 ER 유체의 유전상수와 일정한 전기장하에서 측정되는 전류밀도 및 전기전도도가 낮게 측정되었으며, 외부로부터 가해지는 전기장의 세기가 증가할수록 계면활성제가 코팅된 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전류밀도가 "power law" 적으로 증가함을 관찰할 수 있었다.

4. ER 유체용 분산 미립자에 계면활성제를 코팅할 경우, 미립자의 침전 완화 및 분산 미립자의 재분산에 대한 효과는 우수하게 나타날 수 있으나 전기장에 대한 ER 효과는 급격히 감소함을 관찰할 수 있었으며, 이러한 ER 효과의 감소는 계면활성제의 코

팅에 따른 분산 미립자의 표면충전밀도 감소, 즉 전류밀도, 전기전도도 및 유전상수의 감소에 기인된 것임을 실험결과로부터 관찰할 수 있었다.

참고문헌

1. Winslow, W. M., "Induced Fibration Suspension," J. of Physics, Vol.20, pp.1137, 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, 59, No.562, pp.1822, 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. H., Doi M. and Ishibashi, Y., "Two Types of Mechanisms of Electrorheological Effect in Polymer Blend," ERM97, International Conference on ERF, MRS and Their Applications, pp.7-50, 22-25 July 1997, Yonezawa, Japan.
7. 안병길, 최응수, 권오관, 문탁진, "인산처리 셀룰로오스를 첨가한 비수계 ER 유체의 전기 유변학적특성," J. of KSTLE, 제14권, 제2호, pp.1-9, 1998.
8. 안병길, 최응수, 권오관, 문탁진, "인산 에스테르 반응 셀룰로오스 미립자의 활성화가 비 수계 ER 유체의 전기유변학적특성에 미치는 영향," J. of KSTLE, 14권, 제3호, pp.7-16, 1998.
9. Block, H., Kelly, J. P., Qin, A. and Watson, T., "Materials and mechanism in electrorheology," Langmuir, Vol.6, pp.6, 1990.
10. Schwarz, G., J. Phys. Chem. 66, pp.2636, 1962.