

온도 변화에 따른 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전기유변학적 특성

안병길 · 오경근 · 최응수 · 권오관

한국과학기술연구원 트라이볼로지 연구센터

Electrorheological Properties of Phosphoric Ester Cellulose ER Fluids on the Elevated Temperature

B. G. Ahn, K. K. Oh, 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 powder (average particle size : $18 \pm 1 \mu\text{m}$) was investigated on the elevated temperature up to 100°C . For development of anhydrous ER fluids using at wide temperature range, it should be researched to know the effect of temperature on the ER activities. As a first step, the anhydrous ER suspensions mixing with the phosphoric ester cellulose particles which were made from the phosphoric ester reaction of cellulose were measured. As increasing the temperature, not only the analysis of electrical properties such as dielectric constant, current density and electrical conductivity but also the rheological properties of ER fluids were studied. From the experimental results, the temperature had a large influence to the ER properties of anhydrous ER fluids. The current density, conductivity and electrorheological effect (τ_e/τ_0) of phosphoric ester cellulose ER fluids were proportional to the temperature with power law. And the shear stress of them was closely related with the square of dielectric constant mismatch parameter (β^2) under constant shear rate and electric field.

Key words—phosphoric ester reaction of cellulose, dielectric constant mismatch parameter, anhydrous ER fluids, electrorheological effect (τ_e/τ_0).

1. 서 론

전기유변성 유체(electrorheological fluids, ER fluids)는 절연 성질을 나타내는 오일내부에 미세한 입자들을 분산시킨 현탁액을 지칭하는 명칭이다. 절연오일 내부에 분산되는 미세 입자들은 대부분이 외부 전기장에 대해 쉽게 분극이 유발되는 특징을 지니고 있으며, 외부 전기장이 가해짐에 따라 유도되는 분산 미립자들의 분극으로부터 발생하는 미세 입자간의 인력이 점유 형태의 미세 입자체인 구조를 절연오일 내부에 유발시킴으로써 현탁액의 고체화가 나타난다. 이상과 같은 거동을 보이는 ER 유체의 유용한 특징은 전기장 세기(electric field intensity)의 증가(또는 감소)에 의해 액체-고체 또는 고체-액체로의 변화가 가능하며, 그 변위의 범위가 비교적 넓고 연속적, 가역적이라는 것과 그 변동 속도가 매우 빠르다는 것이다.

외부 전기장에 대한 ER 유체의 이러한 변이는 클러치나 댐핑 장치 등과 같은 자동차 관련 응용 분야로의 적용과 로봇의 피드백 제어(feedback control) 등을 가능하게 할 수 있다. ER 유체를 이용한 또 다른 잠재적인 응용 장치들은 Shulman[1] 등에 의해 오랜 기간동안 연구되어졌다.

물질의 변형과 흐름에 대한 이러한 전기장의 영향은 오랜 기간 동안 연구자들에게 매우 흥미로운 주제로 인식되어 왔다. 이와 같이 전기장의 효과에 관한 분야로써 ER 효과(electrorheological effect)가 새로운 관심을 끌고 있으며, 이러한 효과는 1947년에 미국의 Willis Winslow [2,3]에 의해 발견되었기 때문에 “Winslow 효과”라 불리워지기도 한다. Winslow는 극소량의 수분이 첨가된 실리카 현탁액과 같이 2상 용액에 대해 외부로부터 강한 전기장이 가해지면 현탁액의 고체화가 급속히 나타나는 현상을 발견하였으며, 이러한 형태의 반응이 개선된 벨브나

댐핑 기구 등과 같은 기전 요소에 응용될 수 있음을 발표하였다. 최근에 이르러서는 Block[4]이 이러한 시스템들에 대한 종합적인 연구를 수행하였다.

일반적으로 ER 효과를 나타내는 ER 유체는 크게 2가지 종류로 분류할 수 있다. 첫 번째는 수분이 활성화를 위한 첨가제로 사용하여 분산 미립자의 분극화를 유도하는 wet-base형이고, 두 번째는 외부 전기장의 영향으로 입자 내부에 형성되는 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 장비와 디자인에 대한 심각한 문제점을 야기하는 부정적인 면 또한 가지고 있다. 또한 수분 활성 ER 유체가 갖는 가장 큰 단점은 사용 온도 범위의 한계성이다. 수분 활성 ER 유체는 온도가 증가함에 따라 유체 내부의 수분이 증발됨으로써 유체 내부에 존재하는 수분이 결과적으로는 ER 효과를 급속히 감소시키는 작용을 한다. 수분의 첨가에 따른 또 다른 문제점으로는 유전과피, 부식 및 높은 전력소비 등을 예로 들 수 있다.[5]

근래에 이르러서는 aluminosilicate[6]와 poly(acene quinones)[7] 등을 첨가한 비수계 ER 유체가 집중적으로 연구되고 있다. 비수계 ER 유체 내부에서는 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 분산 미립자의 사슬 구조 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 있으므로 사용 온도가 증가할 경우에 발생하는 ER 유체의 급격한 전류밀도 상승을 고려할 때, 60°C 이상의 고온에서는 사용하기 어려운 단점을 지니고 있다. 일반적으로 높은 유전상수 값을 갖는 소재는 거의 모두가 높은 전기전도도를 수반하므로 전기장에 의한 분산 미립자의 사슬 구조 형성시 ER 유체의 전류밀도가 증가하는 문제점을 야기시킨다. ER 유체를 기전 요소에 적용시킬 때, ER 유체의 높은 전기전도도는 여러 가지 문제점을 유발시킬 수 있다. 따라서 어떻게 하면 ER 유체의 전기전도도 증가를 작게 유지하면서 분산 미립자의 분극력을 증가시킬 수 있을 것인가 하는 문제가 ER 유체의 재료적인 문제점을 해결할 수 있는 방법이라 하겠다.

본 연구에서는 80°C 이상의 고온에서도 사용이 가능한 낮은 전류밀도의 비수계 ER 유체를 개발하기 위해 인산 에스테르 반응 셀룰로오스 미립자가 첨가된 비수계 ER 유체를 개발한 후, 온도 변화에 따른 비수계 ER 유체의 전기유변학적 특성에 대한 연구를 수행하였다. 실험에 사용된 비수계 ER 유체는 셀룰로오스에 인산 에스테르 반응[8]을 도입하여 개발한 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 실리콘 오일(50 cS)에 일정 부피 비율로 혼합하여 제조하였다. 온도 변화에 따른 비수계 ER 유체의 전기유변효과(electrorheological effect or relative shear stress, $\tau_r = \tau_s / \tau_0$)를 측정하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 인산 에스테르 셀룰로오스가 첨가된 비수계 ER 유체의 고온 사용 가능성을 확인하고자 하였다.

2. 실험

2-1. ER 유체 제조

본 연구에서는 인산 에스테르 반응으로 제조된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 첨가하여 비수계 ER 유체를 제조하였다. 셀룰로오스의 인산 에스테르 반응을 수행하기 위해 준비된 셀룰로오스(Sigmacell, Sigma Chemical Co.)의 평균 입자 크기는 20 μm 이었으며, 절연오일은 20°C, 1 kHz에서의 유전상수가 2.99인 50 cS 실리콘 오일(Shin-Etsu Silicone Co. Japan)을 사용하였다. 실험에 사용된 셀룰로오스 미립자는 그 자체의 특성상 낮은 전기전도도를 나타내고 있으나, 셀룰로오스의 인산 에스테르 반응 공정, 건조 공정, sieving 공정 등을 거침으로써 외부 전기장에 대한 미세 입자의 ER 반응을 향상시킨 비수계 ER 유체용 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자로 변환되었다.

2-1-1. 셀룰로오스의 인산 에스테르 반응

4 M의 요소(urea) 수용액에 인산(85%의 orthophosphoric acid)의 첨가 농도를 2.5 M로 고정시킨 인산-요소 수용액을 만든다[9]. 인산과 요소의 혼합에 의해 인산 암모늄이 형성되며, 중류수에 인산과 요소가 완전히 녹아들어 가도록 약 30분간 충분히 교반시켜 주었다. 수용액의 부피(ml) 당 셀룰로오스의 무게(g) 비가 약 10정도가 되도록 질량을 측정 후, 인산-요소 수용액 속에 셀룰로오스 미립자를 완전히 함침시키고 상온(20°C)에서 24시간 동안 교반시켜 주었다. 인산과 요소의 혼합 수용액내에 24시간 동안 함침된 셀룰로오스 미립자를 꺼내어 수분의 양이 셀룰로오스 자체 무게의 약 150% 정도가 되도록 한 후, 열처리를 위해 전기로 안에 일정하게 배열시켰다.

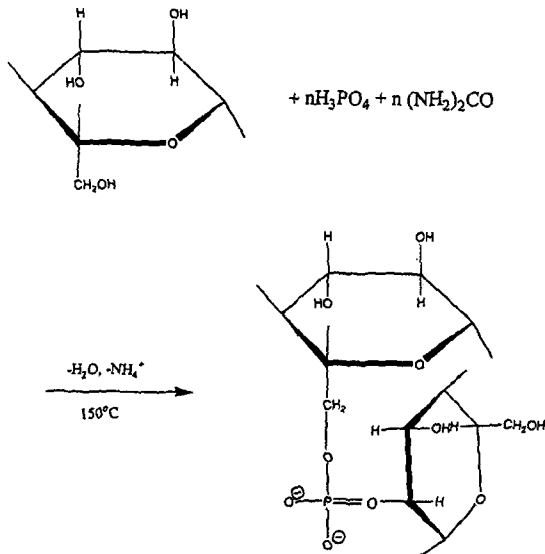


Fig. 1. Phosphoric ester reaction of cellulose.

전기로 안에 일정하게 배열된 셀룰로오스 미립자를 80°C의 온도에서 2시간동안의 1차 열처리 과정과 150°C에서의 2차 열처리 과정을 2시간동안 진행하였다. 셀룰로오스의 인산 에스테르 반응 과정을 Fig. 1에 도시하였다.

2-1-2. 건조공정 및 sieving 공정

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

이상과 같은 제조공정으로 만들어진 비수계 ER 유체용 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자와 역시 수분이 완전히 제거된 50 cS 실리콘 오일을 일정 부피 비율로 혼합하여 실험에 사용할 비수계 ER 유체를 제조하였다.

2-1-3. ER 유체의 제조

ER 유체의 분산매로는 50 cS의 실리콘 오일을 사용하였다. 실리콘 오일은 -50~200°C의 넓은 온도 범위에서 우수한 열 안정성을 나타내며, 전기전도도가 10~12 S/m로 전기 절연성 또한 매우 우수하다. 표면장력은 21

mN/m로 매우 낮으며, 온도 변화에 따른 점도 변화가 크지 않은 성질 등을 지니고 있다. 본 연구에서 사용된 실리콘 오일의 비중은 0.96이었으며, LCR 미터(Hewlett Packard, HP 4263B)를 사용하여 측정 한 유전상수는 2.99를 나타내었다.

비수계 ER 유체의 제조를 위해서 2.5 M의 인산과 4 M의 요소 수용액으로 처리된 셀룰로오스 미립자의 인산 에스테르 반응을 수행한 후, 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자들을 50 cS의 실리콘 오일에 20%의 부피 비율로 일정하게 첨가하였으며, 셀룰로오스 미립자와 실리콘 오일의 균일한 혼합을 위해 혼합 용액을 24시간 동안 볼밀에서 교반시켜 주었다.

2-2. 온도 변화에 따른 전기유변학적 특성 측정

온도 변화에 따른 비수계 ER 유체의 전기적 성질을 고찰하기 위해 온도를 증가시키면서 ER 유체의 유전상수(ϵ), 전류밀도(j , $\mu A/cm^2$) 및 전기전도도(σ , S/m) 등을 측정하였다. ER 유체의 유전상수는 LCR 미터를 사용하여 측정하였으며, 온도 변화에 따른 유전상수, 전류밀도 및 전기전도도의 측정을 위해 사용된 ER 유체용 온도 변화 전극의 개략도를 Fig. 2에 도시하였다. 고전압 발생기(KEITHLEY, Model 248)의 DC 전기장을 0.5~2 kV/mm까지 0.5 kV/mm 단위로 전기장을 조절하면서, 전기장 부하시 온도 변화에 따라 측정되는 전류의 양을 측정하여 온도 변화에 따른 ER 유체의 전류밀도를 계산하였다. Fig. 2에서 도시한 원통형 전극의 면적은

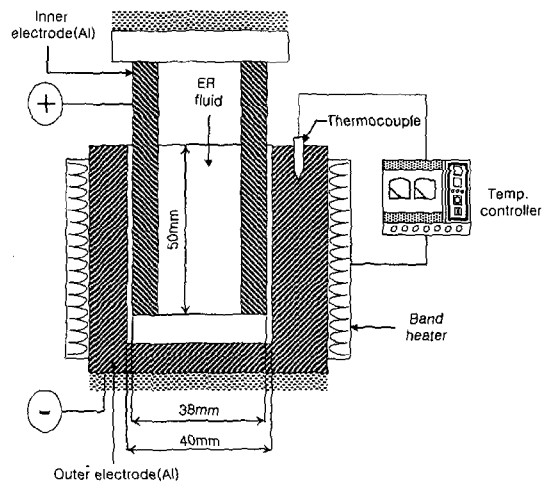


Fig. 2. Schematic diagram of electrode for measuring the current density and electrical conductivity of ER fluids at elevated temperature.

대수 평균을 이용하여 계산한 결과 59.69 cm^2 이었으며, ER 유체의 전류밀도 계산식은 다음과 같다.

$$j_f = \frac{I_f}{A} \quad (1)$$

여기서 A 는 전극 사이에 채워진 ER 유체와 접촉하는 전극의 면적, I_f 는 주어진 전기장 하에서 흐르는 전류이다. 계산된 전류밀도를 이용하여 ER 유체의 전기전도도를 다음 식으로 계산하였다.

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

그리고 ER 유체의 유전상수는 분산 미립자의 부피 분율 선형방정식[10]에 따라 다음의 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$K_s = K_p \phi + K_f (1 - \phi) \quad (3)$$

위 식에서 ϕ 는 분산 미립자의 부피 분율, K_s 는 ER 유체의 유전상수를 나타내며, K_p 와 K_f 는 각각 분산 미립자와 절연오일의 유전상수 값을 나타낸다.

온도 변화와 전기장 변화에 따른 비수계 ER 유체의 유변 성질을 고찰하기 위해 고전압 발생기와 항온조가 부착된 couette cell 형태의 점도계를 사용하였으며, 그 개략도를 Fig. 3에 도시하였다. 고전압 발생기로부터 만들어진 DC 전압이 점도계의 cup과 bob 양면에 가해지도록 제작하였으며, 유변 시험을 시작하기 전에 전기장을 약 10초동안 가하여 ER 유체 내부의 셀룰로오스 미립자 사슬 형성이 정상 상태에 도달하도록 한 후, 일정한 전기장과 일정한 전단변형율(shear rate)하에서 온도 증가에 따른 전단응력(shear stress)의 변화를 측정하였다.

ER 유체의 경우, 전기장에 반응하여 나타나는 겔보기 점도(apparent viscosity)와 전기장이 가해지지 않은 상태에서 나타내는 겔보기 점도의 비가 매우 중요하다. 이러한 ER 유체의 특성을 시험하기 위하여 온도 변화에 따른 “전기유변효과(electrorheological effect or relative shear stress, τR)”[7]를 측정하였으며, ER 유체의 전기유변효과 (τ_r)는 τ_a 와 τ_0 의 비로 표현되는 τ_r/τ_0 로 계산하였다. 일정한 온도와 전단변형율하에서 τ_a 는 전기장이 가해진 상태에서, τ_0 는 전기장이 가해지지 않은 상태에서 측정되는 전단응력을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 비수계 ER 유체용 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 분석

본 실험에서 제조된 인산 에스테르 반응 셀룰로오스 미립자의 밀도를 피크노미터(pycnometer)를 사용하여 측정된 결과, 그 값이 $1.28 \pm 0.05 \text{ g/cm}^3$ 이었다. $26 \mu\text{m}$ sieve를 통과한 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 입도 분석을 위해 입도 분석 기기인 image analysis system을 사용하였으며, 실험에 사용된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 평균 입자 크기는 $18 \pm 1 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 입도 분포 측정 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

한편 Fig. 5는 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 열안정성을 실험하기 위해 측정된 DSC 도표이다. 본 연구에서 개발한 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자는 200°C

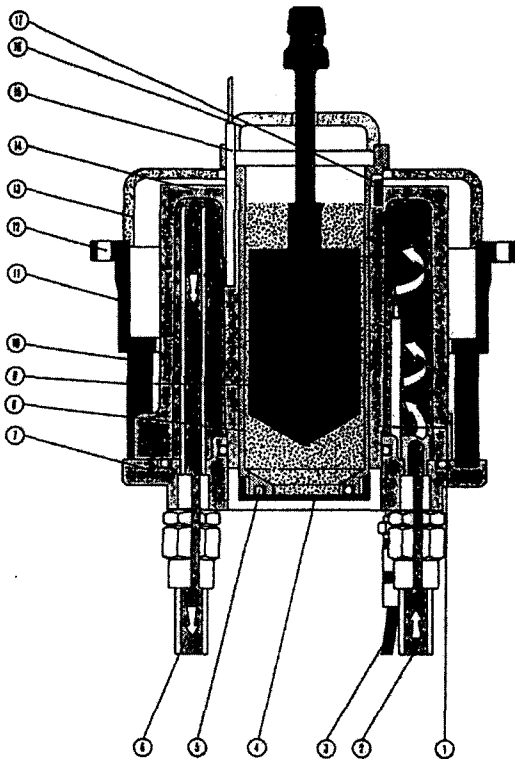


Fig. 3. Schematic diagram of viscometer for ER fluids.

1: thermocouple, 2: thermal liquid-inlet, 3: cable for thermocouple, 4: bottom of measuring cup, 5: packing ring, 6: thermal liquid-outlet, 7: cover, 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.

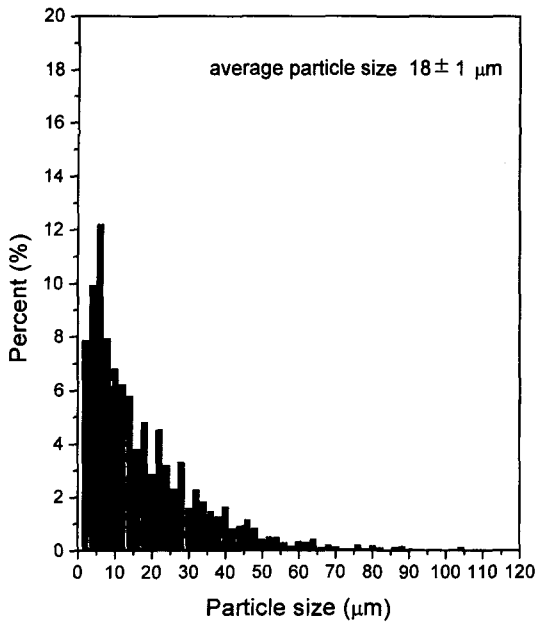


Fig. 4. Number distribution of particles size of phosphoric ester cellulose particles.

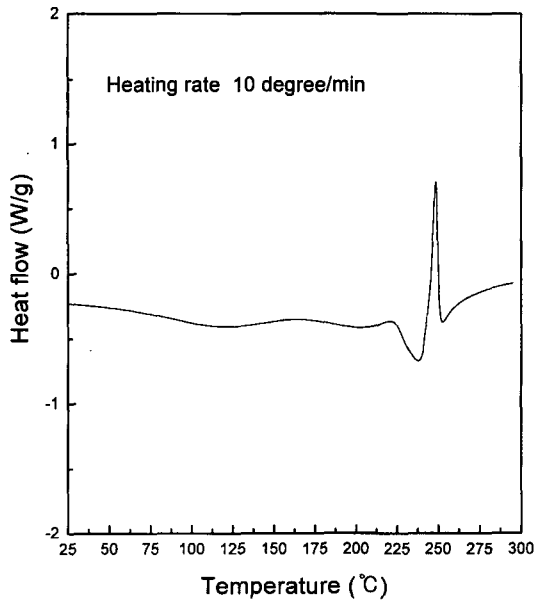


Fig. 5. DSC curve of phosphoric ester cellulose particles treated by 2.5 mole of phosphoric acid and 4 mole of urea.

이하의 온도에서는 매우 안정적인 열안정성을 나타내었으며, 230°C 이상의 온도에서 열분해가 발생됨을 알 수 있었다. 특히 100°C 내외의 온도에서 열량 변화가 거의

없는 것으로 보아 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 표면에 수분이 거의 함유되어 있지 않은 비수계 ER 유체용 미립자임을 알 수 있었다.

3.2. 온도 변화에 따른 전기적 특성

본 연구에서 제조한 비수계 ER 유체, 즉 2.5 M의 인산과 4 M의 요소 수용액으로 처리하여 인산 에스테르 반응을 시킨 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전류 밀도와 전기전도도를 온도 변화와 함께 측정하여 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6의 (a)는 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 20 vol.%, 수분을 완전히 제거시킨 50 cS 실리콘 오일이 80 vol.%의 일정한 혼합 비율로 제조된 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전류밀도를 온도 변화에 따라 측정한 것이며, Fig. 6의 (b)는 온도 변화에 따른 전기전도도로써 Fig. 6의 (a)로부터 계산한 값을 도표로 나타낸 것이다. 도표에서 보면, 온도 증가에 따른 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전류밀도 ($j_f \propto T^m$, $m=3.7\sim 4.0$)와 전기전도도($\sigma_f \propto T^n$, $n=3.7$)는 온도 증가에 대하여 power law적으로 급격하게 증가함을 관찰할 수 있었다.

Fig. 7은 온도 증가에 따른 절연오일, 즉 50 cS 실리콘 오일의 유전상수 값을 측정하여 도표로 나타낸 것이다. 도표에서 보면, 온도가 증가함에 따라 50 cS 실리콘

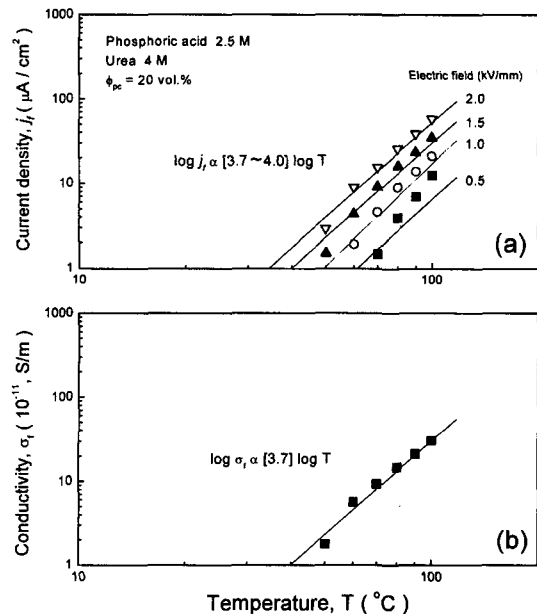


Fig. 6. Current density (a) and conductivity (b) of phosphoric ester cellulose ER fluids on the temperature.

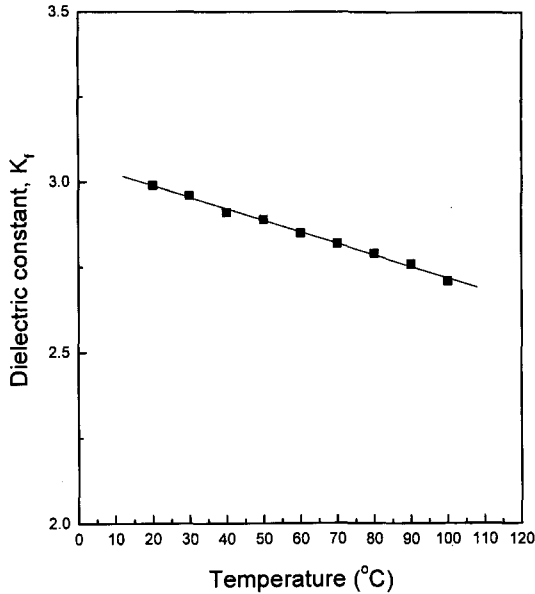


Fig. 7. Dielectric constant of the 50 cS silicone oil vs. temperature.

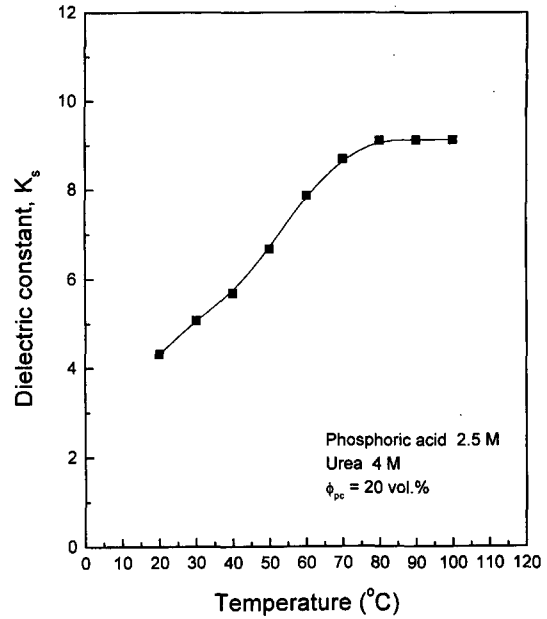


Fig. 8. Dielectric constant of phosphoric ester cellulose ER fluids on the temperature.

오일의 유전상수 값은 감소하고 있음을 관찰할 수 있었다.

Fig. 8은 온도 증가에 따른 인산 에스테르 셀룰로오스 비수계 ER 유체의 유전상수를 측정하여 도표로 나타낸 것이다. ER 유체의 유전상수는 온도가 80°C에 이를 때까지는 온도가 증가함에 따라 증가하다가 80°C 이상의 온도에서는 큰 변화가 없음을 관찰할 수 있다. 수분이 첨가되지 않은 비수계 ER 유체의 경우, 전기장에 대한 전단응력의 변화는 ER 유체의 유전상수 값과 밀접한 관계가 있다. 이러한 유전상수 변화로써 ER 유체의 특성을 설명한 ER 메카니즘이 “Point Dipole 메카니즘”이다. 이러한 “Point Dipole 메카니즘”은 Conrad et al.[10] (1991) 및 Klingenberg와 Zukoski[11] (1990) 등에 의해 제안되었다. 이러한 메카니즘은 두 개의 분산 미립자, 즉 두 개의 쌍극자(two dipoles)사이의 힘 F_d 는 일정한 전기장 하에서 분산 미립자의 반경 a 를 갖는 미립자들이 반경 a 보다 큰 거리 R 에 분리되어 있는 경우, 두 쌍극자 사이의 힘(point dipole force) F_d 는 아래의 방정식 (4)에 따라서 계산될 수 있다고 설명하였다.

$$F_d = 6p^2/4\pi\epsilon_0 K_f R^4 \quad (4)$$

여기서 p 는 분산 미립자의 쌍극자 모멘트(dipole moment)이며, 쌍극자 모멘트는 방정식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$p = 4\pi\epsilon_0 K_f a^3 E \left(\frac{K_p - K_f}{K_p + 2K_f} \right) \quad (5)$$

따라서 분산 미립자 사이의 쌍극자 힘 F_d 는 방정식 (6)으로 나타내어진다.

$$F_d = 24\pi\epsilon_0 K_f a^6 \beta^2 E^2 \quad (6)$$

여기서 ϵ_0 는 자유 공간(free space)에서의 유전상수이며, β 는 ER 유체에서의 유전상수 불일치 변수[10](dielectric constant mismatch parameter)로 $\{(K_p - K_f)/(K_p + 2K_f)\}$ 의 식으로 나타낼 수 있다. 위 식에서 K_p 는 분산 미립자의 유전상수를, K_f 는 절연오일의 유전상수 값을 각각 나타낸다.

따라서 방정식 (6)으로부터, 일정한 E , a 및 K_f 하에서 분산 미립자 사이의 쌍극자 힘인 F_d 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_d \propto \beta^2 \quad (7)$$

Fig. 7과 8 및 식 (3)으로부터 온도 변화에 따른 β^2 의 변화를 계산할 수 있으며, 그 결과를 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9에서 보면, 온도가 80°C에 이를 때까지는 β^2 값이 증가하였으나 80°C 이상의 온도에서는 거의 일정하게 유지되고 있음을 관찰할 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 비수계 ER 유체의 전기장에 대한 전단응

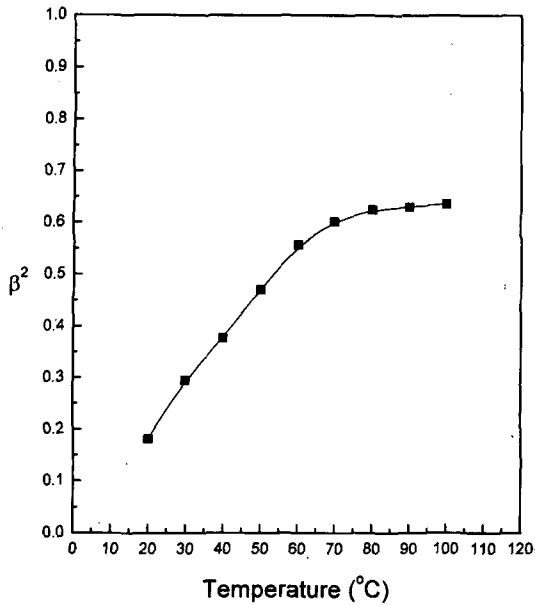


Fig. 9. The square of the dielectric mismatch parameter, $\beta(K_p - K_s)/(K_p + 2K_s)$, vs. temperature.

력 값이 80°C의 온도에 이를 때까지는 증가하리라는 것을 예측할 수 있다.

3-3. 온도 변화에 따른 유변 특성

ER 유체의 초기 점도(η_0), 즉 전기장이 가해지지 않은 상태하에서 측정되는 유체의 점도가 ER 유체의 전기유변효과에 큰 영향을 미치므로 인산 에스테르 셀룰로오스가 첨가된 비수계 ER 유체의 점도를 온도 변화에 따라 측정하였다. Fig. 10은 인산 에스테르 반응에서 인산과 요소의 첨가량을 각각 2.5 M과 4 M로 고정시켜 제조한 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 50 cS 실리콘 오일에 20 vol.%의 일정한 첨가량으로 혼합하여 만든 ER 유체의 초기 점도(η_0)를 온도를 변화시켜가며 측정된 결과를 도표로 나타낸 것이다. Fig. 10의 도표에서 보면, 온도 증가와 함께 인산 에스테르 비수계 ER 유체의 초기 점도가 감소함을 관찰할 수 있으며, 이는 온도 증가에 따른 50 cS 실리콘 오일의 점도 감소에 기인된 것이라 사료된다.

Fig. 11은 일정한 전단변형율(100 s^{-1})의 조건으로 본 연구에서 제조한 비수계 ER 유체의 전단응력 변화를 온도 변화에 따라 측정하여 도표로 도시한 것이다. Fig. 11의 도표에서 보면, 일정한 전단변형율하에서 ER 유체의 온도가 증가함에 따라 전단응력 값 역시 증가하고

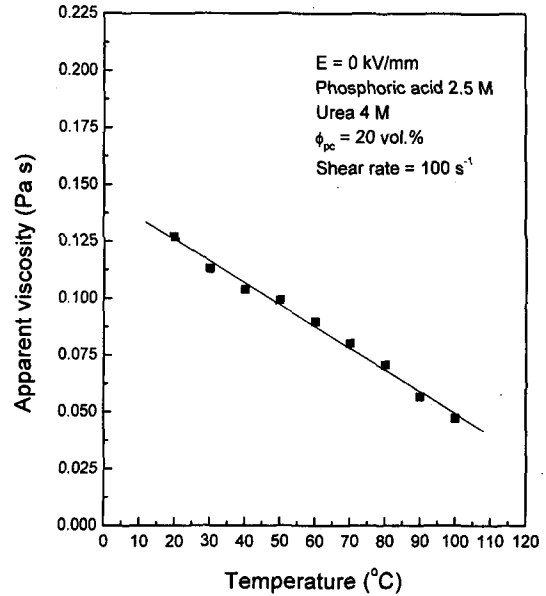


Fig. 10. Apparent viscosity behavior of phosphoric ester cellulose ER fluids on the temperature.

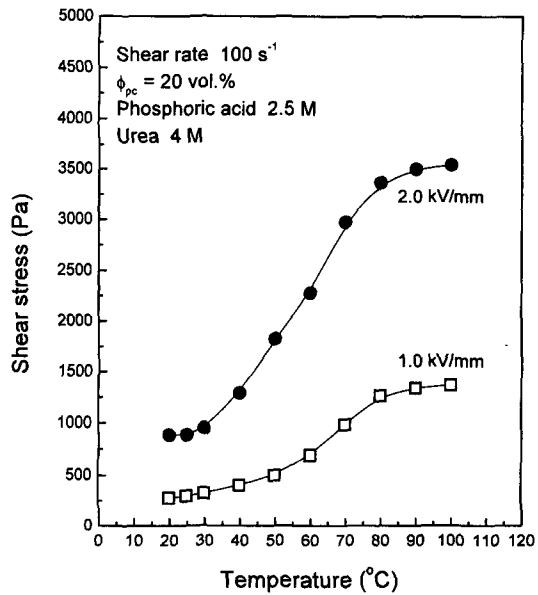


Fig. 11. Shear stress vs. temperature for $E=1 \text{ kV/mm}$ and 2 kV/mm .

있음을 관찰할 수 있으나 80°C 이상에서는 온도 증가에 따른 전단응력 증가 현상이 둔화됨을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 앞 절에서 설명한 Fig. 9의 결과로부터 설명될 수 있다. 즉 80°C까지는 β^2 의 증가에 의해 ER 유체의 전단응력 값이 증가하였으나, 80°C 이상

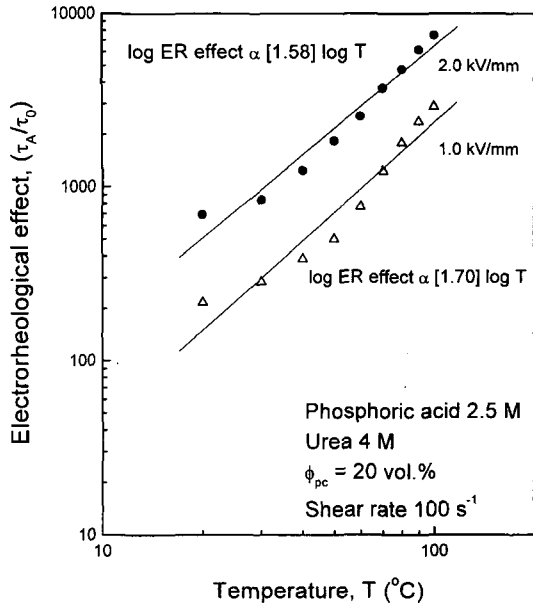


Fig. 12. Electrorheological effect of phosphoric ester cellulose ER fluids on the temperature.

의 온도에서는 β^2 의 증가가 나타나지 않으므로 전단응력의 증가가 둔화되는 것임을 식 (7)로부터 유추할 수 있다.

Fig. 12는 온도 변화에 따른 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전기유변효과를 일정한 전단변형율(100 s^{-1}) 하에서 측정하여 도표로 도시한 것이다. 도표에서 보면, 온도 증가에 따른 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전기유변효과는 ER 유체의 온도가 증가함에 따라 power law적으로 증가함을 관찰할 수 있으며, 이러한 현상은 본 연구에서 개발된 인산 에스테르 셀룰로오스가 첨가된 ER 유체가 80°C 이상에서도 우수한 ER 효과를 나타내는 비수계 전기유변성 유체임을 나타내는 것이라 할 수 있다. 이러한 온도 변화 실험 결과로 볼 때, 본 연구에서 개발한 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체가 80°C 이상의 고온에서도 사용이 가능한 고온용 비수계 ER 유체임을 알 수 있으며, 기전요소로서의 상용화 역시 가능하리라 사료된다.

4. 결 론

인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 첨가한 비수계 ER 유체의 온도 변화에 따른 전기유변학적 특성을 실험하여 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1. 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 열안정성을 조사하기 위한 DSC 측정결과, 200°C 이내의 온도에서 안정적인 열안정성을 나타냄을 관찰할 수 있었으므로 셀룰로오스의 인산 에스테르 반응으로 제조된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 비수계 ER 유체용 미립자임을 알 수 있었다.

2. 온도 증가에 따른 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전류밀도($j_f \propto T^m, m=3.7\sim 4.0$)와 전기전도도($\sigma_f \propto T^n, n=3.7$)는 온도 증가에 대하여 power law적으로 급격하게 증가함을 관찰할 수 있었다.

3. 인산 에스테르 반응으로 제조된 셀룰로오스가 첨가된 ER 유체는 온도에 매우 민감하게 반응하였으며, 일정한 전단변형율(100 s^{-1}) 및 전기장 하에서 온도 증가와 함께 나타나는 전단응력 값의 증가 현상은 온도 증가에 따른 β^2 , 즉 ER 유체의 유전상수 불일치 변수의 제곱승과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

4. 본 연구에서 개발한 인산 에스테르 셀룰로오스가 첨가된 ER 유체는 온도 증가와 함께 전기유변효과가 power law적으로 증가하였으며, 이러한 결과로부터 본 연구에서 개발한 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체가 80°C 이상의 고온에서도 사용이 가능한 고온용 비수계 ER 유체임을 알 수 있었다.

기호설명

E	: 전기장 강도
j_f	: ER 유체의 전류밀도($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
σ_f	: ER 유체의 전기전도도(S/m)
A	: 전극 사이에 채워진 ER 유체와 접촉하는 면적
I_f	: 주어진 전기장 하에서 ER 유체에 흐르는 전류
τ_0	: 전기장이 가해지지 않은 상태에서의 ER 유체 전단응력
τ	: 전기장이 가해진 상태에서의 ER 유체 전단응력
τ_r	: 전기유변효과(τ_r/τ_0)
F_d	: 두 쌍극자 사이의 힘
p	: 분산 미립자의 쌍극자 모멘트
ϵ_0	: 자유 공간에서의 유전상수
β	: ER 유체의 유전상수 불일치 변수
a	: 분산 미립자의 반경
K_s	: ER 유체의 유전상수
K_p	: 분산 미립자의 유전상수
K_f	: 절연오일의 유전상수
η^0	: ER 유체의 초기 점도($E=0 \text{ kV}/\text{mm}$)

참 고 문 헌

1. Shulman, Z. P., Gorodkin, R. G., Korobko, E. V. and Gleb, V. K., *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 8, 29, 1981.
2. Winslow, W. M., "Induced Fibration Suspension," *J. of Physics*, Vol. 20, pp. 1137-1140, 1949.
3. Winslow, W. M., U.S. Patent 2661596, 1953.
4. Block, H., Kelly, J. P., Qin, A. and Watson, T., "Materials and mechanism in electrorheology," *Langmuir*, 6, 6, 1990.
5. Therese, C. Jordan and Montgomery, T. Shaw, "Electrorheology," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol.24, No.5, Oct., 1989.
6. Frank, E. Filisko and 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.
7. Block, H. and Kelly, J. P., U.S. Patent 4687589, 1987.
8. Ermolenko, I. N., Lyublner, I. P. and Gulko, N. V., "Chemically Modified Carbon Fibers," VCH Publishers, New York, pp.129-134, 1990.
9. Ahn, B. G., Choi, U. S., Kwon, O. K. and Moon, T. J., "Electrorheological Properties of Anhydrous ER Suspensions Based on Phosphated Cellulose," *Journal of KSTLE*, Vol.14, No.2, pp.1-9, 1998.
10. Conrad, H., Sprecher, A. F., Choi, Y. and Chen, Y., "The temperature dependence of the electrical properties and strength of electrorheological fluids," *J. of Rheol.*, 35(7), Oct., 1991.
11. Klingenberg, D. J. and Zukoski, C. F., "Studies on the Steady-Shear Behavior of Electrorheological Suspensions," *Langmuir*, 6, pp.15-24, 1990.