

# ER 유체용 압축전극이 ER 유체의 전기유변학적 특성에 미치는 영향

안병길

요업기술원 신기능재료연구부 섬유·세라믹팀

## The Effect of Compressing ER Electrode on the Electrorheological Properties of ER Fluids

B.G. Ahn

Textile-Ceramic Hybrid Lab., New Functional Materials Research Department,  
Korea Institute of Ceramic Eng. & Tech., Seoul, Korea

**Abstract** - For increasing the yield stress of ER fluids, the compressing ER electrode was developed and the compressing electrorheological (ER) behavior of anhydrous ER fluids in silicone oil of phosphorous ester cellulose powder was investigated. Under constant electric field, not only the current density but also the yield stress of anhydrous ER fluids were studied as varying the compressing length of compressing ER electrode. From the experimental results, the compressing of ER electrode had a large influence to the ER properties of anhydrous ER fluids. The current density was proportional to the compressing length of ER electrode under constant electric field and volume fraction also the compressing yield stress was proportional to the volume fraction of dispersed particles under constant electric field and compressing length. When the ER electrode was compressed with 150mm after charging the electric field, 4 kV, the yield stress of phosphoric ester cellulose ER fluids increased to thirteen times comparing with the yield stress measured at normal electrode.

**Key words** : compressing ER electrode, anhydrous ER fluids, compressing electrorheological effect( $\tau_{y,c}/\tau_y$ ), compressing yield stress( $\tau_{y,c}$ )

## 1. 서론

물질의 변형과 흐름에 대한 전기장의 영향은 오랜 기간 동안 연구자들에게 매우 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 불려지기도 한다. Winslow는 미량의 수분이 첨가되어 있는 실리카 현탁액 (suspensions)과 같이 2 상 용액에 대해 강한 전기장이 외부로부터 가해지면 현탁액의 고체화가 급속히 나타나는 현상을 발견하였으며, 이러한 형태의 반응이 개선된 밸브나 댐핑기구 등과 같은 기전요소에 응용될 수 있음을 발표하였다.[1,2]

그러나 반세기의 역사를 지닌 ER 유체 (electrorheological fluid, ER fluid) 임에도 불구하고 이 분야에 대한 과학적, 산업적인 관심은 계속 이어지고 있으며, 이러한 지속적인 관심이 ER 유체를 과학적인 실험단계에서 ER 유체가 갖고있는 산업적 잠재능력의 현실화 단계로 전환시키고 있다. ER 유체의 산업계 현실화와 관련된 기술에서 가장 중요한 요소는 여전히 ER 유체의 항복응력 증가, 즉 전기장의 변화에 따른 ER 유체의 항복응력을 어떻게 하면 증가시킬 수 있느냐 하는 것이다.

1980년대 후반에 들어서면서 ER 유체가 갖는 폭넓은 응용성으로 인해 선진 여러 나라에서는 외부 전기장에 대하여 우수한 ER 반응을 나타내는 "고기능 ER 유체의 개발 연구"와 함께 이러한 소재를 이용한 "응용 장치의 개발 연구"가 활발히 진행되고 있다. "고기능 ER 유체의 개발 연구" 분야는 절연 오일 내에 분산되어 있는 미립자가 외부로부

터 전기장이 가해질 때 형성하는 입자의 체인 구조 형성을 설명하기 위한 "ER 현상의 모델링 연구"와 함께 외부 전기장의 변화에 따른 ER 유체의 빙햄 거동 (bingham behavior) 특성을 설명하려는 "역학적 특성의 규명 연구"가 진행되고 있다.[3,4,5] 우수한 ER 반응을 나타내는 소재를 개발하기 위한 연구에서는 기존의 수분 활성 ER 유체가 갖는 사용 온도의 한계성 문제를 극복하기 위한 비수계 ER 유체 개발, 즉 외부로부터의 전기장 부하시 발생하는 유발 쌍극자 모멘트 (induced dipole moment)의 변화가 우수한 물질을 첨가한 고온용 비수계 ER 유체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[6] 또 다른 연구분야로는 외부 전기장의 강도에 따라서 ER 유체의 가점성 (apparent viscosity)이 변하는 성질을 이용한 기전 요소 부품으로의 응용분야이다. Winslow에 의해 개발된 "ER 클러치"가 자동차 산업계의 큰 관심을 끌었으며, 현재까지도 "ER 클러치"와 "ER 댐퍼"는 자동차업계가 큰 관심을 갖고 있는 분야이다. 그러나 ER 유체를 사용한 "ER 클러치"의 경우, 자동차의 클러치에 적용하기 위해서는 충분한 토크 (torque)를 공급해야 하기 때문에 클러치의 장비가 비현실적인 규격 (0.5M×0.5M 또는 0.1M×14M)을 지녀야 하는 문제점을 가지고 있다.[7] 이러한 문제점 때문에 ER 유체가 자동차에 응용될 수 있는 분야로는 충격완화장치 (shock absorber)와 엔진 마운트 (engine mount)로 한정되어진다. 그밖에도 밸브, 박막변환기(membrane transducer) 및 연동펌프 (peristaltic pump) 등과 관련된 적용 연구가 활발히 진행되고 있다.[8]

이와 같이 ER 유체가 갖는 무한한 잠재력을 현실화시키는데 있어서 가장 중요한 요소는 외부 전기장에 대한 ER 반응이 우수한 새로운 ER 유체, 즉 항복응력이 매우 높은

ER 유체를 개발하는 것이다. 즉 외부 전기장에 대하여 높은 항복응력을 나타냄은 물론 낮은 전류밀도를 나타내며, 고온에서도 안정적인 ER 효과를 나타내는 ER 유체의 개발이 궁극적인 연구목표라 할 수 있다. 현재 세계 여러 나라에서 활발히 진행중인 ER 유체 관련 연구과제의 연구목적은 항복응력이 높은 ER 유체를 개발하는 것으로, 궁극적으로는 기전요소로서의 ER 유체 상용화를 가능하게 하기 위한 연구가 수행되고 있다.

본 연구에서는 낮은 전류밀도를 갖는 비수계 ER 유체, 즉 인산 에스테르 셀룰로오스가 첨가된 비수계 ER 유체를 개발한 후, 개발된 비수계 ER 유체의 항복응력을 증가시키기 위한 연구를 수행하였다. 실험에 사용된 비수계 ER 유체는 실리콘 오일에 인산 에스테르 반응 (phosphoric ester reaction)[9]으로 만들어진 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 일정 부피비로 혼합하여 제조하였다. 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 첨가량 변화와 전기장 변화에 따른 항복응력의 변화를 측정하였으며, 개발된 비수계 ER 유체의 항복응력을 증가시키기 위해 ER 유체용 압축전극을 개발하였다. 개발된 ER 유체용 압축전극을 사용하여 ER 유체용 압축전극의 압축에 따른 압축항복응력 (compressing yield stress,  $\tau_{yc}$ ), 전류밀도 (current density,  $j$ ) 및 압축전기유변효과 (compressing electro-rheological effect,  $\tau_{yc}/\tau_y$ ) 등을 측정함으로써 ER 유체용 압축전극이 ER 유체의 전기유변학적 특성에 미치는 영향을 규명하고자 하였으며, 아울러 ER 유체용 압축전극에 의한 ER 유체의 상용화 가능성을 타진하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. ER 유체 제조

본 연구에서는 인산 에스테르 반응[9]으로 제조된 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자 [10]를 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  $20^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ kHz}$ 에서의 유전상수가 2.9인 50 cS 실리콘 오일 (Shin-Etsu Silicone Co. Japan)을 사용하였다. 실험에 사용된 셀룰로오스 미립자는 그 자체의 특성상 낮은 전기전도도를 나타내나, 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.[9]

ER 유체의 분산매로는 50 cS의 실리콘 오일을 사용하였다. 실리콘 오일은  $-50^\circ\text{C} \sim 200^\circ\text{C}$ 의 넓은 온도 범위에서 우수한 열안정성을 나타내고 있으며, 전기전도도가  $10^{-14} \text{ S/cm}$ 로 전기 절연성이 매우 우수하다. 표면장력 또한  $21 \text{ mN/m}$ 로 매우 낮으며, 온도 변화에 따른 점도 변화가 크지 않은 성질을 지니고 있다. 본 연구에서 사용된 실리콘 오일의 비중은 0.96 이었으며, 유전상수는 2.99이다. [9]

본 연구에서 사용할 ER 유체의 제조는 셀룰로오스의 인산(85%의 orthophosphoric acid) 처리 몰수를 3M, 요소(urea)의 처리 몰수를 4M로 고정시킨 후, 열분해 공정과 건조공정 및 sieving 공정을 거쳐 평균입도 크기가  $17.77 \mu\text{m}$ [10]인 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자를 제조하였다. 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 수분을 완전히 제거하기 위해  $100^\circ\text{C}$ 의 진공 오븐에서 48 시간 동안 유지시킨 후, 50 cS의 실리콘 오일에 10%, 20%, 30%, 40%의 일정한 부피분율로써 혼합하였다. 인산 에스테르 셀룰로오스

미립자와 실리콘 오일의 균일한 혼합을 위해 혼합 용액을 24 시간 동안 볼-밀에서 교반시켜 주었다.

## 2.2. ER 유체용 압축전극에 의한 전기유변학적 특성

인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전기적 성질을 ER 유체용 압축전극을 이용하여 측정하였으며, 실험에 사용된 압축전극의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1에서 보면, 압축전극의 압축에 의한 ER 유체의 전기유변학적 특성을 고찰할 수 있도록 ER 유체용 전극의 간극을 최대 150mm까지 변형시킬 수 있도록 고안하였다. 일정한 전기장하에서 ER 유체용 전극을 변화시키면서, 즉 ER 유체를 50mm, 100mm 및 150mm 씩 압축하여 전극의 간격을 1mm로 유지한 뒤, 압축된 ER 유체의 전류밀도( $j_f, \mu A/cm^2$ )를 측정하였다. 고전압 발생기 (KEITHLEY, Model 248)의 DC 전기장을 1 - 4.0 kV/mm의 범위에서 1.0 kV/mm씩 증가시켰으며, 아울러 전기장 부하시 측정되는 전류의 양을 측정하여 ER 유체의 전류밀도를 계산하였다. Fig. 1에서 도시한 ER 유체용 압축 전극의 면적은 6 cm<sup>2</sup> 이었으며, 압축된 ER 유체의 전류밀도는 다음의 식에 의하여 계산하였다.

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

여기서  $A$ 는 전극 사이에 채워진 ER 유체와 접촉하는 전극의 면적,  $I_f$ 는 주어진 전기장하에서 흐르는 전류,  $E$ 는 가해진 전기장이다.

[Fig. 1]

일정한 전기장과 일정한 분산 미립자 첨가량하에서 ER 유체용 압축전극의 압축거리 변화에 대한 ER 유체의 전기유변 성질을 고찰하기 위해 고전압 발생기가 부착된 ER 유체용 압축전극을 사용하였으며, 그 개략도는 Fig. 1에 도시하였다. Fig. 1의 개략도에서 보면, 고전압 발생기로부터 만들어진 DC 전압이 압축용 ER 전극 상·하부에 가해지도록 제작하였다. ER 유체에 압축을 시작하기 전에 전기장을 가한 후, 약 10 초 동안 유지하여 ER 유체내의 셀룰로오스 미립자 사슬 형성이 정상상태에 도달하도록 하였다. 10초의 유지시간이 경과한 후, 일정한 전기장하에서 ER 유체용 압축전극의 간극을 압축시켜 전극간의 거리가 1 mm가 되도록 하였다. 압축전극의 간극이 1mm가 되도록 압축한 후, 하부 전극의 전단응력 (shear stress)을 증가시키면서 하부 전극이 움직이는 시기의 전단응력 (shear stress)을 값을 취해 압축에 의한 ER 유체의 압축항복응력 (compression yield stress,  $\tau_{y,c}$ ) 값을 얻을 수 있었다. 전기장의 강도, 전극의 압축 길이 및 분산미립자의 첨가량 변화 등에 따른 ER 유체의 압축항복응력 변화를 측정하였다.

ER 유체의 경우, 전기장에 반응하여 나타나는 항복응력의 증가가 매우 중요하다. 이러한 ER 유체의 항복응력 특성 변화를 시험하기 위하여 “압축전기유변효과(compressing electrorheological effect,  $\tau_c = \tau_{y,c}/\tau_y$ )”[10]를 측정하였으며, ER 유체의 압축전기유변효과 ( $\tau_c$ )는  $\tau_{y,c}$ 와  $\tau_y$ 의 비로 표현되는  $\tau_{y,c}/\tau_y$ 로 계산하였다.  $\tau_{y,c}$ 는 압축전극하에서,  $\tau_y$ 는 압축되지 않은 전극하에서 측정되는 항복응력 (yield stress)을 각각 나타낸다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. ER 유체의 압축에 의한 전기적 특성

본 연구에서 제조한 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자의 첨가량 변화에 따른 ER 유체의 전류밀도( $j_f$ )를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 그래프에서 보면, 일정한 전기장하에서 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전류밀도( $j_f \propto \phi_p$ )가 분산미립자인 인산 에스테르 셀룰로오스 첨가량( $\phi_p$ )에 비례함을 알 수 있다.

본 연구에서 개발한 ER 유체용 압축전극에 인산 에스테르 셀룰로오스 비수계 ER 유체를 넣은 후, 압축전극의 압축거리( $t$ ) 변화에 따른 ER 유체의 전류밀도를 20°C의 상온에서 측정하여 Fig. 3에 도시하였다. Fig. 3은 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 각각 10, 20, 30, 40 vol.%씩 첨가된 비수계 ER 유체의 전류밀도를 일정한 전기장(4 kV) 하에서 ER 유체용 압축전극의 압축거리 변화에 따라 측정한 것이다. 도표에서 보면, 압축거리( $t$ )의 증가에 따른 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전류밀도 ( $j_f \propto t^m$ ,  $m=1.09 \sim 1.30$ )는 압축거리 증가에 대하여 power law적으로 급격하게 증가함을 관찰할 수 있었다.

Fig. 2, 3의 그래프에서 보면, 같은 부피분율의 첨가량으로 인산 에스테르 셀룰로오스 미립자가 분산될지라도 ER 유체용 압축전극의 압축거리( $t$ ) 변화에 따라 나타나는 ER 유체의 전류밀도가 다르게 측정됨을 알 수 있다. 일정한 압축거리하에서 분산 미립자인 인산 에스테르 셀룰로오스의 첨가량이 증가할수록 전류밀도가 높게 측정되었으며, 일정한 첨가량의 분산 미립자를 첨가한 ER 유체일지라도 ER 유체용 압축전극의 압축거리를 증가시키면 따라 전류밀도가 급격히 증가함을 관찰할 수 있다. 이러한 결과는 분산 미립자의 첨가량이 같은 ER 유체일지라도

ER 유체용 압축전극의 압축거리를 조절하면, ER 유체의 전류밀도 조절이 충분히 가능하다는 것을 나타내는 것이며, 더 나아가 일정한 양의 분산미립자를 첨가한 ER 유체일지라도 압축전극의 압축거리를 조절하면 전기장에 대한 항복응력의 조절까지도 충분히 가능하리라는 것을 나타내는 결과이다.

[Fig. 2]

[Fig. 3]

### 3.2. ER 유체의 압축전기유변 특성

본 연구에서 개발한 ER 유체용 압축전극을 이용하여 전극의 압축에 의한 전기유변학적 특성 변화를 관찰하였으며, 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 4는 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 항복응력을 압축하지 않은 상태에서 전기유변학적 특성을 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 많은 연구자들이 전기장의 세기가 ER 유체의 항복응력에 미치는 영향을 조사해 왔으며, 그 일반적인 관계식은 다음과 같다. [5, 12]

$$\tau = AE^m \quad (2)$$

여기서,  $\tau$ 는 항복응력,  $E$ 는 전기장이며,  $A$ 와  $m$ 은 각각 상수를 각각 나타낸다.

일반적인 ER 유체의 경우, 항복응력은 전기장의 제곱승에 비례한다고 알려져 왔으나 많은 경우의 실험에서 항복응력이 이러한  $E^2$  의존성으로부터 벗어나는 현상들이 보고되고 있다. 본 연구에서 사용한 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 경우, Fig. 4의 그래프에서 보면,  $m$ 의 값이 1.80 - 1.96으로 나타남을 알 수 있다.

[Fig. 4]

Fig. 5는 본 연구에서 개발한 ER 유체용 압축전극의 압축거리를 변화시키면서 전기장 변화에 따른 압축항복응력 (compressing yield stress,  $\tau_{y,c}$ )을 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 전기장을 일정하게 가한 상태에서 압축거리(t)를 50mm, 100mm 및 150mm로 각각 조절하여 1 mm의 ER 유체용 압축 전극을 만든 후에 압축항복응력을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5의 (a), (b) 및 (c)에 각각 도시하였다. Fig. 5의 (a)는 전극의 압축거리를 50mm로 일정하게 유지하면서, 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 압축항복응력을 전기장의 변화에 따라 측정한 것이다. Fig. 5의 (b)는 압축거리를 100mm, (c)는 압축거리를 150mm로 각각 일정하게 압축하면서 전기장의 변화에 따른 ER 유체의 압축항복응력 변화를 측정하여 그래프로 각각 나타낸 것이다. (a)의 그래프에서 보면, 50mm의 압축을 수행한 ER 유체의 경우, 압축항복응력이 전기장 증가와 함께 급격히 증가하였으며, (2)의 식에서 m의 값이 1.97 - 1.98로 나타남을 알 수 있다. Fig. 5의 (b)와 (c)의 그래프에서 보면, (a)의 그래프와 마찬가지로 전기장이 증가함에 따라 압축항복응력이 급격히 증가함을 관찰할 수 있으며, m의 값이 2.03 - 2.11 (b), 2.13 - 2.21 (c)로 각각 나타남을 관찰할 수 있다. 즉, ER 유체용 압축전극에서 압축거리 t가 증가할수록 전기장의 변화에 대한 ER 유체의 압축항복응력이 급격히 증가하였으며, 이러한 실험 결과로부터 분산 미립자의 첨가량이 같은 ER 유체일지라도 ER 유체용 압축전극의 압축거리를 증가시키면 외부 전기장에 대한 ER 유체의 항복응력을 급격히 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다.

[Fig. 5]

Fig. 6은 ER 유체의 항복응력에 대한 압축전극의 압축거리(t) 영향을 관찰하여 그래프로 도시한 것이다. 그래프에서 보면, 일정한 전기장하에서 압축전극의 압축거리가 증가할수록 ER 유체의 항복응력이 지수함수적으로 급격히 증가함을 관찰할 수 있다. 특히,  $\tau_{y,c}=E^m$ 의 결과로부터 보면, 분산미립자의 첨가량이 40%인 경우에는 m의 값이 1.51이었으나 30%일 때에는 1.49, 20%일 때에는 1.38, 10%일 때에는 1.23으로 나타남으로써 분산미립자의 첨가량이 감소할수록 m의 값이 감소함을 알 수 있다. 즉 일정한 전기장하에서 분산미립자의 첨가량이 증가할수록 압축전극의 압축거리 증가에 대한 항복응력의 증가 현상이 더 급격히 나타남을 알 수 있다.

[Fig. 6]

Fig. 7은 4 kV의 전기장과 150mm의 일정한 압축거리하에서, 분산 미립자 변화에 따른 압축항복응력( $\tau_{y,c}$ )의 변화를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보면, 일정한 압축거리(t) 하에서 분산 미립자의 첨가량이 증가할수록 압축항복응력이 지수함수( $\tau_{y,c} \propto \phi^{1.26}$ )적으로 증가함을 알 수 있다. 즉, ER 유체내의 분산 미립자 첨가량이 증가할수록 압축전극의 압축에 의한 항복응력 증가가 용이하게 나타남을 관찰할 수 있었다.

[Fig. 7]

[Fig. 8]

Fig. 8은 ER 유체용 압축전극에 의한

압축전기유변효과( $\tau_{y,c}/\tau_y$ ), 즉 압축전극의 압축에 의해 얻어지는 압축항복응력( $\tau_{y,c}$ )과 압축하지 않은 상태에서 나타나는 항복응력( $\tau_y$ )의 비를 측정하여 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 보면, 전기장의 세기가 증가할수록 압축전기유변효과가 증가함을 알 수 있으며, 같은 전기장하에서도 분산 미립자의 첨가량이 증가할수록 압축전기유변효과가 증가하고 있음을 관찰할 수 있다. 이러한 결과에서 보면, 본 연구에서 개발한 ER 유체용 압축전극을 사용하여 40%의 분산 미립자가 분산된 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체에 4 kV의 전기장을 가하고 150mm의 전극압축을 수행하여 압축된 ER 유체의 전기장을 4 kV/mm로 유지하였을 경우, 압축하지 않은 4 kV/mm의 전기장하에서 측정되는 ER 유체의 항복응력에 비해 약 13배 이상의 항복응력 증가현상을 나타내고 있음을 관찰할 수 있었다.

이상과 같은 연구 결과로부터, 전기장에 대한 ER 유체의 낮은 항복응력에 기인되는 ER 유체의 상용화 문제점을 해결하는 데, 본 연구에서 개발한 ER 유체용 압축전극이 큰 역할을 수행할 수 있으리라 기대된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 전기장에 대한 ER 유체의 항복응력을 증가시키기 위해 ER 유체용 압축전극을 개발하였으며, 압축전극에 의한 ER 유체의 압축 전기유변 특성을 실험적으로 고찰하여 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

1. 인산 에스테르 셀룰로오스 ER 유체의 전류밀도( $j_f$ )는 분산 미립자 첨가량에 비례( $j_f \propto \phi_p$ ) 하였으며, ER 유체용 압축전극의 압축거리(t)가 증가할수록 ER 유체의 전류밀도가 power law ( $j_f \propto t^m$ ,  $m=1.09\sim 1.30$ )적으로

로 급격하게 증가하였다.

2. ER 유체용 압축전극에 의한 ER 유체의 압축항복응력( $\tau_{y,c}$ ) 변화는 압축전극의 압축거리(t)와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었으며, 일정한 압축거리하에서 전기장이 증가할수록 ER 유체의 압축항복응력은 power law ( $\tau_{y,c} \propto E^m$ ,  $m = 1.97 - 2.21$ )적으로 급격하게 증가하였다.

3. 일정한 전기장하에서 ER 유체용 압축전극의 압축거리(t)가 증가할수록 ER 유체의 항복응력이 지수함수적으로 급격히 증가함을 관찰할 수 있었으며, 일정한 전기장하에서는 분산 미립자의 첨가량이 증가할수록 ER 유체용 압축전극의 압축거리 증가에 대한 압축항복응력의 증가 현상이 더 급격히 나타났다.

4. ER 유체용 압축전극의 압축거리(t)와 전기장을 일정하게 유지하였을 경우, 분산 미립자의 첨가량이 증가할수록 압축항복응력( $\tau_{y,c}$ )이 지수함수( $\tau_{y,c} \propto \phi^{1.26}$ )적으로 급격히 증가하였으며, ER 유체의 분산 미립자 첨가량이 증가할수록 압축전극에 의한 압축항복응력의 증가가 용이하였다.

5. ER 유체용 압축전극에 의한 압축전기유변효과( $\tau_{y,c}/\tau_y$ )는 전기장의 세기에 비례하였으며, 일정한 전기장하에서는 분산 미립자의 첨가량에 비례하였다.

6. 분산 미립자의 첨가량이 같은 ER 유

체일지라도 ER 유체용 압축전극의 압축거리(t)를 조절함으로써 ER 유체의 전류밀도와 항복응력의 조절이 가능하였으며, 특히 40 vol.%의 분산미립자가 분산된 ER 유체에 4 kV의 전기장을 가하고 150mm의 전극압축을 수행하였을 경우, 압축하지 않은 ER 유체의 항복응력에 비해 약 13배 이상의 항복응력 증가현상을 나타내었다.

7. ER 유체용 압축전극이 ER 유체의 항

복용력을 크게 증가시킴으로써 ER 유체용 압축전극에 의한 기전요소로서의 ER 유체 상용화가 가능하리라 사료된다.

#### 참고문헌

1. Winslow, W.M., "Induced Fibrillation Suspension", J. of Physics, 20, 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, 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. Felisko 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, 1, (1988).
8. Gorodkin R.G., Korobko, Ye.V., Blokh G.M., Blokh V.K., Sidorova G.I. and Ragother M.M., "Applications of Electrorheological Effect in Engineering Practice", Fluid Mech. Sov. Res., 4, 48, (1979).
9. 안병길, 최응수, 권오관, 문탁진, "셀룰로오스의 인산 에스테르 반응이 비수계 ER 유체의 전기유변학적 특성에 미치는 영향", The Korean Journal of Rheology, Vol.10, No.3, pp.143-151, September (1998)
10. Ahn B.G., Choi U.S. and Kwon O.K., "Design of Anhydrous Electrorheological Suspensions Based on Phosphate Cellulose", Polymer Journal, Vol.31, No.6, pp.494-499, (1999)
11. Gamota D.R. and Filisco F.E., J of Rheol., 35(3), pp. 399, (1991)



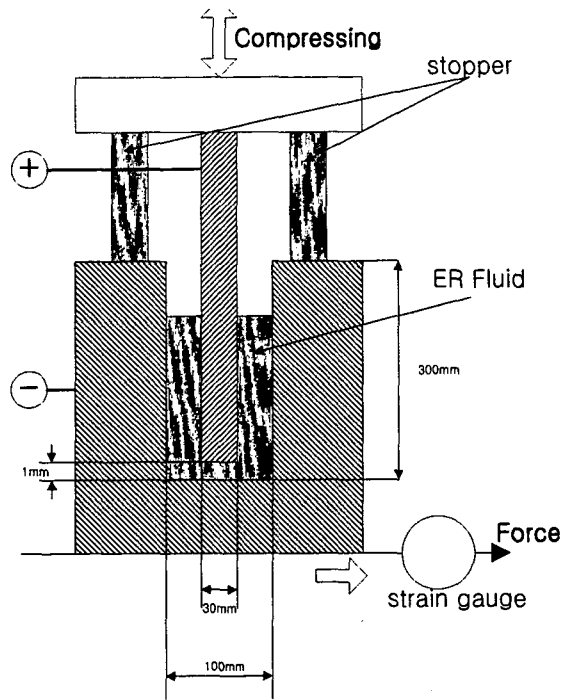


Fig. 1 Schematic diagram of compressing ER electrode for measuring the compressing yield stress of ER fluids.

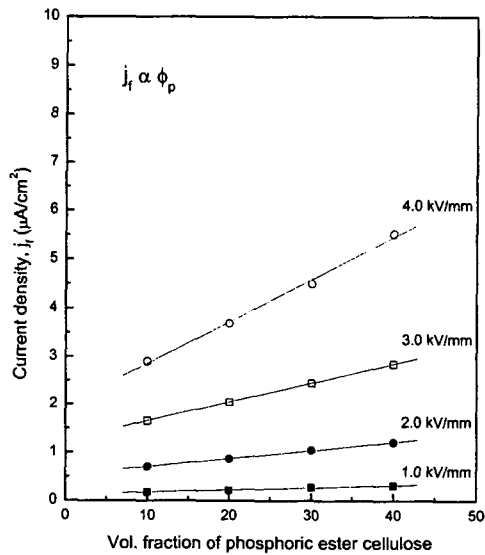


Fig. 2 Correlation between the current density and the volume fraction of phosphoric ester cellulose ER fluids.

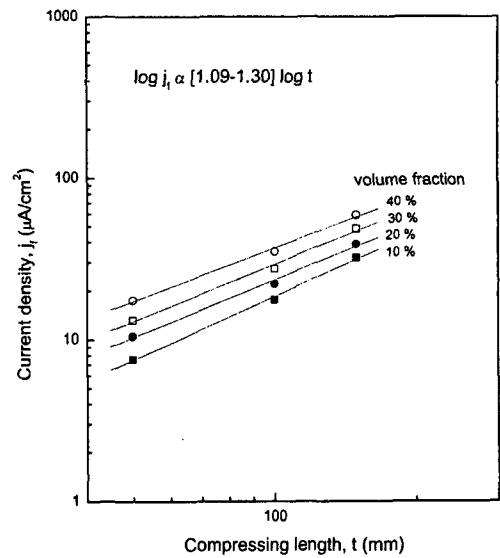


Fig. 3 Current density responses of phosphoric ester cellulose ER fluids on the various compressing length. (Electric field = 4 kV)

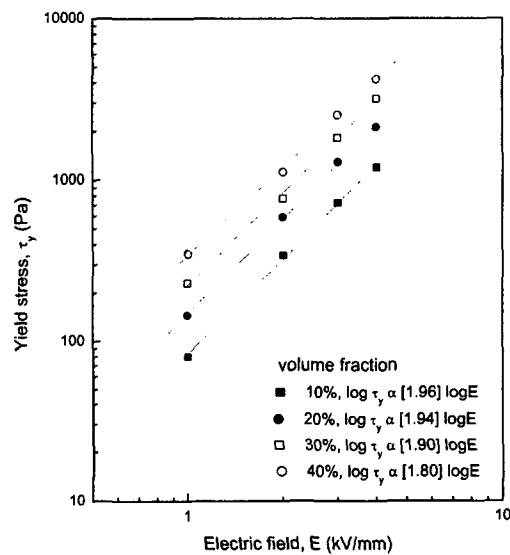
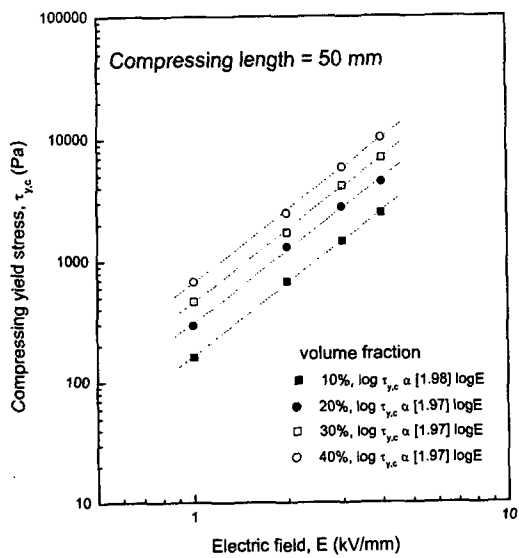
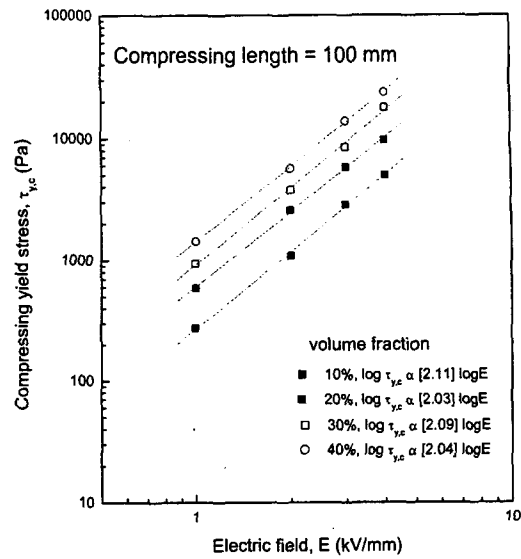


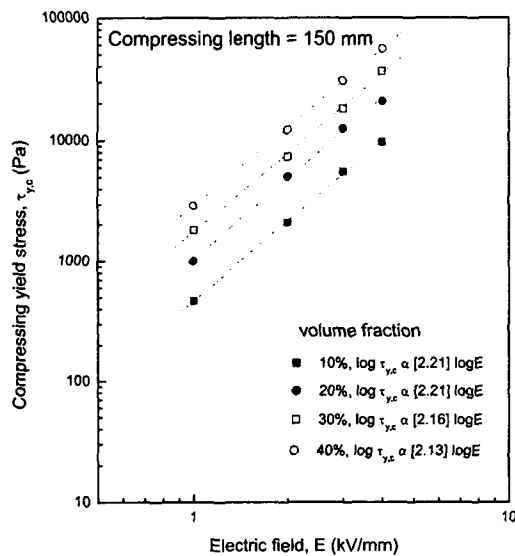
Fig. 4 Correlation between the yield stress and the electric field for the phosphoric ester cellulose content in 50 cS silicone oil.



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 Correlation between the compressing yield stress and the electric field for the phosphoric ester cellulose content in 50 cS silicone oil.

(a) compressing length = 50 mm

(b) compressing length = 100 mm

(c) compressing length = 150 mm

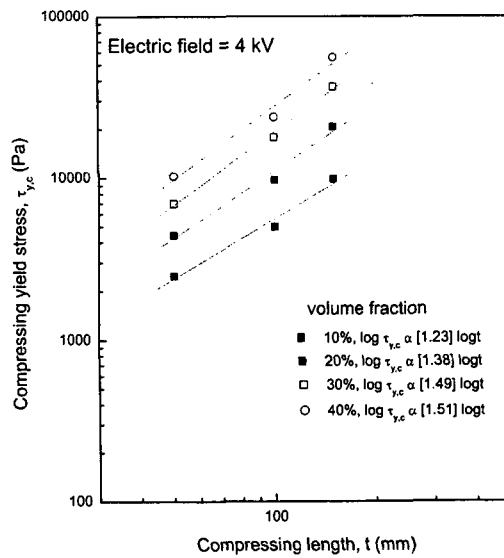


Fig. 6 Correlation between the compressing yield stress and the compressing length for the phosphoric ester cellulose content in 50 cS silicone oil.

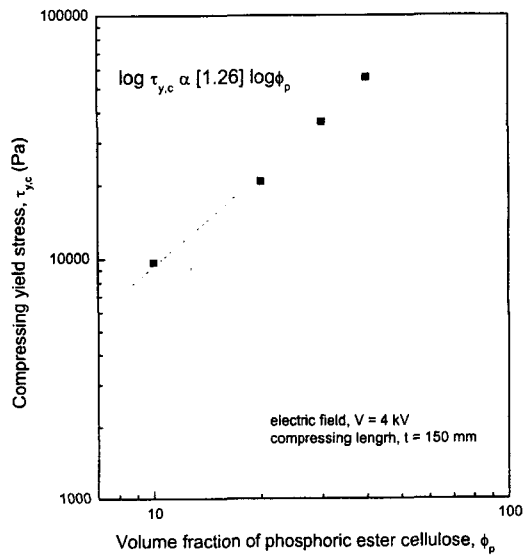


Fig. 7 Correlation between the compressing yield stress and the volume fraction of phosphoric ester cellulose particles under constant electric field and compressing length. (electric field,  $V = 4$  kV, compressing length,  $t = 150$  mm)

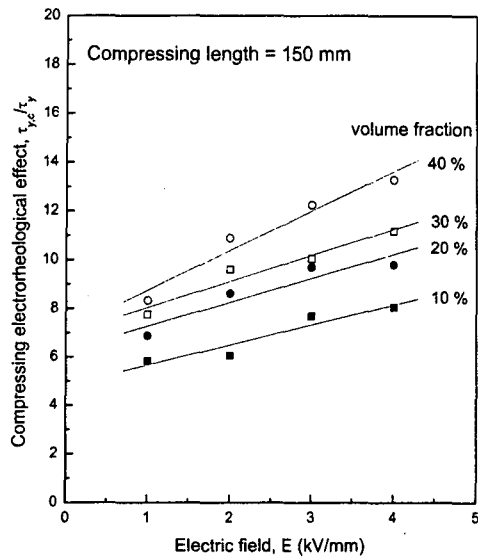


Fig. 8 Compressing electrorheological effect responses of phosphoric ester cellulose ER fluids on the volume fraction of cellulose particles.