

## 전기유변유체의 유변학적 성질과 메카니즘

황인석 · 이승중

서울대학교 화학공학과  
(1994년 12월 1일 접수)

### Rheological Properties and Mechanisms of Electrorheological Fluids

Inseok Hwang and Seung Jong Lee

Department of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea  
(Received December 1, 1994)

#### 1. 서 론

최근 유변학을 비롯한 여러 연구분야에서 전기유변(electrorheological, ER)유체에 관한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 이는 전기장 하에서 그 유변물성 향상이 뛰어나고, 전기장에 대한 응답시간이 수 내지 수십 msec 정도로 매우 빠르며, 최근에는 넓은 온도 범위에서 사용이 가능한 무수(anhydrous) 전기유변유체계가 보고되어[1-9], 전기적으로 작동하는 clutch와 damper를 포함하여 hydraulic 및 robotic 분야에 응용이 가능해졌기 때문이다[2]. 그러므로 새로운 응용분야에의 적용 가능성을 넓히는 응용연구와 전기유변물질의 개발, 전기유변현상과 이에 관련된 메카니즘을 규명하는 기초연구가 중요한 연구과제로 부상하고 있다.

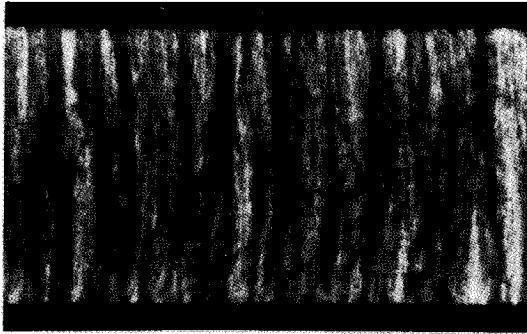
본 총설에서는 전기유변현상이 유변학적인 관점에서 어떠한 양상으로 나타나는지 알아보았다. 전기유변효과에 영향을 미치는 여러가지 요소의 역할에 관한 기존의 연구 결과를 조사하였다. 전기장의 세기와 형태, 교류전기장의 주파수에 따른 유변학적, 전기적 성질, 전단속도의 영향, 온도의 영향, 입자상의 조성과 농도의 영향, 입자상의 수분함량 등 첨가제의 영향 등이 전기유변효과에 미치는 대표적 요소들이다. 전기유변현상을 야기하는 정확한 메카

니즘은 아직 확립되지 않았고, 상호 모순되는 점이 없지 않다. 이 메카니즘이나 전기유변현상에 관련된 정량적인 해석은 새로운 전기유변유체계의 개발과 응용에 매우 중요한 역할을 할 것이다. 전기유변현상과 관련하여 이제까지 제시된 여러가지 메카니즘을 살펴보았다.

#### 2. 정의 및 역사

전기유변현상이란 일반적으로 현탁액에 전기장이 가해짐으로써 그 유변물성, 특히 점도 및 응력이 급격히 증가하는 현상을 말한다. 또한 전기장이 제거되면 원래의 유변물성으로 돌아가는 가역적인 반응을 보인다. 이러한 현상을 나타내는 물질은 일반적으로 전기유변유체(ER fluids, ERF)라 불리는데, 더 넓은 의미를 부여하여, 또한 전기장 하에서는 점탄성 고체의 성질을 나타내는 점에 주목하여 전기유변물질(ER materials)[6-11]이라 하기도 한다. 또한 전기유변현상이 주로 현탁액에서 나타난다는 점에 주목하여, 그리고 고분자액정 용액 등 유사한 현상을 보이는 다른 시스템[12, 13]과 구별하고자 전기유변현탁액(ER suspensions)[14-19]이라 불리기도 한다.

전기유변유체의 구성성분 및 조성은 매우 다양하



**Fig. 1.** Fibrillation structure of 0.05 volume fraction  $\text{SiO}_2$ /Silicone oil suspension under an electric field of 2.0 kV/mm. The gap distance between two electrodes is 0.8 mm on the photograph. Silica particles (Seahostar™ KE-P100) are of uniform size of 1.0  $\mu\text{m}$  and obtained from Nippon Shokubai Co. Reproduced from Hwang [71].

다. 이제까지 보고된 여러 가지 종류의 전기유변유체는 Block과 Kelly[20] 및 Stangroom[21]에 의하여 자세히 정리되어 있다. 일반적으로 알려진 전기유변유체는 절연성 무기물이나 반도체 고분자 입자가 전기전도도가 매우 작은 절연성 오일에 분산된 현탁액으로서, 공통적인 특징은 분산입자 자체[1-9]나 입자 표면에 편극화 성향을 향상시킬 수 있는 요소가 포함되어 있다는 것이다. 그러나 이러한 요소가 어떻게 작용하여 전기유변현상을 발생시키고, 향상시키는지에 관한 일치된 해석은 현재로서는 부족하다.

1940년대 말 Winslow[22]는 비전도성 오일 내의 절연입자들이 부과된 전기장에 의존하여 반응하는 흥미로운 현상을 발견하였다. 그는 외부에서 가해진 전기장에 의하여 입자들이 전기장 방향으로 정렬된 사슬구조를 형성하며, 전기장의 크기에 따라 현탁액의 점도가 수백 내지 수천 배 이상 증가함을 관측하였다. 실제로 그는 현탁액의 점도가 부과된 전기장 크기의 제곱에 비례함을 보였다[22]. 이러한 전기유변현상은 그의 이름을 따서 Winslow 현상[23]이라 불리기도 한다. 이러한 전기유변현상은 광학적 관찰 및 유변물성 측정법(rheometry)을 통하여 확인되는데, Fig. 1은 전기장 하에서 단분산(mono-dispersed) 실리카 현탁액이 사슬구조를 형성함을 보인다[71]. 사슬구조를 명확하게 확인하기

위하여 입자의 부피분율( $\phi=0.05$ )이 비교적 낮은 실리카 현탁액을 사용하였는데, 입자의 부피분율이 증가할수록, 또는 전기장의 세기가 증가할수록 더 두꺼운 복합사슬이 형성되는 경향이 있다.

전기유변현상에 관한 Winslow[22]의 보고가 있는 20여년 후, 보다 광범위한 연구가 행하여졌다[24-26]. Klass와 Martinek[24-25]은 Silica 및 Calcium titanate 입자계에 대한 유변학적 실험뿐만 아니라 전기적 성질에 관한 실험을 행하여, 점도의 증가가 입자 주위의 전기적 이중층(double-layer)의 상호작용에 기인한다고 설명하였다. Uejima[26]는 현탁액의 절연성 측정실험을 행하여 계면편극화가 전기유변효과에 관련되어 있음을 보였다. Deinega[12]를 비롯한 많은 러시아 연구자들은 전기유변유체의 특성을 구명하고자, 절연성 측정과 유변물성 측정실험 등의 연구를 수행하였다[15]. 그후 더 넓은 영역의 전단속도, 전기장 세기, 입자의 부피분율과 화학적 성질에 관한 실험이 Marshall 등[27]에 의하여 수행된 바 있다.

### 3. 전기유변현상

전기장이 부과되지 않은 상태에서 전기유변유체는 비교적 큰 전단속도 영역에서 낮은 점도를 가지는 뉴튼유체의 거동을 보이나, 전기장이 가해지면 순간적으로 현격한 점도 및 응력향상을 나타낸다. 물론 많은 전기유변유체는 입자부피분율이 높은 현탁액이므로 전기장이 없는 경우에도 반드시 뉴튼거동을 보이지는 않는다. 그리고 전기유변현상은 전기장의 단속에 따라 가역적으로 바뀐다. 일반적으로 전기유변유체의 강도를 나타낼 때, 전기적으로 유도된 응력 전달능력의 기본적 척도로 알려진 항복응력(yield stress)이 사용된다. 전기장 하에서 전기유변유체는 항복응력을 갖는 점가소성(viscoplastic) 유체[28]의 거동을 보인다. 점가소성 유체모델 중 대표적인 것으로는 Bingham 모델이 있는데, 이 모델을 따르는 물질은 정적(static) 항복응력보다 큰 응력이 물질에 가해지면 전단속도의 증가에 따라 선형적 응력증가 거동을 보이나, 항복응력보다 작은 응력 하에서는 고체와 같이 변형이 일어나지 않는다. 유동상태의 전기유변유체에 대한 전단응력 실험측정 값으로부터, 전단속도  $\dot{\gamma}=0$ 으로 외삽하여 구한 항

복응력을 동적(dynamic) 항복응력으로 정의할 수 있다. 실험에서는 엄밀하게  $\dot{\gamma}=0$ 인 전단속도를 포함하지 않은 유한한 전단속도영역에서만 측정이 가능하기 때문이다. 한편 항복응력보다 작은 응력조건에서 고체 상태로 묘사되는 전기유변유체는 점탄성(viscoelastic) 고체[29]와 유사한 성질을 보이며, 이때의 저장탄성계수 및 손실탄성계수가 전기장의 함수로 나타난다[7, 10, 19, 30-37].

### 3.1. 전기장, 전단속도 및 부피분율의 영향

전기유변유체의 전단응력거동은 일반적으로 다음의 식 (1)의 Bingham 모델[28]로 묘사될 수 있으며, 이때 항복응력은 전기장의 세기의 제곱( $E^2$ )에 비례한다는 보고가 있다[15, 26-27, 30, 37]. 이들 중 Uejima[26]의 시스템은 결정성 Cellulose/Chlorine oil이었고, Marshall 등[27]의 전기유변유체는 hydrated poly(methacrylate) 입자와 chlorinated hydrocarbon 매질로 이루어진 현탁액이었다.

$$\tau = \tau_y^s + \eta_{pl} \dot{\gamma} \quad (\dot{\gamma} > 0) \quad (1)$$

여기서  $\tau_y^s$ 는 Bingham 또는 정적 항복응력이고  $\eta_{pl}$ 는 가소점도이다.

그러나 실제의 대부분의 전기유변유체는 더욱 복잡한 유변거동을 나타낸다. 즉 전단속도가 큰 경우 전단박화(shear thinning)현상[28]을 나타내거나 [19, 35, 38], 일반적으로 알려진 항복응력의 전기장 의존성( $E^2$ )과 다른 경향[34-35, 39]을 가질 수 있다. 그리고 항복응력과 같이 가소점도도 전기장 의존성을 나타내기도 한다[21]. Stangroom[21]은 항복응력과 달리 가소점도의 전기장 의존성은 전기유변유체의 화학적 성질에 크게 좌우된다고 보고하였다. 또한 항복응력을 전단속도를 증감시켜 전단응력을 측정하는 방식(controlled-rate type)의 레오미터로 측정할 경우, 매우 낮은 전단속도 영역에서는 Bingham 유체거동과 다른 특이한 거동을 보인다[20, 35].

전기유변유체는 전기장의 세기에 따라 응력 또는 점도의 증가현상을 나타낸다. 어느 정도의 전기장 세기까지는 응력증가가 그리 크지 않지만, 그 이상의 전기장에서는 전단응력의 증가분( $\Delta\tau = \tau(E) - \tau(0)$ )이 전기장 세기의 제곱( $E^2$ )에 비례하여 급격하게 증가한다[12, 22, 24]. 그러나 매우 높은 전기장에서는 그

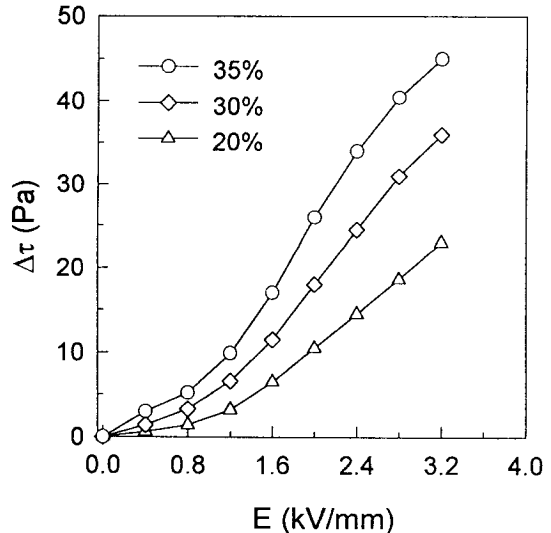


Fig. 2. Dependence of ER effect in polyvinyl alcohol-vaseline oil suspension on transverse electric field intensity. Concentrations of dispersed phase are 20, 30 and 35%, respectively. Reproduced from Deinega and Vinogradov [12].

전단응력 증가효과가 둔화되는 경향을 보인다[12, 71]. 그리고 분산입자의 부피분율이 클수록 유변물성의 전기장 의존성은 더욱 두드러진다. 전기장 및 부피분율에 따른 전단응력의 거동은 Fig. 2에 나타낸 바와 같다. Deinega와 Vinogradov[12]는 polyvinyl alcohol/hydrocarbon 현탁액에 대한 실험에서 전기장 의존성의 이유는 부과된 전기장에 의하여 입자의 표면전하, 즉 양자(proton)의 활성화 장벽(activation barrier)이 낮아지는데 있다고 생각하였다.

일반적으로 전단속도에 대한 전기유변효과의 의존성은 전단속도가 증가할수록 전기유변효과는 감소한다. 실제로 Deinega와 Vinogradov[8]의 실험에서 전단속도가  $1000 \text{ sec}^{-1}$  이상에서는 전기유변효과가 사라진다. 상업화된 전기유변유체인 VersaFlo™ ER-100 (Lord Corporation)에 대한 전단응력 거동을 Fig. 3에서와 같이 비교적 낮은 전단속도 영역에서 나타내었다[71]. 동적항복응력을 정확히 구하기 위해서는 가능하면 낮은 전단속도 영역의 응력거동을 측정하여야 한다. 전기장 하에서의 이 전기유변유체의 응력거동은 대략 Bingham 모델을 따르고, 동적항복응력은 약 80 Pa로 평가된다. 그러나 전단응력의 증가분( $\Delta\tau$ )은 전단속도가 증가함에 따라

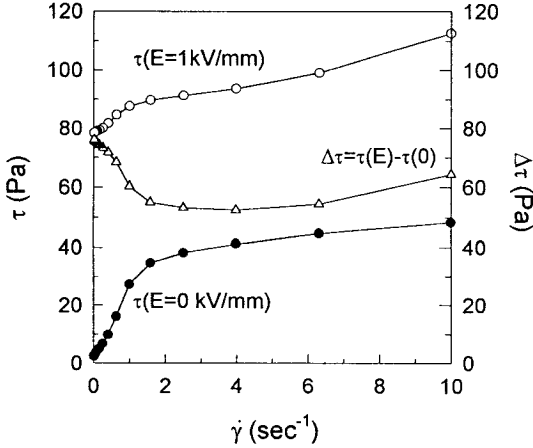


Fig. 3. Shear rate dependence of shear stress ( $\tau$ ) at electric fields of 0.0 and 1.0 kV/mm for a commercial ER fluid of VersaFlo™ ER-100 from Lord Corporation. Reproduced from Hwang [71].

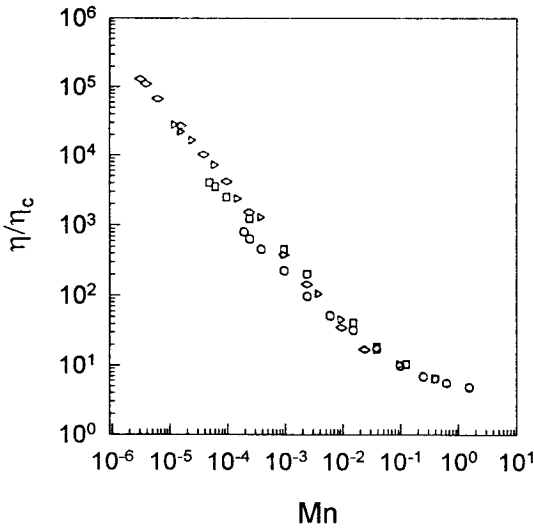


Fig. 4. Relative viscosity as a function of Mason number,  $Mn$ , for a volume fraction of 0.34; (○) 0.05, (□) 0.1, (△) 0.2, (◇) 0.4 kV/mm. Reproduced from Marshall *et al.* [27].

다소 감소하였다.

Marshall 등[27]은 hydrated poly(methacrylate) /chlorohydrocarbon 현탁액에 대하여, 매질의 점도에 대한 현탁액의 상대점도( $\eta/\eta_c$ )가 다음 식 (2)로 정의되는 Mason수,  $Ma$ [40-41]만의 함수로 Fig. 4와 같이 나타남을 보였다.

$$Ma = \eta_c \dot{\gamma} / 2\epsilon_0 \epsilon_c \beta^2 E^2 \quad (2)$$

여기서  $\eta_c$ 는 매질의 점도,  $\dot{\gamma}$ 은 걸보기 전단속도,  $\epsilon_0$ 와  $\epsilon_c$ 는 각각 진공 및 매질의 유전상수, 그리고  $\beta = (\epsilon_p - \epsilon_c) / (\epsilon_p + 2\epsilon_c)$ 는 매질에 대한 입자의 상대적 편극화 성향을 나타내는 파라미터다. 즉  $Ma$ 는 현탁액 내의 입자에 작용하는 정전기력에 대한 전단력의 상대적 크기를 나타내는 무차원수이다. Marshall 등 [27]은 그들의 실험영역에서 항복응력이 입자의 부피분율에 비례한다고 하였다. 그리고 Bingham 모델은 전기유변현상을 묘사하는데 적합하지만, 부피분율의 의존성은 시스템마다 달라질 수 있다고 지적하였다[27]. 한편 항복응력의 크기는 부피분율  $\phi = 0.35 \sim 0.40$ 에서 최대값을 가진다는 보고[42]와 부피분율이 큰 경우( $\phi > 0.3$ ) 항복응력의 부피분율 의존성도 커진다는 보고[34]가 있다.

### 3.2. 전기장의 교류 주파수 영향

교류전기장 하에서의 전기유변현상은 유변학적 거동뿐만 아니라 절연성질과도 관련이 있다. 교류전기장 하에서는 교류주파수가 증가함에 따라 걸보기 점도( $\eta^{app}$ ) 및 걸보기응력( $\tau^{app}$ )이 감소한다[24-26]. 즉  $10^2 \sim 10^4$  Hz의 주파수 영역에서는 전기유변효과가 급격히 감소하지만, 50~60 Hz 이하의 교류주파수에서는 직류전기장에서의 전기유변효과와 동일한 효과를 보인다. 한편 걸보기점도의 경향과 마찬가지로 절연상수도 교류주파수의 증가에 따라 감소한다[24-26].

교류주파수의 증가에 따라 전기유변효과가 감소하는 이유는, 높은 교류주파수에서 입자가 편극화하기에는 시간이 충분하지 않기 때문이라 생각된다 [43]. Silica /Naphthenic 계에 대한 실험에서 Klass와 Martinek[24-25]은 매우 높은 교류주파수에서도 여전히 약간의 전기유변효과가 유지되고 있는 점에 주목하여, 입자 자체의 편극화보다는 입자 주위의 매질에 형성된 전기적 이중층(double-layer)이 전기유변현상에 기여하고 있다고 생각하였다. Uejima[26]의 실험에서는 발견되지 않았지만, Fig. 5의 Klass와 Martinek[24]의 교류주파수 의존성 실험에서는 약 200 Hz의 주파수에서 걸보기 점도의 급격한 불연속 현상이 발견되었다. 그들은 이 불연속 현상에 관해 언급하지 않았다. 이 현상은 그들의

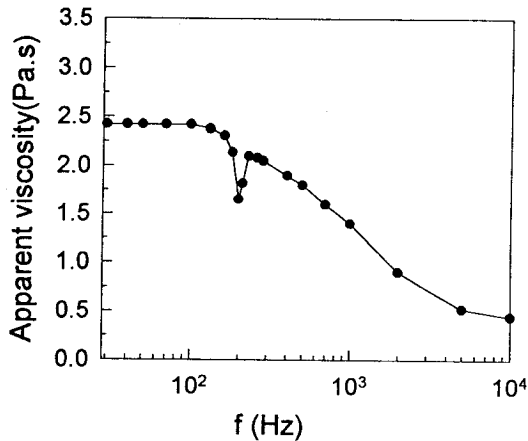


Fig. 5. The effect of electric field frequency ( $f$ ) on the apparent viscosity of a Silica-based ER fluid. Measurements were made with a 0.46 volume fraction dispersion at a field of 0.79 kV/mm, a constant shear rate of  $753 \text{ s}^{-1}$  and a temperature of  $38^\circ\text{C}$ . Reproduced from Klass and Martinek [24].

실험장치에서 비롯된 특이성에 기인할 수도 있으나, 특정 주파수에서 겔보기 점도 또는 응력의 불연속에 관해 적절한 이유를 찾을 수도 있다. Block 등[2, 20]은 “유동장에 의하여 수정된 편극화(FMP)이론”에 근거하여, 전단응력의 불연속현상을 설명하였다. 즉, Klass와 Martinek[24]의 실험에서 전단속도  $\dot{\gamma} = 753 \text{ sec}^{-1}$ 인 유동장에 의하여 수정된 편극화 방향이 전기장 방향과 수직을 이루는 조건, 즉  $\dot{\gamma}/2 \approx \pi f/2$ 은 전기주파수  $f \approx 200 \text{ Hz}$  부근에서 만족하게 되며, 이때 교류 전기장의 영향으로 편극화된 입자는 전기장 방향으로 회전하게 된다. 그 순간 점도 또는 응력의 불연속 현상이 발생한다는 것이다. 그러나 위의 설명은 주로 묶은 현탁액의 경우에 적용되는 것으로서, Klass와 Martinek[24]의 진한 현탁액( $\phi = 0.46$ )에서도 적용될 수 있는지 확실치 않다. See와 Doi[44-45]는 단분산입자의 현탁액계에 대하여, 입자간의 상호작용을 전기장 방향으로 배향된 쌍극자-쌍극자간 상호정전력[14-15]으로 가정하여 수식화하고, 이에 대한 동적수치모사(dynamic simulation)[16, 46-47]를 수행하였다. 교류전기장과 유사한 계단형 전기장에서 응력의 전기주파수 의존성을 조사한 그들의 연구에서, Klass와 Martinek[24]의 실험결과와 유사한 응력의 불연속점이 발견되었다. 그들은 응

력의 불연속이 나타나는 교류주파수는 전단속도에 비례하지만, 입자의 부피분율에는 무관함을 보였다. 그러나 더 넓은 범위의 전단속도 및 부피분율에서 이에 관한 실험결과는 아직 보고된 바 없다. 그들은 전기장이 부과된 후 입자구조가 형성되는데 필요한 시간과, 반대로 전기장이 제거된 후 전단장에 의하여 입자구조가 파괴되는데 필요한 시간과의 관계로부터, 일정한 전단속도 하의 유동장은 특정 전기주파수에서 전단응력의 감소가 발생한다고 하였다. 즉, 특정 전기주파수에서 입자구조가 완전히 형성되기도 전에 전기장은 다시 사라지게 되므로 전단응력은 감소하고, 그 주파수를 넘으면 반대로 입자구조가 완전히 파괴되기도 전에 다시 전기장이 부과되어 응력이 증가하게 된다는 해석이다[44].

### 3.3. 흡착물질, 특히 수분의 영향과 온도의 영향

전기유변유체의 효과를 나타내는데 있어 입자와 매질 사이의 계면 상태가 매우 중요하다. 전기유변 현상을 증가시키기 위해 도입된 극성물질의 영향에 대한 많은 연구가 수행되었다[12, 20-21, 26, 48]. 흡착수분의 양을 증가시키면 전기유변효과, 예를 들면 응력의 증가량( $\Delta\tau = \tau(E) - \tau(0)$ )이 증가하다가 최대값에 도달한 후, 급격하게 다시 감소한다. 그리고 이때 전기장이 증가함에 따라 응력곡선의 최대값은 낮은 수분함량 쪽으로 치우친다[12]. 동일 현탁액계에 대한 흡착수분량에 따른 절연상수의 거동 역시 응력거동의 경향과 매우 유사하다. 이와 같은 현상은 흡착물질의 양에 따라서, 단지 입자 내에서만 유동 전하(mobile charges)가 움직일 때는 입자간 편극력이 증가하지만, 입자와 입자 사이로 전하이동이 발생하면 편극력이 감소하여 전기유변효과가 감소하기 때문에 나타난다[12, 26].

전기유변효과에 대한 온도의 영향은 수분의 영향과 비슷한 양상을 보인다. 온도를 올리면 전기유변효과( $\Delta\tau = \tau(E) - \tau(0)$ )도 증가하여 최대값을 나타내다가, 더 높은 온도에서는 다시 감소한다. 그리고 그 최대값은 전기장이 증가할수록 낮은 온도 쪽으로 이동한다. Deinega와 Vinogradov[12]는 수분을 함유한 전기유변유체의 경우, 온도증가에 따라 전기유변효과가 증가하는 것은 온도증가로 인하여 유동 전하, 즉 양자(proton)가 이동하기 위한 포텐셜 장벽(potential barrier)이 낮아지고, 그 결과 입자표면에

서의 전하이동이 용이해져서 입자의 편극력이 증가하기 때문이라 설명하였다. 그러나 더 높은 온도에서는 입자 표면 위의 수화층(hydrated layer)이 불안정해져 전하의 이동성이 급격히 증가하여 입자간 전하이동이 가능해지므로 입자의 편극력이 감소하고, 그 결과 전기유변효과가 감소한다. Conrad 등[49]의 무수 Zeolite/Silicone oil계에서도 온도증가에 따라 전단응력  $\tau(E)$ 은 증가하다가, 120°C 이상에서 응력증가 경향이, 비록 감소하지는 않지만, 둔화되는 현상을 볼 수 있다. 그들의 실험에서 절연상수의 온도 의존성이 전단응력 거동과 유사한 것을 알 수 있는데, 이는 전기유변유체의 절연성질과 유변학적 성질간의 연관성을 시사한다. 그들은 120°C 이하에서의 응력증가가 Zeolite 입자내의  $Na^+$  이온의 유동성이 온도에 의하여 향상되기 때문이라 설명하였으며[49], 그 이상의 온도에서 응력거동 둔화도 앞서 설명한 수분을 함유한 전기유변유체 온도의 존성으로 설명이 가능하다.

### 3.4. 전기유변현상의 정량적 해석

전기유변유체가 나타내는 유변학적 현상과 전기적 현상을 정량적으로 해석하려는 시도는 전기장에 의한 입자의 편극화와 그로 인한 입자간 정전기적 상호작용을 전단력과 함께 해석하려는 데 집중되어 있다. 물론 전기유변유체 내 입자간 상호작용에 관련된 힘으로는 정전기적(electrostatic)힘, 유체역학적(hydrodynamic)힘, 콜로이드(colloidal)힘, thermal force 등이 있으며, 이들 상호작용에 관련된 힘의 본질적 성질과 크기를 이해하는 것이 중요하다[50]. 이때 콜로이드 힘과 thermal forces는 정전기력과 반대로 작용하는 힘으로서 전기유변효과를 감소시킨다[20, 51-52]. 전기장에 의한 점도 및 응력증가와 같은 유변학적 거동은 현탁액 내의 입자배치구조의 변화를 수반한다[15, 22, 53]. 정적(static)상태에서 전기유변유체 내 입자들은 부과된 전기장에 의하여 전극과 전극 사이를 잇는 사슬구조 또는 복합사슬구조를 형성한다. 이는 Winslow[22]의 입자사슬 형성이론에 기초한 것으로 유변학적 반응은 전기장에 의하여 유도된 사슬구조와 매우 밀접하여 관계되어 있다는 것이다[15, 27, 42]. 물론 전극을 고려하지 않은 이론적, 수치적 해석도 입자구조의 형성이 유변물성 증가에 기여한다는 전제 하에 이루어지고

있다.

전기유변유체의 이론적 해석은 두가지 방향으로 이루어지고 있는데, 첫째로 실험으로 측정되는 유변물성값의 크기를 예측하려는 시도[17, 23, 50, 54]와, 둘째로 물질구조 자체의 해석[55-58] 또는 물질구조와 유변물성의 연관성을 밝히려는 시도[14-18, 23, 30, 42, 44-45, 50, 54, 59-61]가 그것이다. 전기유변유체 내의 입자간 편극력에 대한 점-쌍극자 근사법(point-dipole approximation)은 가장 단순화된 모델로서, 비록 전기유변유체의 응력거동 및 물질구조를 모사하는데 유용하지만, 전기유변유체의 항복강도의 기대치 또는 측정값에 미치지 못하는 값을 예측한다[14]. 이를 개선하기 위하여 분산입자구조의 기하학적 배치를 고려한 다극자(multipole)간 정전기적 상호작용을 두개의 구형 입자에 적용한 연구가 이루어졌다[15]. 한편 여러 입자로 구성된 현탁액계에 대하여 평균장 근사법(mean-field approximation)[52]을 이용한 해석과 system capacitance matrix[62]를 도입한 수치해석이 행하여졌다. Klingenberg 등[15]과 Bonnacaze 등의 결과[50]는 입자와 매질 간의 유전상수 차이가 작은 경우 거의 일치하였으나, 유전상수의 차이가 커짐에 따라 Bonnacaze 등의 결과가 Klingenberg 등의 결과값보다 다소 작은 값을 나타내었다. 이는 고차항이 Bonnacaze 등의 계산에 포함되지 않았기 때문이다[50]. 진한 현탁액계의 입자 사이의 정전기적 쌍극자 상호작용을 개선하여 다입자(multi-body)효과와 다극자 효과를 추가한 동적상태 수치해석이 위의 두 연구자[17, 23]에 의하여 최근 수행되었다. Chen 등[50, 54, 63]은 전기유변유체 내의 구형입자들의 사슬구조에 대하여 입자간 상호작용에 관한 모델을 제시하였다. 이 모델은 라플라스(Laplace)방정식을 만족하는 입자사슬의 전기적 포텐셜을 계산하고, 이로부터 전기장 분포와 입자 사이의 정전기력과 거리 관계를 입자와 매질의 유전상수비의 함수 및 입자간 거리의 함수로 나타낸 것이다. 그 결과 거의 근접한 입자 사이에 전기장이 집중되고, 입자간 정전기력이 점-쌍극자 근사법으로 얻은 수치해에 비해 10배 가량 증가한 결과를 얻었다. 이는 앞서 언급한 Klingenberg 등[17]의 결과보다 실험값에 더 근접한 응력값이라 평가된다. 그러나 아직도 이론적 또는 수치해석적 결과는 실험으로부터 얻은 유변물성 측

정값보다 작은 값을 예측하고 있다.

전기유변유체 내의 입자사슬구조에 관한 이론적 해석은 주로 단일입자사슬에 대하여 이루어 졌다 [15, 30, 42, 59]. Takimoto[59]는 단순전단(simple shear) 유동장 내의 단일입자사슬은 전단력에 의하여 사슬의 중앙에서 끊어짐을 증명하였다. 그리고 전기장에 의하여 유도되는 응력[64]은 낮은 전단속도 영역에선 전단속도에 무관하며 입자의 부피분율에 비례함을 유도하고, 이 결과를 동적수치모사로 확인하였다. Whittle[30]과 Klingenberg 등[14]은 각각 변형율에 따른 응력거동을 해석적으로 유도하였는데, 그 응력거동은 전단속도에 무관하고, 부피분율과 전기장의 제곱( $E^2$ )에 비례한다. 그러나 실제의 실험결과는 전단속도에 의존하는 응력거동을 보인다[71]. Bonneau[42]는 현탁액 내의 총에너지 수지식으로부터 항복응력을 유도하고, 이를 Klingenberg 등[14]이 제시한 모델에 적용하였다. 그 결과 낮은 부피분율에서 항복응력은 부피분율에 비례하여 최대값( $\phi=0.4$ )을 향하여 증가하였다. 그리고 부피분율이 더 증가함에 따라 입자사슬 간의 정전기적 상호작용의 영향으로 다시 감소하였다. 이는 앞서서도 언급한 바 있는 Klingenberg의 실험결과와 일치한다[42].

#### 4. 전기유변현상의 메카니즘

많은 연구자들이 여러 형태의 전기유변현상을 설명하기 위한 메카니즘을 제시하였고 정량적인 해석을 시도하였다. 이는 더 효과적인 전기유변유체계를 설계하여 그 응용 가능성을 확보하는데 있어서 전기유변현상의 메카니즘에 관한 이해가 필요하기 때문이다[2]. 그러나 이러한 시도에도 불구하고 전기유변효과를 나타내는 메카니즘에 대한 일치된 견해를 도출하거나 정량적인 이론을 세우는데 성공적이지 못하였다[20-21]. 전기유변현상은 전기장과 유동장이 상호작용하는 진한 현탁액계에서 나타나므로, 그 물리적 상황은 매우 복잡하다. 전기장 또는 유동장이 각각 단독으로 존재하는 상황에 대한 진한 현탁액계의 거동에 대한 모델링만 하더라도 이론적으로 매우 어려운 문제이며, 이 두가지 효과가 복합된 상황을 다루는 것이 쉽지 않다는 것은 자명하다.

전기유변현상을 설명하고자 제시된 모델들은 다음의 두가지 형태로 구분된다. 즉 유변물성의 변화를 설명하기 위하여, 유동장 하에서 물질구조의 변형이 어떠한 이유로 일어나는지 구명하려는 시도와 전기유변유체의 입자상에 어떠한 물리적, 화학적 원칙이 작용하여 유변물성이 향상되는지 알아보려는 시도가 그것이다[10].

일반적으로 전기유변현상을 유발하는 중요한 요인은 전기장에 의한 입자편극화(bulk polarization)일 것이라 알려져있다. 즉 전기유변유체 내의 입자가 전기장 방향으로 정렬하고 전단저항이 증가하는 현상은 입자가 편극화되어 나타나는 상호 간의 정전기력에 기인한다[14-18, 20, 23, 30, 42, 44-45, 50-52, 54, 59-62, 65-67]. 전기유변현상을 최초로 보고한 Winslow[22]는 수분을 함유한 실리카 현탁액의 현격한 점도 증가는 전기장에 의한 입자사슬의 형성(fibrillation)과 기계적으로 양쪽 전극을 잇고 있는 입자사슬의 파괴 및 재생과정이 전단장 하에서 연속적으로 발생하여 응력이 증가하는데 기인한다고 하였다. 입자들이 자유로이 움직일 수 있다면, 입자들의 편극화와 이에 따른 사슬형성은 잘 알려진 사실이다. 이런 과정을 더 자세히 설명하면, 정적 상태에서 일정한 전기장이 부과됨에 따라 입자 내에서 전하분리가 발생하고, 이로 인하여 비균일적인 전기장이 현탁액 내에 발생하여, 입자가 더 강한 극부 전기장 방향으로 이동한다. 그 결과 입자가 전극이나 다른 입자를 향하여 이동하여 입자 간의 뭉침구조(cluster)가 형성되거나, 두 전극 사이에서 입자의 진동운동 현상이 발생하여, 결국 전극 사이를 연결하는 사슬구조가 형성된다. 전단장 하에서는 위의 사슬구조가 파괴되고 재형성되는 동적평형이 유지된다. 또한 Winslow[22]가 언급하지 않은 전극 간 진동입자가 전단장 하에서 입자사슬구조의 빠른 재생과정에 중요한 역할을 한다[12]. 일반적으로 전기장 하에서 강력한 물질구조 형성을 보이는 현탁액계는 큰 전기유변현상을 보인다. 그러나 유동장이 없는 상태의 구조형성이 빠른 유동장 하에서도 유지되어 원하는 수준의 전기유변효과를 나타낼 수 있는지는 의문이다[10, 20]. Klass와 Martinek[24-25]은 전기유변유체가 매우 높은 교류주파수에서도 전기유변효과를 보이므로 Winslow의 메카니즘에 의문을 제기하였다. 즉 단순한 입자사슬형성 이론에

의해 광범위한 구조형성이 일어나기에는 전기유변 현상이 너무 빠르게 일어난다는 점에 주목하였다. 그러나 유동장 하에서 광범위한 사슬형성이 일어나기 어렵다는 그들의 주장은 한편 설득력이 있으나, 수 kHz를 초과할 만큼의 큰 전기주파수 하에서도 전기유변현상이 유지된다는 점에 관한 그들의 설명은 충분하지 않다. 입자편극화에 의해서도 일단 물질 구조 형성이 된 후라면, 그리고 교류주파수가 임계 편극화 주파수를 크게 초과하지 않는다면, 전기유변현상이 유지될 수 있기 때문이다[20]. 최근 입자 사슬형성과 전기유변현상의 반응속도의 차이에 근거하여 입자사슬형성 메카니즘의 문제점이 제기되었다[20]. Brooks 등[51]은 사슬구조형성 시간이 약 20 sec 가량 걸림을 현미경으로 관찰하였는데, 이는 일반적으로 알려진 전기유변유체의 반응시간을 크게 초과한 것이다. 대부분의 경우에 전기유변반응이 수 msec 내에 일어나는 것과 비교하면[24-25], 실제로 20 sec 가량을 필요로 하는 현상이 빠른 유동장 하에서 효과적으로 작용할 것이라 생각하기는 어렵다. 그러나 Brooks 등의 실험은 매우 낮은 입자 농도의 현탁액에 대하여, 매우 낮은 전기장(50 V/mm)에서 측정된 입자형성 시간임을 간과해서는 안 된다. Hill 등[53]은 수 kV/mm의 전기장 하에서 여러 입자 부피분율( $\phi=0.03-0.23$ )의 현탁액에 대하여 실험적으로 관측된 입자형성 시간이 쌍극자 간 상호작용이론에 근거한 수치모사에서 예측되는 입자형성시간과 거의 일치함을 보였으며, 그 값은 대략 10~100 msec 범위였다.

입자편극화 메카니즘에 따르면, 편극화 경향이 큰 입자를 분산상으로 사용하면 전기유변유체의 항복 강도를 증가시킬 수 있을 것으로 생각된다. 그러나, 유전상수가 200인  $\text{TiO}_2$  입자를 포함하는 전기유변유체의 경우 매우 잘 건조된 입자를 사용했을 때 입자사슬형성은 여전히 발생하나, 전기유변효과는 잃어버린다[1, 10]. 또한 입자사슬형성에 있어서 입자간 정전기적 쌍극자 상호작용력이 입자와 매질사이의 유전상수 차이[52]에 관련되어 있을 경우, 표면을 적절하게 절연 처리한 금속입자[65]들 간의 상호작용력은 전기유변현상을 매우 크게 유발하여야 함에도 그다지 큰 효과를 보이지 않았다. 이상은 입자의 편극화의 결과로서 사슬구조가 형성된다는 사실에 기초한 입자사슬형성 모델이 예측하지 못하

는 중요한 예로서, 입자편극화 외에 다른 메카니즘이 전기유변현상에 관련되어 있음을 시사한다[10].

한편 편극화된 입자들 사이에 정전기적 상호작용으로 입자의 덩어리(cluster)가 형성되고, 이들 입자 덩어리는 정적 상태가 아니면 양쪽 전극을 잇는 사슬로서 확대되지 않은 채 유동장 안에서 개별적으로 움직인다는 설명은 전극 사이를 잇는 입자사슬형성 이론보다 설득력이 있다. 이에 관한 많은 연구가 편극화된 두개의 입자[40, 51, 68-69]와 짧은 사슬[40]에 관해 실험적으로 또는 이론적으로 행하여졌다.

전기장 하에서 입자의 사슬구조를 형성하고 점도 및 항복응력을 증가시키기 위하여, 입자 또는 매질 자체가 그들의 전기적 성질 및 절연성질에 의하여 상호의존적으로 작용할 수 있다. 이에 입자 주위의 매질 내에서 유도되는 전기적 이중층 편극화(double-layer polarization)와 입자와 매질의 계면에 존재하는 유동전하에 의한 계면 편극화(interfacial polarization)에 의하여 설명된다. Klass와 Martinek [24-25]은 전기유변현상을 설명하는데 이중층 편극화 개념을 최초로 도입하였다. 그들의 제안에 의하면, 입자를 둘러싸고 있는 전기적 이중층이 전기장에 의하여 변형되어 전기적 상호작용을 일으켜 전기유변유체의 항복강도가 증가한다. 이 메카니즘은 극성이 강한 입자가 항상 강한 전기유변효과를 야기시키지는 못한다는 사실을 고려한 것이다[10, 26, 50]. Klass와 Martinek [24-25]은 전기장에 의하여 유도된 이중층이 유동장에 의하여 변형하게 되므로 전하의 밀도가 높은 영역 사이의 반발력을 야기시켜 입자들은 단순히 유동장을 따라 움직일 수 없고, 이 유동장에 수직 방향으로 작용하는 힘이 생기므로 부가적인 에너지 손실이 발생한다고 하였다. 이런 형태의 전하 간 반발력은 많은 안정한 콜로이드 계에서 발견되는 현상이다. 그러나 부과된 전기장은 입자주위의 이온 영역을 입자의 어느 한 쪽 끝으로 이끌어 전하군의 변형을 야기시키고, 결과적으로 다른 한쪽의 전하를 감소시킨다. 그 결과 장막 전하(screening charge)가 모자란 부분은 상대전하량이 증가한다. Block과 Kelly는 이를 유도 쌍극자에 대한 다른 방식의 설명이라 하였다[20].

Schulman과 Deinega는 비전도성 매질과의 이온 교환이 무시될 수 있는 입자의 표면전도층을 고려



하였다[12]. 그들에 의하면 계면편극화에 기여하는 유동전하는 수분층에 포함되어있다. 부과된 전기장의 영향으로 전하는 표면전도층을 따라 움직일 수 있고, 그 결과로 계면편극화가 야기된다. 이때 수분의 작용으로 비전도성 매질을 향하여 전하이동도 가능하므로 이중층 편극화도 가능하다. 전해질용액 계와 달리, 비전도성 매질이 포함된 전기유변유체 계에서의 전기적 이중층 이론은 확실히 이해되지 않는 점이 있으나[12], Filisko와 Gamota[10]는 이중층 편극화와 계면 편극화는 동일 메카니즘의 한 부분이라 생각하였다. Uejima[26]는 절연특성 측정을 통하여 위의 두 메카니즘을 보다 직접적으로 지지하였다. 그는 절연상수와 손실계수(loss factor)의 전기주파수 의존성으로부터, 수분의 양이 증가할수록 절연분산(dielectric dispersion)이 고주파수 쪽으로 치우치는 현상을 발견하였다. 이는 계면 및 이중층 편극화에 있어서 나타나는 현상이다. 즉 전기유변유체와 같은 현탁액계에 작용하는 전하는 완화 스펙트럼에 의하여 특성화되며, 특성시간 및 그 분포는 분산상에 포함된 수분의 양에 의존한다. 그러나 이중층 또는 계면 편극화 메카니즘도 흡착된 수분의 역할을 완전히 설명하지는 못한다. 왜냐하면 수분이 없으면 전기유변 효과를 나타내지 못하는 시스템에서도, 여전히 전기적 이중층은 존재할 수 있으며, 또한 본질적으로 비균질계인 전기유변유체에서는 계면편극화에 의한 절연분산이 사라질 것 같지 않기 때문이다[10].

Block 등[2]은 전기유변현상을 야기시키는 중요한 요소로서 제안된 여러 형태의 편극화 메카니즘의 근원이, 개별적으로도 전기유변현상을 충분히 설명할 수 있는 성질의 것이라기 보다는, 넓은 의미의 계면편극화를 이루기 위한 과정들이라고 제안하였다. 즉 Fig. 6의 개략도에서와 같이 입자의 어느 한쪽 끝에 초과 전하상태를 만들기 위해 전하가 이동하는 과정에는 입자내부를 통한 전달현상, 전하의 표면 이동, 또는 입자 주위의 매질에서 이중층을 형성하는 전하군의 이동이 가능할 수 있다는 제안으로서 매우 설득력이 있다고 생각된다.

이상의 이론과 모델은 주로 입자 간에 작용하는 힘의 본질이 편극화 자체에 의한 정전기력이라 가정하고 있다. 그러나 수분 또는 다른 첨가물이 입자사슬 또는 덩어리 내의 표면장력에 의하여 바인더

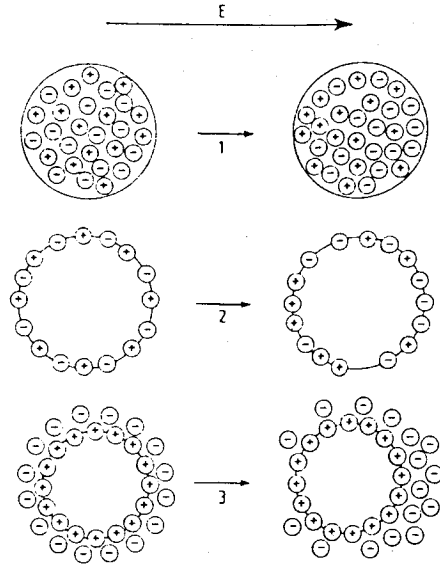


Fig. 6. Alternative mechanisms for interfacial polarization under the field E: (1) carrier migration through the bulk, (2) surface migration, and (3) charge migration in the double layer. Reproduced from Block *et al.* [2].

(binder)로서 작용한다는 메카니즘도 제시되었다 [21, 48]. Stangroom[48]은 전기유변유체의 Bingham 거동은 전기장에 의하여 유발된 입자 간의 수분가교(water bridge)에 기인한다고 생각하였다. 가교 메카니즘의 과정은, 입자의 어느 한쪽 끝으로 이온 전하가 이동하고, 입자 내 수분의 전기삼투(electro-osmosis)현상이 일어나서, 가교를 하기 위한 충분한 수분이 공급된다는 것이다. 그는 이와 같은 전기유변현상을 위하여 입자의 다공성이 클수록 좋다고 하였다. 그러나 수분이 전기유변현상을 유발하는 본질적인 요소일 수는 없으므로 수분가교 메카니즘이 전기유변현상을 설명하기에는 충분치 못하다. 최근까지도 대부분의 전기유변유체가 전기유변효과를 나타내기 위하여서는 극성 첨가제, 특히 수분이 필요한 것처럼 보였다. 그러나 무수 전기유변유체가 보고된 후, 수분가교 메카니즘은 본질적인 메카니즘으로 생각되지 않는다.

최근 수분이나 다른 첨가물을 포함하지 않으면서도 전기유변현상을 나타내는 분산상 물질이 알려진 후[2, 6-9, 20], 전기유변현상은 물질이 본질적으로 가지고 있는 화학적, 물리적 성질에 기인한 것이지,

수분이나 극성 첨가물 등 외부의 다른 요소에 의한 것이 아니라는 메카니즘이 제기되었다[2, 10]. 무수 전기유변유체의 전기유변효과에 관한 Block 등[2]의 설명에 의하면, 입자표면에 본질적으로 존재하는 유동전하(전자 또는 이온)가 표면 위에서는 자유롭게 움직일 수 있으나 매질을 통하여 움직여 나갈 수는 없고, 이런 계면 전하의 편극화가 전기유변효과를 야기한다는 것이다. 그들이 사용한 분산 입자가 반도체 고분자계이므로 이때의 유동전하는 전자다. 한편 Aluminosilicate계에서 유동전하는 입자표면의 이온으로서 그 현탁액의 전기유변효과는 물질의 본질적 화학적 성질 및 표면형태학(morphology)에 기인하는 것으로 생각된다[6-7, 10]. 그리고 무수 polyelectrolyte계에서는 고분자 사슬을 따라 국부적으로 움직일 수 있는 이온에 의하여 전기유변효과가 나타난다[9]. Treasurer 등[9]에 의하면 여러 polyelectrolytes의 전기유변효과는 pK값에 의존한다. 그럼에도 분산상 입자의 화학적, 물리적 성질에 기인한다는 메카니즘은 넓은 의미의 계면편극화 메카니즘의 설명과 유사한 점이 많다.

## 5. 결 론

전기유변유체를 실용적인 측면에서 응용하고자 하는 시도는 이 새로운 유체의 잠재력이 점도 또는 응력을 조절할 수 있다는 점을 인식한 Winslow[22]에 의하여 최초로 행하여졌다. 그는 전기장을 조정하여 작동되는 clutch, brakes, valves와 같은 전기기계장치에 관한 특허를 획득하였다. 그가 고안한 장치가 상업적으로 이용되지는 못하였으나, 요즘에 와서 시스템 데이터를 쉽게 분석, 조절할 수 있는 전자기술의 발달로 인하여 새로이 흥미를 끌고 있다[23, 72-85]. 즉 전기유변유체는 실시간(real-time) 전자기계장치의 연결부분에 응용될 가능성을 가지고 있으며, 진동 콘트롤과 기계적 에너지 콘트롤에 관한 잠재적 응용분야에 사용될 수 있다[20-21].

그럼에도 현재까지 보고된 전기유변유체가 실제적으로 응용되는데는 한계가 있다. 예를 들면, 현탁액계의 분산입자의 침강문제, 마모성 문제, 입자에 포함된 수분이나 그 밖의 첨가제 문제[20, 22-23, 26, 86, 87], 그리고 보다 중요한 것으로 많은 응용분야에 실제로 사용되기에는 아직 점도나 항복응력이 작다

는 문제[23, 70, 88-90] 등이 해결되어야 할 과제다. 분산입자에 포함된 수분은 전기저항에 의하여 발생하는 열에 의하여 사라지게 되어서 전기유변효과를 떨어뜨린다. 또한 전기분해를 야기하고, 많은 전력 소비를 유발하며 사용가능한 온도범위를 대략 -20에서 70°C로 한정시킨다[2, 10]. 수분을 다른 물질, 즉 Glycerol이나 Silanol 등으로 대체하려는 시도는 대체로 전기유변효과를 효과를 감소시킨다. 최근 거의 무시할 만큼 작은 양의 수분을 함유하고 있거나, 실제로 수분이 없다고 생각되는 전기유변물질이 보고되고 있다. 이와 같은 입자로서 결정성 Aluminosilicates[8], 여러가지 polyelectrolytes[9], 그리고 Phthalocyanine과 poly(acene-quinone radicals) 등을 포함한 고분자 반도체[2-3, 20] 등이 보고되었다. 현재까지 보고된 전기유변유체가 도달할 수 있는 응력값은 수 kV/mm의 전기장에 대하여 대략 수 kPa 정도이다[2].

그러므로 전기유변유체를 실용화하기 위해서는 그 물질 및 현상에 관한 충분한 이해가 요구된다. 앞서 살펴본 바와 같이 전기유변현상에 관해서는 아직도 상이한 연구보고와 엇갈린 해석들이 있으며, 이는 그 현상에 관한 메카니즘이 정확히 발견되지 않았기 때문이다. 현재로서는 입자 자체의 편극화, 입자와 매질 사이의 계면에서의 편극화, 그리고 입자 주위의 매질에서의 이중층편극화 메카니즘이 제시되었으며 어느 하나만으로는 복잡한 전기유변현상을 명확히 설명할 수 없다. 즉 물질에 따라서, 또는 현상에 따라서 어느 특정 메카니즘으로 잘 설명되기도 하고, 그렇지 못하기도 하다. 전기유변현상은 이에 관련하여 제시된 몇가지 메카니즘이 복합적으로 작용하고 있는 것으로 판단되며, 각각의 메카니즘이 넓은 의미의 계면편극화를 이루기 위한 과정이라 설명하는 것이 설득력 있다고 생각한다.

## 참고문헌

1. F.E. Filisko, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 116 (1991).
2. H. Block, J.P. Kelly, A. Qin and T. Watson, *Langmuir*, 6(1), 6 (1990).
3. H. Block, P. Rattray and T. Watson, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electro-

- rheological Fluids”, edited by R. Tao, 93 (1991).
4. Y.Z. Xu, R. Liang, T. Hao, Q.Z. Zhang, Z.M. Xu and Y.H. Chen, “Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids”, edited by R. Tao, 129 (1991).
  5. Y.Z. Xu, “Proc. XIth Int. Congr. on Rheology”, edited by P. Moldenaers and R. Keunings, Elsevier Science Publishers B.V., 783 (1992).
  6. D.R. Gamota and F.E. Filisko, *J. Rheol.*, **35**(3), 399 (1991).
  7. D.R. Gamota and F.E. Filisko, *J. Rheol.*, **35**(7), 1411 (1991).
  8. F.E. Filisko and L.H. Radzilowski, *J. Rheol.*, **34**(4), 539 (1990).
  9. U.Y. Treasurer, F.E. Filisko and L.H. Radzilowski, *J. Rheol.*, **35**(6), 1051 (1991).
  10. F.E. Filisko and D.R. Gamota, “Recent Advances in Non-Newtonian Flows”, ASME, AMD-153/PED-141, 75 (1992).
  11. D.R. Gamota and F.E. Filisko, “Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids”, edited by R. Tao, 246 (1991).
  12. Yu.F. Deinega and G.V. Vinogradov, *Rheologica Acta.*, **23**(6), 636 (1984).
  13. I.K. Yang and A.D. Shine, *J. Rheol.*, **36**(6), 1079 (1992).
  14. D.J. Klingenberg, F. van Swol and C.F. Zukoski, *J. Chem. Phys.*, **91**(12), 7888 (1989).
  15. D.J. Klingenberg and C.F. Zukoski, *Langmuir*, **6**, 15 (1990).
  16. D.J. Klingenberg, F. van Swol and C.F. Zukoski, *J. Chem. Phys.*, **94**(9), 6160 (1991).
  17. D.J. Klingenberg, F. van Swol and C.F. Zukoski, *J. Chem. Phys.*, **94**(9), 6170 (1991).
  18. D.J. Klingenberg, *J. Rheol.*, **37**(2), 199 (1993).
  19. Z.P. Shulman, E.V. Korobko and Yu. G. Yanovskii, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **33**, 181 (1989).
  20. H. Block and J.P. Kelly, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **21**, 1661 (1988).
  21. J.E. Stangroom, *J. Stat. Phys.*, **64**, 1059 (1991).
  22. W.M. Winslow, *J. Appl. Phys.*, **20**, 1137 (1949).
  23. R.T. Bonnecaze and J.F. Brady, *J. Chem. Phys.*, **96**(3), 2183 (1992).
  24. D.L. Klass and T.W. Martinek, *J. Appl. Phys.*, **38**(1), 67 (1967a).
  25. D.L. Klass and T.W. Martinek, *J. Appl. Phys.*, **38**(1), 75 (1967b).
  26. H. Uejima, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **11**, 319 (1972).
  27. L. Marshall, C.F. Zukoski and J.W. Goodwin, *J. Chem. Soc. Faraday Trans. I.*, **85**(9), 2785 (1989).
  28. H.A. Barnes, J.F. Hutton and K. Walters, “An Introduction to Rheology”, Elsevier, New York (1989).
  29. J.D. Ferry, “Viscoelastic Properties of Polymers”, John Wiley & Sons, Inc., New York (1970).
  30. M. Whittle, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **37**, 233 (1990).
  31. R.C. Kanu and M.T. Shaw, “Proc. XIth Int. Congr. on Rheology”, edited by P. Moldenaers and R. Keunings, Elsevier Science Publishers B.V., 766 (1992).
  32. T.C. Jordan, M.T. Shaw and T.C.B. McLeish, *J. Rheol.*, **36**(3), 441 (1992).
  33. V.I. Kordonsky, E.V. Korobko and T.G. Lazareva, *J. Rheol.*, **35**(7), 1427 (1991).
  34. Y. Otsubo, *J. Rheol.*, **36**(3), 479 (1992).
  35. I. Hwang, S.H. Chu and S.J. Lee, *Korean J. Rheol.*, **6**(1), 49 (1994).
  36. G.B. Thurston and E.B. Gaertner, *J. Rheol.*, **35**(7), 1327 (1991).
  37. Y.Z. Xu and R.F. Liang, *J. Rheol.*, **35**(7), 1355 (1991).
  38. E.V. Korobko and L. Rudzinski, “Proc. XIth Int. Congr. on Rheology”, edited by P. Moldenaers and R. Keunings, Elsevier Science Publishers B. V., 778 (1992).
  39. R.J. Atkin, X. Shi and W.A. Bullough, *J. Rheol.*, **35**(7), 1441 (1991).
  40. P.A. Arp and S.G. Mason, *Colloid & Polymer Sci.*, **255**, 980 (1977).
  41. P.A. Arp, R.T. Foister and S.G. Mason, *Adv. Coll. Interface Sci.*, **12**, 295 (1980).
  42. R.T. Bonnecaze and J.F. Brady, *J. Rheol.*, **36**(1), 73 (1992).
  43. T.C. Jordan and M.T. Shaw, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **24**(5), 849 (1989).
  44. H. See and M. Doi, *J. Rheol.*, **36**(6), 1143 (1992).
  45. H. See and M. Doi, “Proc. XIth Int. Congr. on Rheology”, edited by P. Moldenaers and R. Keunings, Elsevier Science Publishers B.V., 781 (1992).
  46. M.P. Allen and D.J. Tildesley, “Computer Simulation of Liquids”, Oxford University Press, Oxford (1987).
  47. J.M. Haile, “Molecular Dynamic Simulation”, Wiley-InterScience, New York (1992).
  48. J.E. Stangroom, *Phys. Technol.*, **14**, 290 (1983).
  49. H. Conrad, A.F. Sprecher, Y. Choi and Y. Chen,

- J. Rheol.*, **35**(7), 1393 (1991).
50. Y. Chen, A.F. Sprecher and H. Conrad, *J. Appl. Phys.*, **70**(11), 6796 (1991).
  51. D. Brooks, J. Goodwin, C. Hjelm, L. Marshall and C. Zukoski, *Colloids Surf.*, **18**, 293 (1986).
  52. P.M. Adriani, Ph.D. Thesis, Stanford University (1990).
  53. J.C. Hill, N.A. Vaz, D.J. Klingenberg and C.F. Zukoski, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 280 (1991).
  54. H. Conrad, Y. Chen and A.F. Sprecher, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 195 (1991).
  55. R. Tao, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 3 (1991).
  56. T. Chen, R.N. Zitter and R. Tao, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 17 (1991).
  57. J.M. Ginder and L.D. Elie, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 23 (1991).
  58. T.C. Halsey, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 37 (1991).
  59. J. Takimoto, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 53 (1991).
  60. K.H. Ahn and D.J. Klingenberg, submitted to *J. Rheol.* (1993).
  61. A.M. Kraynik, R.T. Bonnecaze and J.F. Brady, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 59 (1991).
  62. R.T. Bonnecaze and J.F. Brady, *Proc. R. Soc. Lond. A.*, **432**, 445 (1990).
  63. A.F. Sprecher, Y. Chen, Y. Choi and H. Conrad, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 142 (1991).
  64. M. Doi and S.F. Edwards, "The Theory of Polymer Dynamics", Oxford University Press, London (1986).
  65. R.A. Anderson, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 81 (1991).
  66. P. Bailey, D.G. Gillies, D.M. Heyes and L.H. Sutcliffe, *Molecular Simulation*, **4**, 137 (1989).
  67. M.J. Chrzan and J.P. Coulter, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 142 (1991).
  68. P.M. Adler, *J. Colloid Interface Sci.*, **84**, 461 (1981).
  69. P.M. Adler, *J. Colloid Interface Sci.*, **84**, 475 (1981).
  70. D.L. Hartsock, R.F. Novak and G.J. Chaundy, *J. Rheol.*, **35**, 1305 (1991).
  71. I. Hwang, Ph.D. thesis, Seoul National University, in preparation (1995).
  72. Z. Lou, R.D. Ervin and F.E. Filisko, *J. Rheol.*, **37**(1), 55 (1993).
  73. W. Chenguan and W. Aixia, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 465 (1991).
  74. A. Hosseini-Sianaki, W.A. Bullough, R. Firoozian, J. Martin and R.C. Tozer, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 219 (1991).
  75. F.P. Boyle, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 236 (1991).
  76. M. Whittle, R. Firoozian, D.J. Peel and W.A. Bullough, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 343 (1991).
  77. D.A. Brooks, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 367 (1991).
  78. Z. Lou, R.D. Ervin and F.E. Filisko, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 398 (1991).
  79. A.R. Johnson, W.A. Bullough, R. Firoozian, A. Hosseini-Sianaki, J. Makin and S. Xiao, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 424 (1991).
  80. J.E. Stangroom, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 442 (1991).
  81. Z. Lou, R.D. Ervin and F.E. Filisko, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 453 (1991).
  82. M. Kazz and D.L. Larson, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 470 (1991).
  83. D.K. Bhadra and W.B. Thompson, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 477 (1991).
  84. C. Dry, "Proceedings of the 3rd International Co-

- nference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 494 (1991).
85. Technical Report "Smart Fluids", Emerging Technologies No. 35, Technical Insight, Inc., Englewood/Fort Lee, NJ (1989).
86. L.F. Evans, I. Harness, P.R. Kermore and J.E. Stangroom, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 154 (1991).
87. T.J. Garino, D. Adolf and B. Hance, "Proceedings of the 3rd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by R. Tao, 167 (1991).
88. H.A. Barnes and K. Walters, *Rheologica Acta*, **24**, 323 (1985).
89. J.P. Hartnett and R.Y.Z. Hu, *J. Rheol.*, **33**, 671 (1989).
90. A.M. Kraynik, "Proceedings of the 2nd International Conference on Electrorheological Fluids", edited by J.D. Carlson, A.F. Sprecher and H. Conrad, 445 (1990).

## 저자약력

### 이 승 종

1974 서울대학교 화학공학과(학사)  
 1982 University of Delaware 화학공학과(Ph.D.)  
 1982~1983 University College of Wales 응용수학과  
 (Post Doc.)  
 1989~1990 University of Delaware 화학공학과(객원  
 교수)  
 1984~현재 서울대학교 화학공학과 교수

### 황 인 석

1985 서울대학교 화학공학과(학사)  
 1987 서울대학교 화학공학과(석사)  
 1989~1991 KIST 위촉연구원  
 1991~현재 서울대학교 화학공학과 박사과정