

## 이산화티타늄 전기유변 유체의 수직 응력과 정전기 분극 모델에 의한 전산모사

김영대<sup>†</sup>

전남대학교 화학공학부  
61186 광주광역시 북구 용봉로 77  
(2024년 3월 4일 접수, 2024년 4월 11일 수정본 접수, 2024년 4월 20일 채택)

## The Normal Stress of TiO<sub>2</sub> Electrorheological Fluid and Its Model Prediction

Young Dae Kim<sup>†</sup>

School of Chemical Engineering, Chonnam National University, 77, Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, 61186, Korea  
(Received 4 March 2024; Received in revised form 11 April 2024; Accepted 20 April 2024)

### 요 약

TiO<sub>2</sub> 전기유변 유체의 수직 응력을 실험적으로 측정하고 전산모사도 수행하였다. 전기장 하에서 수직 응력은 입자 사이의 수직 방향의 정전기 인력에 의해 음수 값을 보였고, 수직 응력의 절대값은 전기장의 증가에 따라 급격하게 상승하였다. 전단 응력에서처럼 수직 항복 응력도  $E^2$ 에 비례하는 특성을 보여, 수직 응력을 전기유변 현상의 평가에 활용할 수 있음을 나타냈다. 수직 응력의 거동을 이해하기 위해 수행한 전산모사는 수직 응력이 실험 결과와 정성적으로 잘 일치함을 보여 주었다. 또한 전기장 하에서는 전단 속도가 증가함에 따라 수직 응력의 절대값이 줄어드는 경향은 전단 속도에 따른 입자들의 구조 변화로 발생하는 것으로 나타났다.

**Abstract** – The normal stress of TiO<sub>2</sub> ER fluid under an electric field showed negative values due to the electrostatic attraction force in the normal direction between particles and the absolute value increased dramatically with electric field strengths. The normal yield stress exhibited  $E^2$  dependence similar to the dynamic yield stress, indicating that normal stress can be utilized for evaluating the ER effect. Numerical simulation demonstrated good qualitative agreement with the experimental data and suggested that the decrease in the absolute value of normal stress with increasing shear rates was attributed to the rearrangement of particle configurations under shear.

**Key words:** Electrorheology, Normal stress, Electrorheological fluids, Polarization model, Dynamic simulation

### 1. 서 론

전기유변(Electrorheological, ER) 현상은 Winslow[1]에 의해 1940년 처음 관찰되었으며 그 잠재적 유용성으로 인해 전기유변 유체와 그 메커니즘에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 전기유변 유체는 일반적으로 절연성 액체에 절연성 또는 전도성 입자를 분산시킨 현탁액이다. 현탁액 흐름에 수직 방향의 외부 전기장을 인가할 때 유변학적 특성이 급격하게 변화하는 데 이를 전기유변 현상이라 말한다. 분산된 입자들은 외부 전기장에 의하여 전기장 방향으로 사슬 모양 구조로 정렬하며, 이에 의해 현탁액의 점도가 큰 폭으로 변하며, 현탁액의 항복 응력이 가해진 전기장 세기의  $n$ 승( $E^n$ )에 비례함을 보였다[2-7].

이와 같은 전기유변 유체의 특성은 댐퍼, 클러치 및 적응형 구조 등의 공학적 및 산업적 응용에 잠재적인 다양한 활용성을 제공한다[4,5,7]. 효과적인 전기유변 유체 개발과 그 메커니즘에 대해 많은 연구가 진행되었으나 초기 전기유변 유체들은 상업적으로 사용하기에는 전기유변 현상이 작은 단점이 있었다[2-9]. 따라서 전기유변 유체의 활성화를 목적으로 첨가제가 사용되었으나, 전력 소비 증가 또는 부식 등의 제한 조건 등이 발생하였다[10-12]. 이에 따라 우수한 전기적 및 기계적 특성을 가진 전도성 고분자가 유망한 전기유변 재료로 사용되기도 하였다[7,9,13-17].

전기유변 현상을 설명하기 위해 제시된 많은 메커니즘들 중 정전기 분극 모델과 전도 모델이 전기유변 현상의 이론적인 측면에 적합한 설명인 것으로 알려져 왔다[18-26]. 정전기 분극 모델은 절연성 전기유변 유체의 전기유변 현상을 설명하며, 입자와 매질 사이의 유전상수 불일치가 전기유변 현상을 나타내며, 항복 응력이 전기장 크기에 제곱에 비례한다[4-5,8,21,24]. 전도 모델은 직류 또는 저주파수 교류 전기장 하에서 입자 또는 액체 매질의 전도도 불일치로 인해 전기유변 효과가 나타난다는 것을 고려한 메커니즘으로,

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: youngdae@jnu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

항복 응력이 전기장 크기에 1.5 승에 비례함을 예측한다[22,23,25,26].

대부분의 전기유변 현상의 평가는 전기장 하에서 유체의 전단 응력의 변화를 측정한 결과에 기반하고 있다. 즉 정상상태의 전단 응력 및 점도 변화가 전기유변 현상의 설명에 유용하게 이용되고 있다. 전기유변 현상을 평가할 때 이용되는 전단 상태의 유변 실험에서 전단 응력 및 점도뿐만 아니라 수직 응력도 함께 측정할 수 있다. 이렇게 측정이 가능한 수직 응력 자료를 전기유변 현상을 평가하는 데 활용할 수 있다면 매우 유용할 것이다. 압축 상태에서 수직 응력을 측정하여 수직 응력이 전단 응력에 비해 상대적으로 크기가 커서 활용에 유용할 것이라 보고도 있다[27].

여기서는 전단 상태에서 전기유변 유체의 수직 응력을 측정하고 이 결과가 전기유변 유체의 현상을 이해하고 평가하는 데 사용이 가능한지를 살펴보았다. 또한 수직 응력의 거동을 이해하기 위해 전산모사도 함께 수행하였다.

## 2. 실험

전기유변 유체는  $\text{TiO}_2$  (Aldrich, 평균 직경: 44  $\mu\text{m}$ , 표준편차:  $\pm 8 \mu\text{m}$ ) 입자를 실리콘 오일(Fluka,  $\eta_c = 100 \text{ cP}$ ,  $\rho_c = 0.967 \text{ g/cm}^3$ )에 분산시켜 준비하였다. 전기유변 유체는 유변 실험을 수행하기 3일 전에 준비하여 안정화 시켰다.

유변 실험은 전기장을 가할 수 있도록 준비된 평행판 측정 셀이 부착된 AR-2000 유변물성측정기(TA Instrument)를 사용하여 25  $^{\circ}\text{C}$ 에서 수행하였다. 전위차는 고전위 DC 전원 공급 장치(Glassman High Voltage Inc.)를 이용해 공급하였다. 시료가 평행판 사이에 투입된 후 균일한 입자 분포를 형성하기 위해 전기장이 없는 상태에서 전단 속도 80  $\text{s}^{-1}$ 에서 1 분간 전단하였다. 유변 실험을 수행하기 전에 원하는 전기장(0~2 kV/mm) 하에서 전단 속도 0  $\text{s}^{-1}$ 에서 1 분 동안 입자들이 구조를 형성할 수 있도록 하였다. 이후 원하는 전기장 하에서 전단 속도를 증가시키면서 실험을 수행하여 전단 응력과 수직 응력을 측정하였다. 입자 수직 응력 차이  $\Delta N = N_{11} - N_{22}$ 은 비균일 전단에 대한 보정 없이  $\Delta N \approx 2F/\pi R^2$ 으로 결정하였다. 여기서  $F$ 와  $R$ 은 각각 수직 힘과 평행판의 반경이다.

## 3. 전산모사

전기유변 유체의 전산 모사는 이전에 소개된 방법[25,26]과 유사하게 정전기 분극 모델을 기반으로 수행하였다. 전기유변 유체는 평행한 두 전극 사이에 존재하며, 외부에서 전기장( $E$ )이 가해진 후에 전극의 상부 판에 전단력을 가하여 주변 속도 분포가  $u^{\infty}$ 가 되도록 하였다.

전기장  $E$ 에 의한 정전기 힘은 점 쌍극자(point dipole)로 간주하였다. 전기장에 의해 유도된 입자  $j$ 의 존재에 의해  $i$ 번째 입자에 작용하는 힘은 전기장 하에서의 정전기 모델에 적합하도록 변형한 아래 식을 사용하였다[25,26].

$$F_{ij}^{el}(R_{ij}, \theta_{ij}) = f_o \beta^2 [(3 \cos^2 \theta_{ij} - 1) \mathbf{e}_r + \sin 2\theta_{ij} \mathbf{e}_{\theta}] \quad (1)$$

여기서  $R_{ij}$ 와  $\theta_{ij}$ 는 각각 입자  $i$ 와  $j$ 사이의 거리와 각도,  $f_o = 3\pi\epsilon_0\epsilon_c d^2 E^2 / 16$ ,  $\beta = (\epsilon_p - \epsilon_c) / (\epsilon_p + 2\epsilon_c)$ ,  $\mathbf{e}_r$  및  $\mathbf{e}_{\theta}$ 는 각각  $r$  및  $\theta$  방향의 단위 벡터이다.

전극에 의해 입자  $i$ 에 작용하는 힘은 입자  $i$ 와 모든 다른 입자들에 대해 전극 표면에 각각 투영된 입자 사이의 정전기적 상관관계

(식 (1))에 의해 주어진다고 간주하였다.

$$F_{ij}^{el, wall}(R_j) = \sum_j F_{ij}^{el}(R'_{ij}, \theta'_{ij}) \quad (2)$$

위 식의 ' 표시는 이 힘이 입자  $i$ 와 입자  $j$ 의 투영된 입자 사이의 상관관계임을 나타낸다.

전단력에 의해 발생한 액체의 움직임에 의해 입자  $i$ 에 작용하는 유체역학적 저항은 Stokes' 법칙을 적용하였다.

$$F_i^{hyd} = 3\pi\eta_c d(u^{\infty}(R_i) - dR_i/dt) \quad (3)$$

여기서  $u^{\infty}(R_i)$ 는 주변 속도이다.

입자와 입자 사이 및 입자와 전극 벽 사이의 작용하는 반발력은 아래의 근거리 반발력으로 나타내었다.

$$F_{ij}^{rep}(R_{ij}) = -F_o \exp[(R_{ij} - d)/0.03] \mathbf{e}_r \quad (4)$$

$$F_{ij, wall}^{rep}(R_i) = -F_o \exp[(H_i - d/2)/0.03d] \mathbf{n} \quad (5)$$

$H_i = L_z/2 - |z_i|$ 이고,  $L_z$ 는 전극 사이의 거리,  $\mathbf{n}$ 은 현탁액에서 전극 방향으로의 단위 수직 벡터이다.

모든 힘을 식 (1)에 대입하여 입자  $i$ 에 대한 운동 방정식을 적을 수 있다.

$$3\pi\eta_c d \frac{dR_i}{dt} = \sum_{j \neq i} F_{ij}^{el}(R_{ij}, \theta_{ij}) + \sum_j F_{ij}^{el}(R'_{ij}, \theta'_{ij}) + \sum_{j \neq i} F_{ij}^{rep}(R_{ij}, \theta_{ij}) + 3\pi\eta_c d u^{\infty}(R_i) \quad (6)$$

세 번째 합인  $\sum_j$ 은  $i$ 를 제외한 모든  $j$  입자와  $i$  입자 사이의 반발력과  $i$  입자와 전극들 사이의 반발력을 합한 것을 나타낸다.

식 (6)의 운동 방정식은 다음 척도에 의해 무차원화(dimensionless)되었다.

$$l_{sc} = d, f_{sc} = f_o, t_{sc} = 16\eta_c / (\epsilon_0 \epsilon_c E^2)$$

따라서 전극에서 떨어진 입자  $i$ 의 무차원 운동 방정식은 다음과 같으며

$$dr_i^*/dt^* = \sum_{j \neq i} f_{ij}^{el*} + \sum_j f_{ij}^{el*} + \sum_{j \neq i} f_{ij}^{rep*} + u^{\infty*}(r_i^*) \quad (7)$$

\*는 무차원 수를 나타낸다. 여기서는 아래의 정상 전단 흐름을 고려하였다.

$$u^{\infty*}(r_i^*) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ \dot{\gamma}^*(z_i^* + L_z^*/2) \mathbf{e}_x & t > 0 \end{cases} \quad (8)$$

여기서  $\dot{\gamma}^*$ 는 무차원 전단 속도이다.

입자의 위치가 시간의 함수로 구해지면 유변학적 특성이 계산될 수 있다.  $z$ -방향의 정전기적 무차원 수직 응력은 다음 식에 의해 구해졌다.

$$\tau_{zz}^* = -(1/V^*) \sum_{i=1}^N z_i^* f_{zi}^* \quad (9)$$

여기서  $V^*$ 는  $N$  입자를 포함하고 있는 무차원 부피이다.

전산 모사는  $N$ 개의 구형 입자를 전극 사이( $L_x^* = 72$ ,  $L_z^* = 18$ )에 무작위로 평면에 배치한( $\dot{\gamma}^* = \text{일정}$ ) 2차원에서 식 (7)의 무차원 운동 방정식을 동적 모사 방법으로 풀었다. 전산 모사 코딩을 위해

Fortran을 사용하였다. 전단 흐름 모사는 입자 분율  $\phi = 0.1$ 에 대해 3개의 초기 배열들에 대해 무차원 시간 간격  $\Delta t^* \leq 10^{-3}$ 으로 무차원 전단 속도를 증가시키면서 Euler 방법으로 각 입자에 대해 수치 적분하여 수행하였다. 전산 모사에서  $\text{TiO}_2$  현탁액의 연속 매질인 실리콘 오일의 유전상수  $\epsilon_c = 2.74$ 와  $\text{TiO}_2$ 의 유전상수  $\epsilon_p = 85$ 를 사용하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 1은 다양한 전기장 세기에서 10 wt%  $\text{TiO}_2$  현탁액에 대한 전단 속도 변화에 따른 전단 응력의 결과를 나타낸 그림이다.  $\text{TiO}_2$  현탁액의 경우 전기장의 유무와 관계없이 동적 항복 응력을 보이는 것으로 나타났다. 전기장이 없는 경우에 비해 전기장을 가한 경우 전단 응력이 급격하게 상승하고 상승 폭은 전기장의 세기가 증가함에 따라 증가하는 전기유변 특성을 보인다. Fig. 1에 나타난 결과는 특징적인 전기유변 현상을 나타내고 있다. 이와 같은 정상상태의 유변 현상은 Bingham 유체( $\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$ )로 표현될 수 있고, 전단 속도  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ 에서의 전단 응력  $\tau_0$ 를 동적 항복 응력으로 간주할 수 있다. 여기서  $\eta$ 는 정상상태에서의 점도를 나타낸다.

대부분의 전기유변 연구에서 동적 항복 응력을 이용하여 전기유변 현상을 설명하고 있다[12-18,28-30]. 전기장  $E = 0$ 인 경우와 전기장이  $E > 0$ 인 경우의 동적 항복 응력 값을 각각  $\tau_0(0)$ 와  $\tau_0(E)$ 라 하면 그 동적 항복 응력 차이인  $\Delta\tau = \tau(E) - \tau(0)$ 를 일반적으로 전기유변 현상으로 부른다[1-5,8-20]. 전기유변 현상은  $\Delta\tau \propto E^n$ 의 형태로 나타나고,  $n = 2$ 인 경우는 정전기 분극 모델에 의해,  $n < 2$ 인 경우는 전도 모델에 의해 설명되고 있다[22,23].

$E$ 의 증가에 따른 항복 응력  $\Delta\tau$ 의 변화를 Fig. 2에 나타내었다(검은 원, 왼쪽 축). 검은 원은 실험 자료를 나타내며 선은  $\Delta\tau \propto E^n$ 에 맞춘 결과이다,  $n = 2$ 로 나타났으며, 따라서  $\text{TiO}_2$  현탁액의 전기유변 현상은 정전기 분극 모델에 의해 설명될 수 있음을 알 수 있다.

위와 같이 전기유변 현상을 전단 응력 결과를 사용하여 해석하는 것이 이제까지의 일반적인 경향이였다. 그러나 유변 물성 측정기로 전단 응력을 측정하는 실험을 수행 중에 수직 응력도 동시에 측정할 수 있다. 여기서는 이렇게 측정된 수직 응력 실험 자료의 활용성을 살펴보았다.

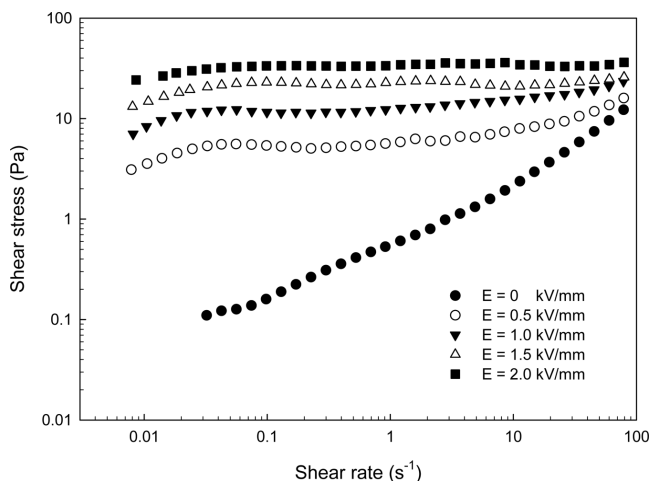


Fig. 1. Shear stress as a function of shear rate for 10 wt%  $\text{TiO}_2$  ER fluid at different electric field strengths.

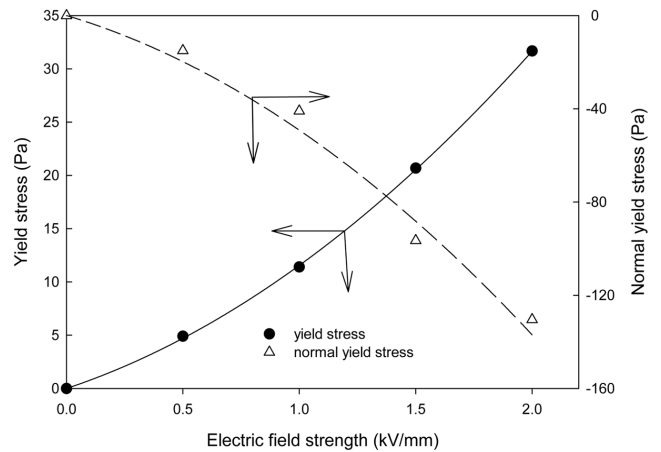


Fig. 2. Yield stress (left axis) and normal yield stress (right axis) as a function of electric field strength for 10 wt%  $\text{TiO}_2$  ER fluid.

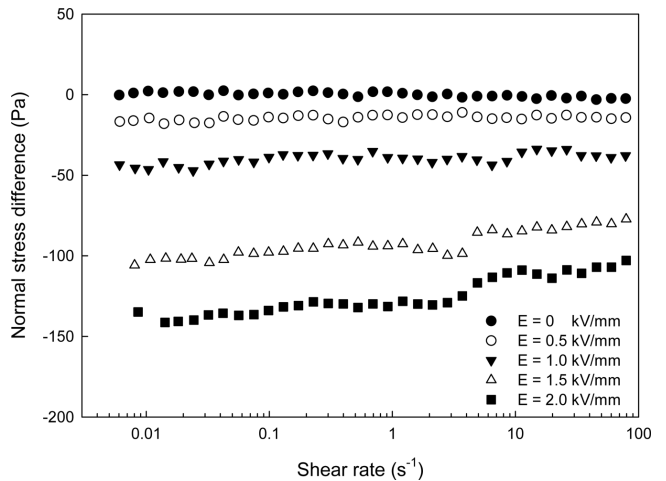


Fig. 3. Normal stress difference as a function of shear rate for 10 wt%  $\text{TiO}_2$  ER fluid at different electric field strengths.

Fig. 3은 다양한 전기장 세기에서 10 wt%  $\text{TiO}_2$  현탁액에 대한 전단 속도 변화에 따른 수직 응력 차이를 나타낸 그림이다. 전기장 하에서 측정된 수직 응력  $\Delta N$ 은 전극과  $\text{TiO}_2$  현탁액의 수직 응력을 모두 포함하고 있다. 따라서  $\text{TiO}_2$  현탁액만의 수직 응력을 구하기 위해 측정된 수직 응력에서 전극에 의한 수직 응력을 제외한 수직 응력을 Fig. 3에 나타내었다. 전기장이 없는 경우 전단 속도에 관계없이  $\Delta N = 0$ 임을 보여 주고 있다. 전기장을 가한 경우 수직 응력이 음수 값을 가지며, 그 절대값은 전기장의 증가에 따라 급격하게 상승함을 나타내고 있다. 전기장 크기의 증가에 따른 수직 응력 차의 절대값의 증가는 전기장 크기에 따른 전단 응력의 증가(Fig. 1)와 유사함을 알 수 있다. 또한 같은 전기장 하에서는 전단 속도가 증가함에 따라 수직 응력 차이의 절대값이 줄어드는 경향을 나타낸다.

정전기력은 같은 전하 사이의 반발력과 다른 전하 사이의 인력을 포함한다. 전기장에 의해 쌍극자로 유도된 입자들 사이의 정전기력(정전기 인력과 반발력의 상호 작용)으로 전극에 사이에 입자들의 사슬 구조가 형성된다. 사슬 구조로 배열된 입자 구조(Fig. 5(a))로 인해 수직 방향의 정전기 인력을 지니게 된다. 따라서 수직 응력이 음수 값을 갖는 것은 전기장에 의해 형성된 발생한 입자 사이의 수직 방향의 정전기 인력에 의한 것으로 보이며, 전기장 크기에 따라

정전기 인력이 증가하므로, 전기장의 세기가 증가할수록 수직 응력이 더 큰 음수 값을 나타내게 된다. 또한 수직 응력 차이의 절대값이 전단 응력에 비해 약 3 배 정도 큰 값을 나타내고 있어, 더 큰 값의 전기유변 현상을 요구되는 상황에서 수직 응력은 향후 유용한 활용성을 보인다고 할 수 있다.

정상상태 수직 응력의 유변 현상을 Bingham 유체와 유사하게  $\Delta N = \sigma_0 + \mu \dot{\gamma}$ 로 표현하고, 전단 속도  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ 에서의 수직 응력을 동적 수직 항복 응력  $\sigma_0$ 로 간주할 수 있다. 여기서  $\mu$ 는 비례상수이다.  $E$ 의 증가에 따른 동적 수직 항복 응력  $\sigma_0$ 의 변화를 Fig. 2에 나타내었다(빈 삼각, 오른쪽 축). 빈 삼각은 실험 자료를 나타내며 선은  $\sigma_0 \propto E^n$ 에 맞춘 결과이며,  $n = 2$ 로 나타났다. 수직 응력과 전단 응력과 똑같은 전기장 비례 현상( $\propto E^2$ )을 나타내고 있어, 수직 응력을 전기유변 현상 평가를 위해 사용할 수 있음을 나타낸다.

TiO<sub>2</sub> 현탁액의 전기유변 현상이 정전기 분극 모델로 설명될 수 있어, 정전기 분극 모델을 이용한 전산모사를 통해 전단 속도 변화에 따른 수직 응력 변화를 살펴보고 있다. Fig. 4는 다양한 전기장 세기에서 TiO<sub>2</sub> 현탁액 경우에 대한 전단 속도 변화에 따른 수직 응력의 전산 모사 결과를 나타낸 것이다. 실험에서처럼 전기장이 없는 경우에는 전단 속도에 상관없이 수직 응력이 0이므로 Fig. 4에는 나타내지 않았다. 자료는 세 개의 초기 배열에 대한 전산모사에서 얻은 평균값이고, 세 전산모사 결과의 표준 편차를 Fig. 4에 오차범위(error bar)로 나타내었다.

Fig. 4의 전산모사 결과를 살펴보면 실험 결과와 같이 전기장 하에서 수직 응력은 음수 값을 가지며, 수직 응력의 절대값은 전기장의 증가에 따라 급격하게 상승하고  $E^2$ 에 비례함을 나타내고 있다. 또한 전단 속도가 증가함에 따라 수직 응력의 절대값이 줄어드는 경향도 보여주고 있다. 즉, 전산모사로 예측한 수직 응력이 실험 결과(Fig. 3)와 정성적으로 일치하고 있음을 나타낸다. 수직 응력의 값은 실험값에 비해 상당히 작게 예측되었다. 이는 정전기 분극 모델로 다극자(multi-pole)를 무시하고 쌍극자만을 고려한 것에 기인한 것으로 보여진다[21-24].

Fig. 3의 실험과 Fig. 4의 전산모사 결과에 나타난 전단 속도 증가에 따른 수직 응력 절대값의 감소가 전단 속도 증가에 따라 발생하는 입자 구조 변화에 기인한 것이 아닌가 판단되어, 전기장 하에서

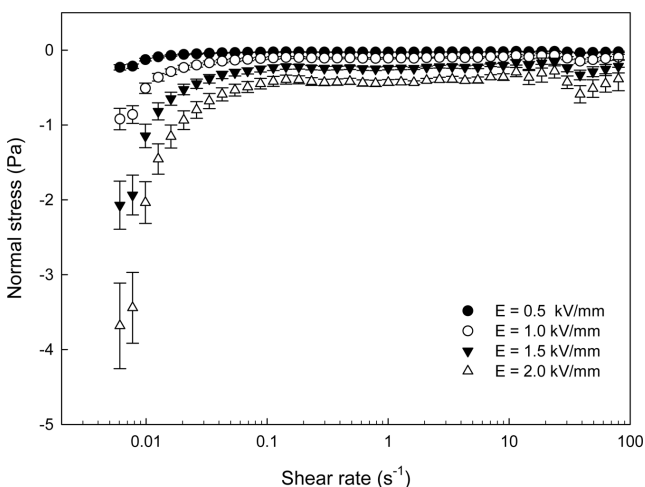


Fig. 4. Simulation results: normal stress of a ER fluid as a function of shear rate at different electric field strengths ( $\phi = 0.1$ ). Error bars are the standard deviations of 3 simulation results.

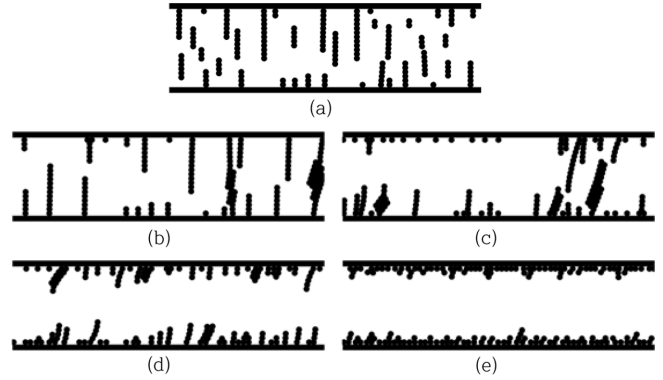


Fig. 5. Configurations of the ER fluid ( $\phi = 0.1$ ) at  $E = 1.0$  kV/mm for various shear rates (a) initial configuration ( $\dot{\gamma} = 0.0$  s<sup>-1</sup>), (b)  $\dot{\gamma} = 0.01$  s<sup>-1</sup>, (c)  $\dot{\gamma} = 0.1$  s<sup>-1</sup>, (d)  $\dot{\gamma} = 1.0$  s<sup>-1</sup>, and (e)  $\dot{\gamma} = 10$  s<sup>-1</sup>.

전단 속도 변화에 따른 입자 분포를 전산모사를 통해 조사하였다.

Fig. 5는 1 kV/mm 전기장 하에서 다양한 전단 속도에서 전산모사에서 얻은 입자 분포를 나타내고 있다. 입자 분포 그림은 입자 배열 정보를 postscript를 이용하여 구현하였다. 전기장 하에서 전단 속도가 매우 작은 경우( $\dot{\gamma} = 0.01$  s<sup>-1</sup>)에는 생성된 사슬 구조가 유지되고 있고(Fig. 5(a)), 전단 속도가 증가함에 따라 사슬 구조가 끊어지기 시작하여(Fig. 5(b) at  $\dot{\gamma} = 0.1$  s<sup>-1</sup>), 좀더 큰 전단 속도에서는 결국 모든 사슬 구조들이 끊어지고(Fig. 5(c) at  $\dot{\gamma} = 1.0$  s<sup>-1</sup>), 매우 큰 전단 속도에서는 입자들이 평행판에 층을 이루어 묻혀 있는 형상(Fig. 5(d) at  $\dot{\gamma} = 10$  s<sup>-1</sup>)을 나타낸다.

입자 분포에 나타난 것처럼 평행판 사이에 형성된 입자 사슬 구조들이 전단 속도에 증가에 따라 파괴되면서 입자 사이의 정전기력의 상관관계를 유지하며 재배열하고 있다. 특히  $\dot{\gamma} \geq 1.0$  s<sup>-1</sup>인 경우는 모든 사슬 구조가 끊어지고 입자들이 평판에 응집하기 시작하고,  $\dot{\gamma} \geq 10$  s<sup>-1</sup>에서는 입자들이 평판에 응집되어 층을 형성하고 있다. 따라서  $\dot{\gamma} \geq 1.0$  s<sup>-1</sup>에서 입자와 액체가 서로 분리된 상태가 되어, 액체가 입자에 비해 빠르게 흐르게 된다. 즉, 액체가 평판에 응집된 입자층 사이로 빠른 속도로 흐르게 될 것이다. 더우기 평판에 형성된 입자층 때문에 줄어드는 흐름 경로에 의해 더 빨라진 액체의 흐름은 줄어드는 흐름 경로를 확장하고자 할 것이다. 이 현상은 평행판 사이의 거리를 확장 시키는 응력(+ 값)을 발생시켜 음수인 수직 응력을 감소시킬 것이다. 즉, 전단 속도 증가에 따른 수직 응력 절대값의 감소는 전단 속도에 따른 입자들의 구조 변화에서 발생하는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

일반적으로 전기유변 현상의 평가는 전기장 하에서 유체의 전단 응력을 기반으로 있으나, 전단 상태에서 측정한 수직 응력을 전기유변 현상의 평가에 활용할 수 있는지 살펴보고, 수직 응력의 전산모사도 수행하였다.

전기장 하에서 수직 응력은 전기장에 의해 발생한 입자 사이의 수직 방향의 정전기 인력으로 인해 음수 값을 나타내며, 그 절대값은 전기장의 증가에 따라 상승하였다. 수직 항복 응력도 동적 항복 응력과 같이  $E^2$  비례를 나타내고 있다. 따라서 수직 응력이 전기유변 현상의 평가에 사용될 수 있음을 보였다. 또한 수직 응력의 절대

값이 전단 응력에 비해 큰 값을 나타내어 향후 유용한 활용성을 가졌다고 할 수 있다.

수직 응력의 거동을 이해하기 위해 전산 모사도 함께 수행하였으며 전산모사로 예측한 수직 응력이 실험 결과와 정성적으로 잘 일치하였다. 전기장 하에서 전단 속도 증가에 따라 수직 응력의 절대값이 줄어드는 경향을 이해하기 위해 전산모사를 통해 전단 속도 변화에 따른 입자 분포를 살펴보았다.

전단 속도가  $\dot{\gamma} \geq 1.0 \text{ s}^{-1}$ 에서 입자와 액체가 서로 분리된 상태가 되어, 평판에 응집된 입자층 때문에 줄어드는 흐름 경로를 확장하고자 하는 응력(+값)으로 인해 음수인 수직 응력을 감소시키는 것으로 보였다. 즉, 전단 속도 증가에 따른 수직 응력 절대값의 감소는 전단 속도에 따른 입자들의 구조 변화에서 발생하는 것으로 나타났다.

## References

- Winslow, W. M., "Induced Fibration of Suspensions," *J. Appl. Phys.*, **20**, 1137-1140(1949).
- Jekal, S., Chu, M., Kim, Y., Noh, J., Kim, J., Kim, H., Oh, W., Otgonbayar, Z. and Yoon, C., "A Study on Enhanced Electrorheological Performance of Plate-like Materials via Percolation Gel-like Effect," *Gels*, **9**(11), 891-903(2023).
- Dong, Y., Kim, H. and Choi, H., "Conducting Polymer-based Electro-responsive Smart Suspensions," *Chemical Papers*, **75**(10), 5009-5034(2021).
- Deinega, Y. F. and Vinogradov, G. V., "Electric Fields in Rheology of Disperse System," *Rheol. Acta.*, **23**, 636-651(1984).
- Shulman, Z. P., Gorodkin, R. G. and Korobko, E. V., "The Electrorheological Effects and Its Possible Uses," *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, **8**, 29-41(1981).
- Xue, Bing., Zhao, X. and Yin, J., "Electrorheological Effect of Self-crosslinked Polymerized Ionic Liquids Containing Different Types of ion Spacers," *Polymer*, **288**, 126455(2023).
- Han, Y. M., "2-DOF Force-reflecting Control of ER Haptic Interface Featuring a Spherical Joint," *Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng'g.*, **33**(6), 691-698(2023).
- Block, H. and Kelly, J. P., "Electro-rheology," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **21**, 1661-1677(1988).
- Kim, Y. D. and Yoon, D. J., "Electrorheological Fluids of Polypyrrole-tin Oxide Nanocomposite Particles," *Korea-Australia Rheol. J.*, **28**(4), 275-279(2016).
- Filisko, F. E. and Razdilowski, L. H., "An intrinsic Mechanism for the Activity of Amino-silicate Based Electrorheological Materials," *J. Rheol.*, **34**, 539-552(1990).
- Otsubo, Y., Sakine, M. and Katayama, S., "Effect of Adsorbed Water on the Electrorheology of Silica Suspensions," *J. Coll. Interface Sci.*, **150**, 324-330(1992).
- Kim, Y. D. and Klingenberg, D. J., "Two roles of Nonionic Surfactants on the Electrorheological Response," *J. Coll. Interface Sci.*, **168**, 568-578(1996).
- Dong, Y. Z., Kwon, S. H., Choi, H. J., Puthiaraj, P., and Ahn, W., "Electroresponsive Polymer-Inorganic Semiconducting Composite (MCTP-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) Particles and their Electrorheology," *ACS Omega*, **3**, 17246-17253(2018).
- Noh, J., Yoon, C. M. and Jang, J., "Enhanced Electrorheological Activity of Polyaniline Coated Mesoporous Silica with High Aspect Ratio," *J. Coll. Interface Sci.*, **470**, 237-244(2016).
- Lengalova, A., Pavlinek, B., Saha, P., Stejskal, J. and Quadrat, O., "Electrorheology of Polyaniline-coated Inorganic Particles in Silicone Oil," *J. Coll. Interface Sci.*, **258**, 174-178(2003).
- Kim, Y. D. and Kim, J. H., "Synthesis of Polypyrrole-polycaprolactone Composites by Emulsion Polymerization and the Electrorheological Behavior of their Suspensions," *Colloid Polym. Sci.*, **286**, 631-637(2008).
- Kim, Y. D. and Kim, J. H., "Synthesis of Polypyrrole-SBS Composites and the Particle Size Effect on the Electroheological Properties of Their Suspensions," *Synthetic Metals*, **158**, 479-483(2008).
- Stangroom, J. E., "Basic Considerations in Flowing Electrorheological Fluids," *J. Stat. Phys.*, **64**, 1059-1072(1991).
- Kim, Y. D., "A Surfactant Bridge Model for the Nonlinear Electrorheological Effects of Surfactant Activated ER Suspensions," *J. Coll. Interface Sci.*, **236**, 225-232(2001).
- Klass, D. L. and Martinek, T. W., "Electro-viscous Fluids," *J. Appl. Phys.*, **38**, 67-75(1967).
- Klingenberg, D. J., Swol, F. and Zukoski, C. F., "Small Shear Rate Response of Electrorheological Suspensions I," *J. Chem. Phys.*, **94**, 6160-6169(1991).
- Davis, L. C. and Ginder, J. M., "Electrostatic Forces in Electrorheological Fluids," *Progress in Electrorheology*, ed. by K.O. Havelka and F.E. Filisko, New York, Plenum, 107-111(1995).
- Foulc, J. N., Atten, P. and Felici, N., "Macroscopic Model of Interaction between Particles in an Electrotheological Fluid," *J. Electrostatics*, **33**, 103-112(1994).
- Parthasarathy, M. and Klingenberg, D. J., "Electrorheology: Mechanisms and Models," *Mater. Sci. Eng.*, **R17**, 57-103(1996).
- Kim, Y. D., "Simulation of Bi-dispersed Electrorheological Fluids of Different Particle Sizes by the Extended Maxwell-Wagner Polarization Model," *Korean Chem. Eng. Res.*, **60**, 613-619(2022).
- Kim, Y. D., "Simulation of Electrorheological Fluids by the Extended Maxwell-Wagner Polarization Model with Onsager theory," *Korean Chem. Eng. Res.*, **58**, 480-485(2020).
- Wang, Z., Xuan, S., Jiang, W., and Gong, X., "The Normal Stress of an Electrorheological fluid in Compression Mode," *RSC Advances*, **7**, 25855-25869(2017).
- Marshall, L. and Zukoski, C. F., "Effects of Electric Fields on the Rheology of Non-aqueous Concentrated Suspensions," *J. Chem. Soc.*, **85**, 2785-2795(1989).
- Kim, Y. D., Choi, G. J., Sim, S. J. and Cho, Y. S., "Electrorheological Suspensions of Two Polarizable Particles," *Korean J. Chem. Eng.*, **16**, 338-342(1999).
- Onsagar, L., "Deviation from Ohm's Law in Weak Electrolytes," *J. Chem. Phys.*, **2**, 599-615(1934).

## Authors

**Youngdae Kim:** Professor, School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea; youngdae@jnu.ac.kr