

<연구논문>

## 전기유변 유체의 압착유동에 대한 동적 수치모사

김도훈 · 주상현\* · 안경현\*\* · 이승종

서울대학교 공과대학 응용화학부, 화학공정신기술연구소

\*\*제일모직 화성연구소

(1999년 5월 1일)

### A Dynamic Simulation on the Squeezing Flow of ER Fluids

Do Hoon Kim, Sang-Hyon Chu\*, Kyung Hyun Ahn\*\* and Seung Jong Lee

School of Chemical Engineering and Institute of Chemical Processes, Seoul National University

\*\*R&D Center, Cheil Industries Inc.

\*Currently working at ICASE, NASA Langley Research Center, Hampton, VA 23681-2199, USA

(Received May 1, 1999)

### 요 약

전기유변 유체(electrorheological fluid)는 전기장이 가해지면 아주 짧은 시간에 유변 물성이 급격히 변하며 그 응답이 반복적으로 수행될 수 있는 유체이다. 전기유변 유체는 전기장의 세기에 따라 면찰 응력(shear stress)과 점도의 크기를 조절할 수 있고, 짧은 응답시간은 빠른 제어를 요하는 분야에 효과적으로 이용될 수 있지만, 낮은 항복 응력, 조업 온도 범위의 제한성, 전력 소비에 의한 열적 불안정성, 그 외에도 응집, 침전 등의 단점이 있다. 특히, 이 유체가 갖는 항복 응력의 크기와 그 성질은 실제 장치에 응용하는데 중요한 특성이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 면찰 유동(shear flow)이 아닌 압착 유동(squeezing flow)을 고려하게 되었고, 이 유동 하에서의 전기유변 유체의 거동을 이해하기 위해 본 연구에서는 전기유변 유체의 압착 유동에 대한 동적 수치모사를 수행하였다. 고립된 사슬 구조에 대한 수치모사를 통하여 사슬의 위치와 압착 속도를 변화 시키면서 이에 따른 수력학적 힘과 정전기적 힘의 효과를 예측하였으며, 이를 토대로 많은 사슬을 포함한 현탁액 모델에 대한 수치모사를 수행하였다. 그 결과 실험에서 관찰할 수 있는 수직 응력의 증가와 초기 항복 응력의 존재를 확인하였고, 수직 응력의 효과적인 제어는 수력학적 힘과 정전기적 힘 간의 최적화된 조건에서 얻어질 수 있음을 예측하였다. 이러한 수치모사의 개발을 통해 압착 유동을 이용한 전기유변 유체의 응용에 대한 이론적인 토대를 마련하였고, 향후 보다 깊은 이해를 위한 기반을 구축할 수 있었다.

**Abstract**—Electrorheological(ER) fluid is a material that shows the dramatic change of rheological properties under an electric field and responds reversibly in a few milliseconds. ER fluid's response to an electric field along with its fast switching capability allows ER devices to be precisely controlled. The real application with ER fluid, however, has many limitations to be overcome; temperature fluctuation, moisture, dust, aggregation, precipitation, and low yield stress, for example. The magnitude and the characteristics of yield stress of ER fluid plays an important role in practical applications. In this research, a dynamic simulation on the squeezing flow of the ER fluid was carried out. Numerical simulation on isolated chains was performed to find out the effect of hydrodynamic and electrostatic force depending on the chain location, the squeezing rate, and the chain structure. Suspension model that is composed of a large number of particles was also investigated. The increase of normal stresses as well as the existence of a yield stress at an earlier stage could be observed, and the effective control of the normal stresses could be achieved at an optimal condition of the hydrodynamic force and the electrostatic force.

**Keywords** : Electrorheological fluid, Squeezing flow, Dynamic simulation, Normal stress, Yield stress

### 1. 서 론

1949년 Winslow[1]는 실리카 현탁액에 강한 전기장을 가하면 점도가 빠른 속도로 급격히 증가함을 발견하였다. 이처럼 전기장에 의해 유변 물성이 변하는 현상을 전기유변학적 현상(electrorheological phenomena)이라고 하며 이와 같은 양상을 보이는 유체를 전기유변 유체(electrorheological fluid)라고 한다. 일반적으로 전기유변 유체는 입자가 분산되어 있는 현탁액으로, 그 입자는 전기적으로

중성이며 그 유전 상수는 용매의 것보다 크다. 유체에 전기장을 가하면 입자-용매간 유전상수의 크기 차이로 입자 사이에 강한 정전기력이 발생하고, 이 정전기력에 의해 입자들은 전기장을 따라 정렬된 사슬 구조를 형성하게 된다. 입자 사이의 정전기력과 그에 따른 사슬의 형성은 전기유변 유체의 점도 및 응력을 수 millisecond 내에 증가 시키며, 가한 전기장을 제거하면 전기유변 유체는 원래의 유변 물성을 다시 갖는다. 지금까지의 많은 실험 결과 전기유변 유체는 항복 응력을 갖는 빙햄 소성 유체(Bingham plastic

fluid)의 성질을 보이는 것으로 알려져 있다[2-5].

전기유변 유체는 본질적인 성질에 대한 과학적 흥미 외에도 실제적인 응용에도 큰 잠재력을 가지고 있다. 전기유변 유체는 전기장의 세기에 따라 면찰 응력(shear stress)과 점도의 크기를 조절할 수 있고, 빠른 응답 속도에 의해 제어가 빨리 이루어질 수 있으며, 기계적인 설계나 가공 제작이 훨씬 쉽다는 장점이 있다. 이러한 전기유변 유체의 특성을 이용하면 다양한 분야에 실용화가 가능하다. 예를 들면, 충격 흡수기(shock absorber), 진동 댐퍼(vibration damper), 제동 장치(brake system), 클러치(clutch) 등 자동차, 항공기 기계 부속 장치에 사용할 수 있으며, 이외에도 밸브(valve), 로봇 팔(robot arm), 인공 손(artificial hands) 등에도 널리 응용될 수 있다. 그러나, 이러한 전기유변 유체의 잠재력에도 불구하고, 실제 상용화된 제품이 없는 것은 전기유변 유체의 물성과 메커니즘에 대한 충분한 이해가 아직 이루어지지 않았기 때문이다[6].

전기유변 유체는 Winslow가 처음으로 그 특성을 보고한 후 많은 사람들에게 의해 다양하게 제조되었다. Winslow가 만든 전기유변 유체는 전기유변 유체로서의 특징을 잘 갖추고 있었으나, 장치의 표면과의 마찰이 심하고, 쉽게 방전되며, 입자에 포함된 수분에 의한 부식과 조업 온도 범위의 제한성, 전력 소비에 의한 열적 불안정성 등의 단점이 있어 실제 응용하는 데에는 여러 가지 문제점을 갖고 있었다. 그 후 이러한 단점을 보완한 보다 향상된 전기유변 유체들이 제조되었다. 특히 최근에 와서는 수분이 들어 있지 않은 건조 전기유변 유체에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[7]. 건조 전기유변 유체는 수분이 함유된 전기유변 유체에 비해 보다 넓은 온도 범위에서 사용이 가능하며, 전력소비가 작고, 상대적으로 방전이 쉽게 되지 않아 사용 가능한 전기장의 범위가 비교적 넓다. 또한, 침전 문제와 화학적 안정성도 뛰어나다. 그러나, 건조 전기유변 유체는 제조 비용이 많이 드는 단점을 가지고 있다. 한편, 다양한 응용 장치에 사용하기 위해서 요구되는 전기유변 유체의 물성치들은 각 장치에 따라 결정되기 때문에, 새로운 유체를 제조하는 것과 동시에 유체가 고성능을 발휘할 수 있는 적절한 장치의 설계에 대한 연구가 진행되고 있다. 이러한 장치의 설계에 고려되어야 할 중요한 인자로는 유동 조건, 전기장 형태, 전극 표면, 마모 및 마찰 정도, 열 소산 영향 등이 있다. 특히 유동 조건은 전기유변 유체의 성능을 크게 좌우할 수 있다. 전기유변 유체계에 이용되는 유동 조건으로는 쿠엘유동(couette flow), 프와즈유유동(poiseuille flow), 압착 유동(squeezing flow) 등이 있다. 일반적으로 쿠엘유동 < 프와즈유유동 < 압착 유동의 순으로 전기유변 응력이 증가하며, 압착 유동을 이용하면 쿠엘 유동을 이용한 경우에 비해 3~4배 높은 10~12 kPa의 항복 응력을 얻을 수 있다[8,9]. 이러한 이유로 최근에는 압착 유동을 이용한 장치에 대한 연구와 수치모사가 다

방면으로 진행되고 있다.

지금까지 수행된 전기유변 유체에 대한 많은 수치모사들은 전기유변 현상을 설명하기 위한 보다 적절한 구성 방정식을 개발하는데 기여해왔다. 전기유변 현상의 메커니즘은 이러한 수치모사를 통하여 상당부분 규명될 수 있었다. 수치모사는 현탁액의 거동을 조절하여 물리적인 물성을 조사하고 조업에 있어 최적의 상태를 예측함으로써 실제 전기유변 유체와 관련된 응용 장치의 설계에 매우 큰 영향을 끼쳤다. Bonnecaze와 Brady[10,11]는 무한대의 주기적인 시스템에 대해 동적 수치모사를 행하여, 입자 사이의 수력학적 인력을 비교적 정확히 설명하였으며, dipole 주위의 다면체 정전기적 인력(multibody electrostatic interaction)도 계산하였다. 그러나, 그들의 접근 방법은 비교적 적은 수의 입자를 고려하는데도 계산 시간이 많이 걸려 수치모사의 제한성이 큰 단점이 있다. Adriani와 Gast[12,13]는 진폭이 작고 진동수가 큰 진동 유동(oscillatory flow)에 대한 입자 확률 분포 함수(particle probability distribution function)를 통하여, 주어진 시스템의 탄성 면찰 계수(elastic shear modulus)와 동점도(dynamic viscosity)를 계산하였다. 또한, 탄성 면찰 계수와 동점도의 입자 농도와 전기적 이중극자 간력(electric dipole strength)에 대한 의존성도 살펴보았다. 그러나, 그들은 수력학적 인력과 정전기적 인력을 평균장 이론(mean-field theory)을 이용하여 설명하였기 때문에 고농도의 시스템에는 적합하지 않은 단점이 있다. Klingenberg는 전기적으로 중성이며 그 중심에 point-dipole 이 존재하는 구형의 고체 입자들이 연속적인 비전도성의 뉴튼 유체 내에 분산되어 있는 전기유변 유체에서 각 입자간에 발생하는 정전기력을 계산하여 단분산계와 다분산계의 전기유변 유체에 대한 동적 수치모사를 행한 바 있다[14-17]. 이 수치모사는 간단하게 입자에 대한 수력학적 힘으로 스톡스 항력(stokes drag)만을 고려하였으면서도, 전기장 하에서의 사슬 형성과 그에 따른 유변 물성의 급격한 변화를 성공적으로 예측하였다. 또한 많은 수의 입자를 고려할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 가정상 상태(pseudosteady state)에 의해 전개되는 압착 유동장 내에서 전기유변 유체계에 대한 동적 수치모사를 수행하였다. Klingenberg에 의해 제안된 수치모사 기법을 사용하여, 다양한 수력학적 영향과 현탁액의 구조적 성질에 의한 전기유변 유체의 거동을 연구하였다. 미시적인 구조 변화를 모사하였고, 그 결과 나타나는 수직 응력과 면찰 응력을 계산하였다. 이러한 미시적인 변화와 연관지어 거시 구조의 응력과 점도의 변화를 함께 고찰하였다. 먼저 단일 사슬과 복합 사슬로 이루어진 고립된 사슬 구조에 대한 수치모사를 통하여 사슬의 위치와 압착 속도, 그리고 사슬 구조에 따른 수력학적 힘과 정전기적 힘의 효과를 예측하였으며, 이를 토대로 많은 사슬을 포함한 현탁액 모델을 고려하여 이웃한 사슬들간의 상호작용

이 수력학적 힘과 정전기적 힘에 어떻게 반응하는지를 아울러 고찰하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 전기유변 유체계의 동적 수치모사

입자간에 작용하는 정전기적 상호작용력  $F_{ij}^{el}(R_{ij}, \theta_{ij})$ 는 입자  $i$ 가 구형 좌표계의 중심에 있을 때  $(R_{ij}, \theta_{ij})$ 에 위치한 입자  $j$ 가 입자  $i$ 에 주는 정전기력으로 일정한 전기장  $E_0$ 이 가해졌을 때 다음과 같이 계산된다.

$$F_{ij}^{el} = F_0 \left( \frac{\sigma}{R_{ij}} \right)^4 [(3 \cos^2 \theta_{ij} - 1) e_r + (\sin 2\theta_{ij}) e_\theta] \quad (1)$$

여기서  $F_0 = \frac{3}{16} \pi \epsilon_0 \epsilon_c \sigma^2 \beta^2 E_0^2$ ,  $\beta = \frac{\alpha - 1}{\alpha + 2}$ ,  $\alpha = \frac{\epsilon_p}{\epsilon_c}$ 로 정의된다.  $\epsilon_p$ 와  $\epsilon_c$ 는 각각 입자와 연속상 유체의 유전 상수이고,  $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$  F/m이며,  $\sigma$ 는 입자의 반지름이다.

한편, 입자와 전극의 상호작용은 입자와 현탁액 내의 모든 입자들의 전극에 대한 이미지(image)와의 상호작용으로 고려한다.

입자에 유동이 가해지면 입자와 유체의 속도차에 비례하는 항력(drag)을 받는다고 가정하여, 수력학적 저항(hydrodynamic resistance)을 스톡스 법칙(stokes' law)에 의해 다음과 같이 나타낸다.

$$F_i^{hyd} = -3\pi\eta_c\sigma \left( \frac{dR_i}{dt} - u^\infty(R_i) \right) \quad (2)$$

여기서,  $u^\infty(R_i)$ 는 입자  $i$ 가 받는 유동을 뜻한다.

유체의 열 운동(thermal motion)에 의해 입자는 브라운 힘(Brownian force)을 받는다. 그러나, 전기유변 유체의 입자의 크기는 상대적으로 크기 때문에 브라운 힘의 효과는 무시할 수 있다. 입자간의 겹침을 방지하기 위하여  $R_{ij}$  만큼 떨어져 있는 입자  $j$ 에 의해 입자  $i$ 가 받는 반발력은,

$$F_{ij}^{rep} = F_0 \exp \left[ -\frac{(R_{ij} - R_m)}{0.01R_m} \right] (-e_r) \quad (3)$$

와 같이 주어지며, 근거리 반발력까지 고려한 입자  $i$ 에 대한 완성된 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m_i \frac{d^2 R_i}{dt^2} = \sum_{j \neq i} F_{ij}^{el} + \sum_j F_{ij}^{el} + \sum_{j \neq i} F_{ij}^{rep} + \sum_{j \neq i} F_i^{hyd} \quad (4)$$

여기서 우변의 두번째 항의 프라임(')은 자신을 포함하여 입자  $i$ 가 입자  $j$ 의 이미지와의 인력을 포함한다고 의미이고, 세번째 항의 프라임(')은 입자와 전극에 의한 반발력을 포함한다는 의미이다. 동적 수치모사에서는 이 식을 무차원화하여 각 입자간의 상호작용과 연속상의 유동 조건을 고려하여 계산하였다.

본 연구에서는 원판 형태의 두 전극 사이에 전기유변 유

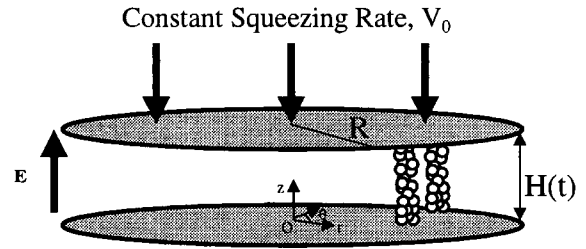


Fig. 1. Schematic view of squeezed ER fluid in cylindrical coordinate.

체를 넣고 윗 전극판에 일정한 속도를 가해 유체에 압착 유동을 주었다. 압착 유동에 적절한 원주 좌표계를 설정하였으며 각 방향벡터를 Fig. 1에 도시하였다.

면찰 유동의 경우와 달리 압착 유동에서는 전기유변 유체계에 일정한 전압을 가하더라도 전극 간격이 시간에 따라 변하고, 따라서, 전기장의 세기는 변하게 되므로 그 영향을 고려하였다. 그 이유는 전기장의 크기가 입자간 상호작용력에 중요한 영향을 미치며, 이에 따라 각 사슬들의 미세 구조와 전체적인 정전기적 응력에도 많은 영향을 주기 때문이다.

한편, 압착의 정도를 나타내기 위하여 초기 전극 간격  $H_0$ 에 대하여 전극이 이동한 거리의 비를 변형률(strain)  $\gamma$ 로 다음과 같이 정의하였다[8].

$$\gamma = \frac{(H_0 - H)}{H_0} \quad (5)$$

연속상의 유동장으로는 가정상상태에서의 뉴턴 유체에 대한 속도장을 사용하였으며 그 식은 원주 좌표계에서 다음과 같다[18].

$$v_r = \frac{3rzV(t)}{H^2(t)} \left[ 1 - \frac{z}{H(t)} \right] \quad (6)$$

$$v_z = -3V(t) \left[ \frac{z}{H(t)} \right]^2 \left[ 1 - \frac{2z}{3H(t)} \right] \quad (7)$$

여기서  $V(t)$ 는 윗 전극판의 속도,  $H(t)$ 는 전극판 사이의 간격이다.

이와 같이 완성된 각 입자에 대한 운동 방정식을 풀면 압착이 진행됨에 따라 각 입자의 위치와 전기유변 물성으로서의 정전기적 응력을 계산할 수 있는데 전극판에 대하여 수직 방향의  $\langle \tau_{zz} \rangle$ 와 접선 방향의  $\langle \tau_{rz} \rangle$ 는 다음식에 의해 계산하였다.

$$\langle \tau_{zz} \rangle = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N z_i f_{zi} \quad (8)$$

$$\langle \tau_{rz} \rangle = -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^N z_i f_{ri} \quad (9)$$

여기서  $V$ 는 전기유변 유체계의 부피,  $N$ 은 입자수,  $f_n$ 은 입자가 받는 각 방향의 정전기력이다.

2.2. 수치모사 기법

전기유변 유체의 압착 유동에 대한 3차원 수치모사는 다음과 같이 수행되었다 : Fig. 1에서와 같이 초기 전극 간격  $H_0$ , 반지름  $R$ 인 두 디스크 전극 사이에 지름  $\sigma$ 인  $N$ 개의 입자를 분산시켰다. 그리고, 두 전극 사이에 유동이 없는 상태에서 일정한 전압만을 주어 배열이 정상 상태에 도달하도록 하였다. 정상 상태에 도달하여 정전기적인 평형에 이르면, 일정한 압착 유동 속도로 압축을 시작하여 이에 따른 수직 응력의 크기를 매 단계마다 계산하였다. 이 때에는 유동장과 전기장에 따라 변하는 입자들의 위치와 전기장의 세기를 고려하였다.

입자의 움직임은 앞의 식 (4)를 무차원화하여 결정하였으며, 이것은 무차원화된 시간 간격  $\Delta t^*(=\Delta t/t_0)$ 에 대해 오일러 기법(Euler's method)을 사용하여 수치적으로 적분하였다. 시간 간격은 수치모사 결과가 무차원화된 시간 간격에 독립적이어야한다는 조건 하에 결정하였다. 본 연구에서의 시간 간격은 0.0001에서 0.001의 범위에서 결정하였으며, 또한 디스크 전극의 표면에서 고정경계(no-slip) 조건을 만족하기 위해서 무차원 거리  $\delta_{wall}^*$ 을 가정하여, 이 범위 내에서는 입자가 고정되어 전극 표면을 따라 움직이지 못하게 하였다. 입자간력은 cut-off 반지름  $r_c^*(=5.0)$  내에서 오직 한쌍으로만 고려하였다[14-17]. 따라서, 압착 과정에서 두 전극 사이의 간격이 줄어들더라도 cut-off 반지름은 5.0으로 고정시켰다. 이러한 일정한 cut-off 반지름은 전극 간격이 줄어들에 따라 더 많은 이웃한 입자와 그들의 이미지를 고려해야 하기 때문에 더 많은 계산 시간을 필요로 하였다.

윗판은 일정한 속도로 압착하였다. 압착 유동에서는 압착의 정도에 따라 전기장  $E(t)$ 가 변하는데 비해 무차원 시간 간격  $\Delta t^*$ 은 고정되어 있기 때문에, 이를 고려하여 무차원화된 윗판의 압착 거리  $\Delta z^*$ 를 결정하였다. 각 순간의 압착 속도는 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_c \beta^2 E^2(t) \Delta z^*(t)}{16 \eta_c \Delta t^*} \tag{10}$$

여기서, 무차원 압착 거리  $\Delta z^*$ 는 전기장이 증가하는 가운데 압착 속도를 일정하게 유지하기 위해서 감소되도록 하였다.

수치모사에 사용된 물성은 Klingenberg에 의해 제시된 것을 사용하였으며, 이를 Table 1에 나타내었다[14].

Table 1. List of quantitative properties used in this simulation

GEOMETRICAL PROPERTIES AND ELECTRICAL CONDITIONS	
Electrode diameter	D=50 mm
Initial gap distance	$H_0=1.0$ mm
Squeezing rate	$V_0=0.1, 1.0$ mm/sec
Applied voltage	V=1.0 kV
PARTICLE PROPERTIES	
Diameter	$\sigma=100$ $\mu$ m
Dielectric constant	$\epsilon_p=23.4$
CONTINUOUS PHASE PROPERTIES	
Viscosity	$\eta_c=0.01$ Pa · sec
Dielectric constant	$\epsilon_c=7.3$

전기유변 유체는 전기장 하에서 여러 가지 형태의 사슬 구조를 형성한다. Fig. 2에 나타난 바와 같은 단일 사슬 구조는 광학적인 증명에 의해 결정된 여러 가지 구조 중에서 간단하면서 전형적인 사슬 구조이다. 이것은 낮은 부피 분율을 갖는 분산계에서 흔히 보여진다. 본 수치모사에서는 10개의 입자로 구성된 단일 사슬 구조를 택하였으며, 이것은 유동이 없는 상태에서 평형상태에 도달한 것으로 가정하였다. 그리고, 여기에 일정한 속도의 압착 유동을 부과하여 그 결과를 고찰하였다.

단일 사슬 구조를 전극판의 중심으로부터  $r=10$  mm에 놓고, 각각 0.1, 1.0 mm/sec의 일정한 속도로 압착 유동을 가하였다. 그 결과, 수직 응력과 면찰 응력에 따른 단일 사슬의 변형에 의한 각 입자들의 거동에 대한 동적 데이터를 얻었으며, 이로부터 수력학적 힘과 전기장에 의한 힘의 효과를 조사하였다. 압착이 시작되면, 사슬 구조는 반경 방향과 축 방향의 유동을 동시에 받게 되며, 사슬이 전극판의 중심으로부터 떨어져있을수록 반경 방향의 유동 속도가 증가하여 항력의 영향을 크게 받게 된다. 이 때 압착 유동 속도  $V_0$ 의 증가는 식 (6)과 (7)에 따라 반경 방향과

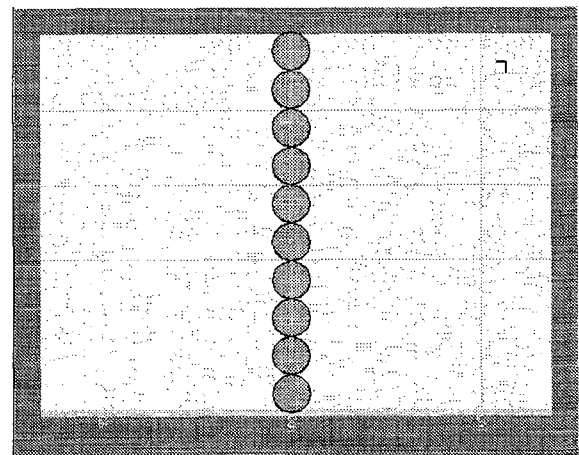


Fig. 2. Initial configuration of a single chain at  $r=10$  mm in cylindrical coordinate.

3 결 과

3.1. 단일 사슬 구조

축 방향 유동의 증가를 의미한다. 사슬 구조의 변형은 사슬의 위치와 압착 유동 속도에 의존하며, 이러한 요소들은 서로 다른 형태의 응력을 생성하게 된다.

Fig. 3에 전극판의 중심에서 10 mm 떨어진 곳에 위치한 단일 사슬 구조에 0.1 mm/sec의 일정한 압착 유동을 주었을 때의 응력 곡선을 나타내었다. 여기서, 음의 부호를 갖는 것은 압착의 진행방향을 양의 방향으로 가정하였기 때문이다. 압착이 진행됨에 따라 증가된 전기장이 입자간 정전기력의 증가를 유발시켰으며, 그 결과 입자들의 인력이 점차 강해져서 압착의 진행에 따른 수력학적 힘에 저항하게 됨으로써, 수직 응력이 점차적으로 증가하게 되었다. 게다가 수치모사에서 확인된 응력의 피크(peak)은 이전에 행해진 실험에서 수직 응력의 진동으로 관찰되었다 [19]. 진동의 원인은 사슬의 안정성의 연속적인 변이에 의해 발생한 것으로 예측하였다. 이러한 예측의 타당성은 각 단계에서의 배열 모습을 관찰함으로써 확인할 수 있었다. Fig. 4에는 Fig. 3에 표시된 (a)에서 (f)까지의 변형률에서의 배열의 순간적인 모습을 보여주었다. Strain=0.21 (a)일 때, 수직 응력은 최대값을 보이고, 입자 하나가 압착에 의해 이동되어 strain=0.32 (b)에서 최소값을 나타냈다. 이와 같이 구조의 변형에 의해 수직 응력은 최대와 최소를 반복적으로 나타내지만, 그 크기가 매우 작아 수직 응력에 비해 무시할 수 있는 정도였다. 동일한 위치( $r=10$  mm)에서 압착 속도를 1.0 mm/sec로 증가시켜 Fig. 5에서의 같은 응력 곡선을 얻었다. 여기서 수직 응력 곡선을 압착 속도가 0.1 mm/sec의 경우와 비교하면, 초기에는 보다 작은 수의 피크가 나타나다가 압착이 진행되어 감에 따라 보다

큰 피크를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 원인은 보다 큰 유동이 부여된 결과 사슬의 축 방향의 변형에 비해 반경 방향의 변형이 보다 지배적이 되어, 초기에는 전극판에 붙은 입자가 끊어져서 반경 방향의 유동을 따라 흘러감에 따라 작은 피크를 보이다가 단절된 사슬이 압착되는 전극판에 달라붙어 저항함으로써 보다 큰 반발력을 보이는 것으로 예측하였다. 한편, 입자의 초기위치를 20 mm로 변화시켜, 1.0 mm/sec의 같은 압착 속도로 압착하여, 이를 배열

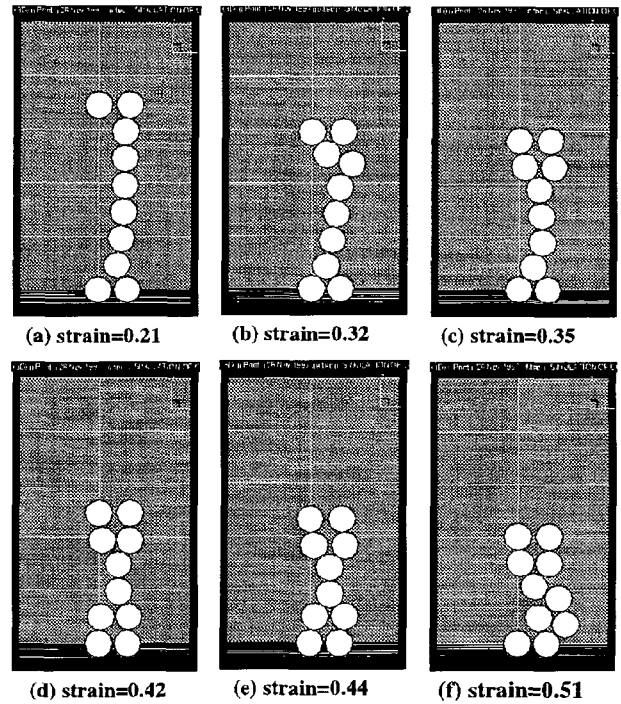


Fig. 4. Snapshots of deformed chains at strains illustrated in Fig. 3 (from(a) to (f)).

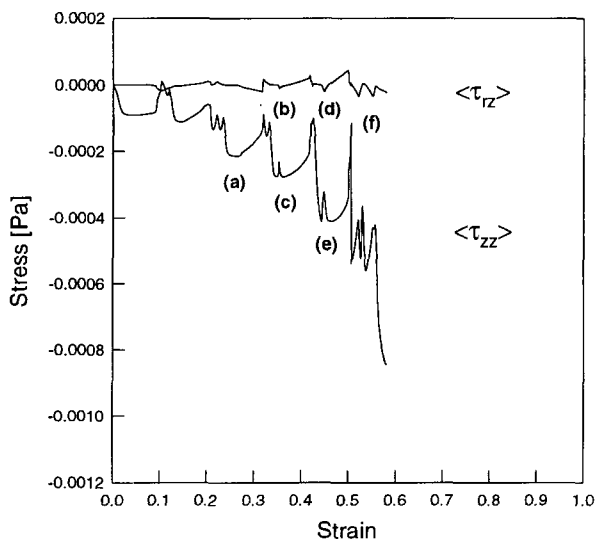


Fig. 3. Normal and shear stresses of a single chain at  $r=10$  mm in cylindrical coordinate. Squeezing rate is 0.1 mm/sec; strain =0.21(a), strain=0.32(b), strain=0.35(c), strain=0.42(d), strain=0.44(e), strain=0.51(f).

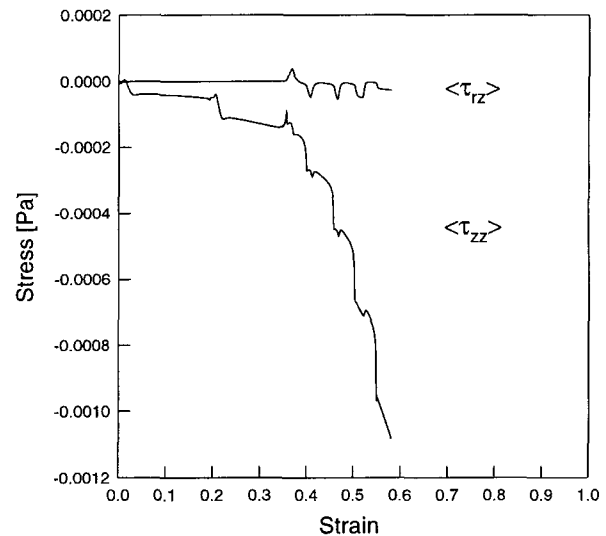


Fig. 5. Normal and shear stresses of a single chain at  $r=10$  mm in cylindrical coordinate. Squeezing rate is 1.0 mm/sec.

의 변형과 함께 고찰해봄으로써 그 원인을 예측할 수 있다. 이 경우 전극판의 중심으로부터 멀어짐으로 해서 반경 방향의 유동에 의한 항력이 더욱 커져서, 단절된 사슬 부분이 앞의 경우처럼 전극 표면에 다시 달라붙어 압축에 저항하지 못하고 그냥 흘러감에 따라 수직 응력은 보다 작은 값을 가졌음을 확인하였다.

3.2. 복합 사슬 구조

입자의 부피 분율이 상대적으로 커질 경우 사슬 간의 인력에 의해 응집체(aggregate)가 형성되는 것은 광학 실험에 의해 쉽게 관찰되었다. 이러한 응집체의 효과를 보기 위해 다음과 같은 복합 사슬 구조를 제시하였다. 복합 사슬은 46개의 입자들로 이루어졌으며 압착이 시작되기 전 정전기적 평형에 도달하였다고 가정하였다. 하나의 복합 사슬을  $r=10$  mm인 곳에 위치시키고, 0.1 mm/sec와 1.0 mm/sec의 일정한 속도로 압축하였다. 각각의 경우에 대한 응력 곡선을 다음의 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

복합 사슬은 단일 사슬에 비해 훨씬 더 복잡한 변화를 겪으며, 결과적으로 불규칙하고 높은 빈도의 응력 피익을 보였다. 두 결과 그래프를 각각의 속도에 해당하는 단일 사슬의 경우와 비교해 보면, 복합 사슬 구조가 보다 더 큰 수직 응력을 보여주지만, 그러나 이 때문에 복합 사슬이 단일 사슬에 비해 수직 응력의 전개가 보다 더 크다고 말할 수는 없었다. 이것은 단순히 복합 사슬 구조가 단일 사슬 구조보다 많은 입자를 포함하기 때문에 생긴 현상이며, 같은 수의 입자를 가진 5개의 단일 사슬 구조를 사용한 수치모사에서 복합 사슬에서보다 더 큰 수직 응력을 얻음으로 해서 간단히 확인하였다. 이를 또한 배열의 변형으로 살펴보았다. 초기에 정전기적 평

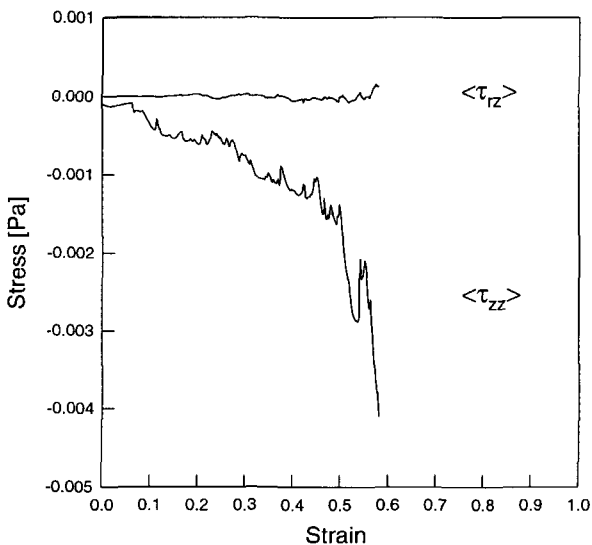


Fig. 6. Normal and shear stresses of a multiple chain at  $r=10$  mm in cylindrical coordinate. Squeezing rate is 0.1 mm/sec.

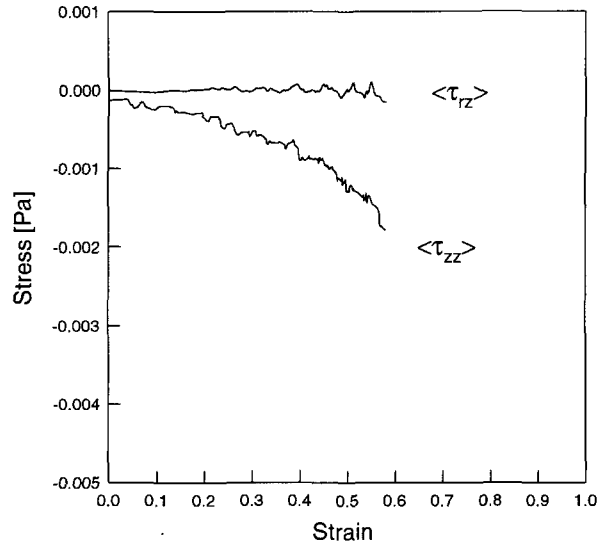


Fig. 7. Normal and shear stresses of a multiple chain at  $r=10$  mm in cylindrical coordinate. Squeezing rate is 1.0 mm/sec.

형에 도달한 여러 개의 단일 사슬의 경우 반경 방향으로 접촉한 사슬이 없는 반면, 복합 사슬의 경우에는 바로 여러 개의 입자와 접촉하여 전기장 방향으로 늘어서 있었다. 여기에 유동장이 부여되어 변형이 가해지면, 사슬 구조는 보다 낮은 에너지 상태를 유지하기 위해 배열의 변화를 겪게 되는데, 복합 사슬은 접촉한 입자와 즉각적으로 반응하여 불안정한 상태가 되기 때문에 유동에 의해 쉽게 이동하여 큰 수직 응력을 보여주지 못함을 아울러 확인하였다. 따라서, 단일 사슬 구조가 복합 사슬 구조에 비해 보다 큰 수직 응력을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

일반적으로 복합 사슬 구조의 구조 변형과 수직 응력에 대한 사슬의 위치와 압착 속도 효과는 앞서 언급한 단일 사슬의 경우와 유사했다. 같은 위치( $r=10$  mm)에 있는 복합 사슬의 경우 압착 속도가 클 때, 사슬은 보다 큰 항력을 받으며, 전극판에 붙은 입자의 단절에 의해 형성되는 응집체는 연속상을 따라 흘러가서 끊어진 사슬이 압축에 저항하지 못함으로 해서 수직 응력은 감소하였다. 한편, 위치를 변화시킨 수치모사의 경우  $r=0.5$  mm와 20 mm 때의 수직 응력이 모두  $r=10$  mm 일 때보다 작은 값을 보였다. 이와 같은 결과들로부터 수직 응력의 효과적인 증대는 수력학적 힘과 정전기적 힘에 대한 최적화된 조건에서 얻어질 수 있음을 확인할 수 있었다.

3.3. 현탁 모델

실제의 전기유변 유체는 매우 많은 수의 입자들로 구성되어 있다. 이 입자들은 전기장 하에서 많은 사슬을 형성하고, 외부 유동이 가해지면, 입자 사슬은 초기 내부 에너지를 유지하기 위해 변형되거나 움직이게 된다. 결과적으

로 모든 사슬은 주위 사슬에 영향을 주고, 동시에 영향을 받게 된다. 이러한 입자 사슬 간에 작용하는 힘을 고려하는 것은 전형적인 전기유변 유체 거동을 모사하는데 매우 중요한 역할을 한다. 현탁 모델은 이러한 사슬 간력에 대한 거시적인 조사를 통해 구조 배열의 거대 변형에 의한 응력의 변화를 설명할 수 있는 원인을 제공한다. 이와같이, 동적 수치모사에서 입자간력에 보다 많은 입자를 도입하는 것은 더욱 더 사실적인 유체 거동을 예측하는데 필수불가결하다. 따라서, 유체 내 입자의 부피 분율이 커질수록 입자 수  $N$ 은 매우 중요해진다.

3.3.1. POC 법

만약 관할 부피  $V_0$ 를 모두 사슬로 채우고자 의도할 경우, 매우 많은 양의 입자가 필요할뿐더러, 막대한 량의 계산 수행을 요구함으로써, 실제 계산을 불가능하게 만든다. 따라서, 이러한 제약을 해결하기 위한 한 방법으로서 "Piece-of-Cake (POC)" 법을 제안하였다. 이 공간은 실제 전극 사이 전체 공간의 일부분으로서, 훨씬 적은 수의 입자로도 모사를 가능케 하며, 그 개략도를 Fig. 8에 나타내었다. 이러한 가정이 타당한 근거는 압착 유동에는  $\theta$ -방향의 유동이 없고, 반경  $r$ -방향과 축 방향으로의 유동만이 존재하기 때문이며, 동시에 이웃한 입자 사슬의 영향으로 현탁 모델에서의 사슬은 고립된 사슬 구조가 보이는 것과 같은 급격한 움직임은 보일 수 없기 때문이다.

그러나, POC 법은 양쪽 경계를 대칭(symmetry)로 가정하였기 때문에  $\theta$ -방향과  $r$ -방향의 경계 조건 의존성이 문제가 될 소지가 있다. 따라서 이를 고려하여 수치모사를 수행하였다. 첫번째로,  $\theta$ -방향의 의존성을 알아보기 위해서 중심각  $\theta_c$ 를 각각  $\pi/16, 2\pi/16, 3\pi/16$ 로 확장하고 각각의 부피 분율이 0.05를 만족하도록 입자 수를 233, 467, 700로 증가시켰으며, 나머지 조건은 반지름  $R_{poc}=5.0$  mm, 높이  $H_{poc}=1.0$  mm, 전압  $V=1.0$  kV, 그리고 압착 속도  $V_0=1.0$  mm/sec로 일정하게 하였다. 두 번째로  $r$ -방향의 의존성을 알아보기 위해서, 두가지 다른 형태의 POC-형태를 가정하였다.  $\theta_c$ 는  $\pi/16$ 로 일정하며, 반지름  $R_{poc}$ 는 5.0 mm와 10.0 mm로 달리 주었으며, 나머지 조건은 다음과 같다:  $H_{poc}=1.0$  mm, 전압  $V=1.0$  kV, 그리고 압착 속도  $V_0=0.1$  mm/sec. 입자 수는 각각 233, 936이며 이것 역시 부피 분율을 0.05로 맞추었다. 두 경우 모두 불규칙하게 입

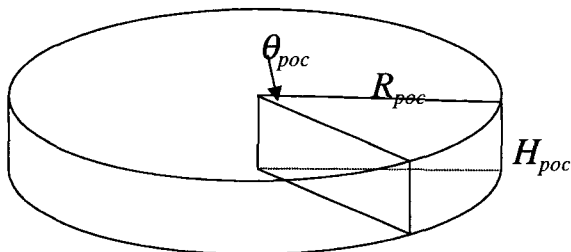


Fig. 8. Schematic view of a "Piece-of-Cake" space.

자를 배열한 후 전기장을 걸어주어 평형에 도달하게 하였다. 그리고, 여기에 압착 유동을 부여하여 그 응력의 변화를 모사하였다. 각각의 결과를 다음의 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 이로부터 수직 응력 피입의 위치와 그 크기가 각각의 경우에 크게 차이가 나지 않음을 확인하였다. 곧,  $\theta$ -방향과  $r$ -방향의 의존성이 없음을 알 수 있었다. 따라서, POC 법이 비록 전체 전극판의 일부 영역에 대한 수치모사 기법이지만, 그 결과는 상대적으로 전체 공간의 특성을 잘 표현했다고 말할 수 있다.

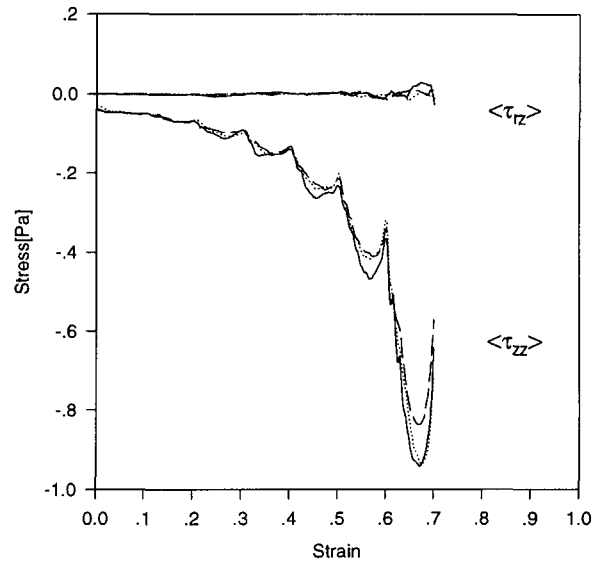


Fig. 9. Normal and shear stresses of a suspension with 233(—), 467(- -) and 700(· · ·) monodisperse particles. Squeezing rate is 1.0 mm /sec.

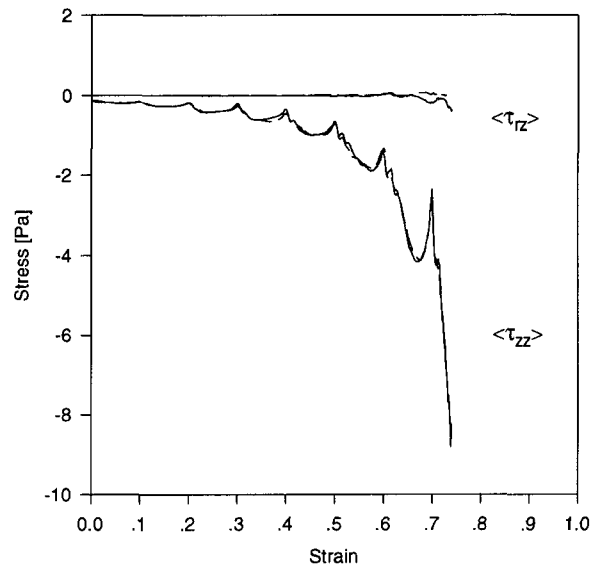


Fig. 10. Normal and shear stresses of a suspension with 233(—) and 936(- -) monodisperse particles. Squeezing rate is 0.1 mm /sec.

3.3.2. 정형 현탁액(Regular suspension)과 비정형 현탁액(Random suspension)의 효과

POC 법을 이용하여 정형 배열과 비정형 배열의 현탁액 모델에 대한 수치모사를 수행하였다. 먼저, 96개의 단일 사슬을 반지름 4.5 mm, 중심각  $2\pi/16$ , 전극간격  $H_{poc}=1.0\text{mm}$ 의 POC공간에 r-방향으로 정형적으로 배열하였다. 각각의 사슬은 10개의 입자로 구성되었으며, 이러한 초기 배열은 유동장의 부여없이 정전기적 평형에 도달한 후에 얻어졌다. 1.0 mm/sec의 압착 속도로 압착하였으며, 이로부터 얻어진 Fig. 11의 응력 곡선은 고립된 사슬의 그것과 유사함을 알 수 있었다. 면찰 응력은 수직 응력에 비해 그 값이 매우 작았으며, 수직 응력은 초기에 오버슈트(overshoot)과 같은 작은 파익을 보이며 점차 완화된 진동을 보이며 증가했다. 이러한 오버슈트와 응력의 증가형태, 수직 응력의 진동은 실험에서도 관찰되었다[19]. 큰 파익은 앞서 언급한 바와 같이 구조 배열에 에너지의 변화를 이끄는 큰 변형이 일어남을 예측하게 하였다. 이러한 정형 배열과 유사하게 비정형 배열은 반지름 5 mm, 중심각  $2\pi/16$ , 전극간격  $H_{poc}=1.0$  mm의 POC공간에 934개의 입자를 불규칙하게 배열하였다. 입자 부피 분율은 0.10였으며, 1.0 kV/mm의 전기장을 부여하여 평형 상태에 도달하게 하였다. 그 배열 구조는 96개의 단일 사슬로 구성된 정형 배열에 비해, 여러 개의 단일 사슬 뿐만 아니라, 여러 단일 사슬이 접촉한 복합 사슬 구조를 포함한다는 것을 확인하였다. 평형에 도달한 후 1.0 mm/sec의 일정한 속도로 압착을 가하면, 사슬들은 축 방향과 반경 방향으로 변형되며, 각각의 입자는 정전기적으로 활성화되어 응집체를 형성하고, 거시 구조는 유동이 약한 중심에서 더 큰 변화를 보임을 확인하였다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 비정형 배열에서도 수직 응력은 확연히 드러나며, 항복 응력이 압착 초기에 오버슈트 없

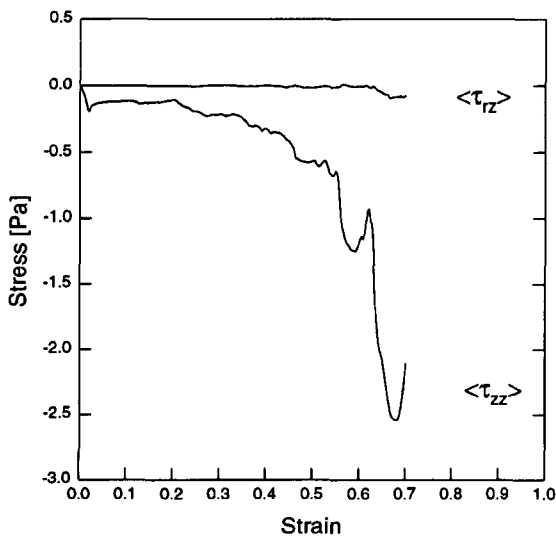


Fig. 11. Normal and shear stresses of a regular suspension arranged in the r-direction (N=960). Squeezing rate is 1.0 mm/sec.

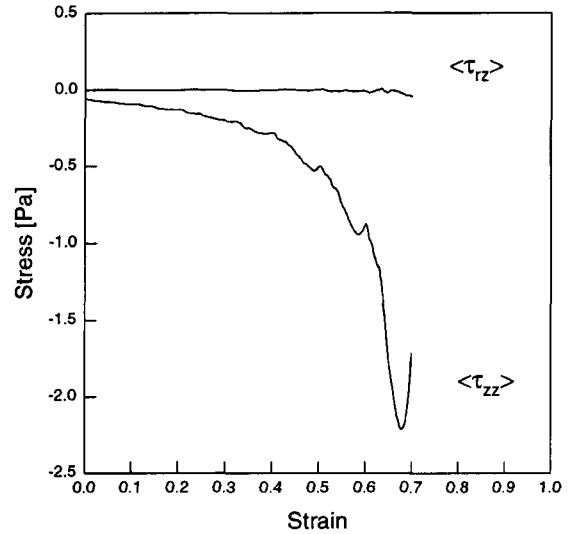


Fig. 12. Normal and shear stresses of a random suspension with 934 monodisperse particles. Squeezing rate is 1.0 mm/sec.

이 나타나고, 그 크기는 정형 배열에 비해서 작음을 알 수 있었다. 이렇게 비정형 배열 구조에서 오버슈트와 응력 진동을 보기 어려운 것은 여러 형태의 사슬들의 상호 겹침 효과에 의해 진동이 완화되었기 때문이며, 정형 배열의 수직 응력이 보다 큰 것은 고립된 사슬의 경우처럼 단일 사슬이 압착에 더 큰 저항력을 가지기 때문임을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 정전기적으로 평형에 있는 전기유변 유체에 압착 유동을 부과함으로써 야기되는 수력학적 유동의 영향을 고려하였다. 단일 사슬이나 복합사슬과 같은 고립된 사슬 구조에서는 입자배열이 안정한 상태에서 불안정한 상태로, 또는 그 반대의 전이에 의해 수직 응력이 작은 파익 보이며 증가했다. 본 수치 모사를 통해서, 더 큰 항복 응력을 얻기 위해서는 복합 사슬 구조보다는 단일 사슬 구조가 유리함을 확인하였다. 또한 현탁액 모델을 통해서 이웃한 사슬 간의 상호작용을 고려해보았으며, 계산 용량을 줄이기 위해 "Piece-of-Cake(POC)" 법을 제안하였다. POC법을 통해 비교적 많은 수의 입자를 고려할 수 있었으며, 그 결과 항복 응력의 존재, 초기에 나타나는 오버슈트, 그리고 압착에 따른 수직 응력의 증가를 확인하였다. 또한 입자의 초기 분포 상태를 정형 배열과 비정형 배열로 나누어 모사함으로써, 보다 효과적인 수직 응력의 증대와 응력 진동의 제어는 수력학적 힘과 정전기적 힘간의 최적화된 조건에서 얻어질 수 있음을 예측하였다.

본 수치모사를 통해서 압착 유동을 이용한 전기유변 유체의 응용에 대한 이론적인 토대를 마련하였으며, 향후 보다 깊은 이해를 위한 기반을 구축할 수 있었다. 이를 바탕으로 실제 전기유변 유체의 거동에 보다 가까운 모사를 위



해 더 많은 수의 입자를 고려하고, 그에 따른 계산량의 제한성을 극복하기 위한 병렬처리 기법의 도입이 필요할 것으로 예상된다. 아울러 다분산계의 압착 유동에 대한 연구가 수반되어야 할 것이다.

## 사용기호

### ALPHABETIC SYMBOLS

$E$	applied electric field, kV/mm
$e_q$	unit vector in the direction of $\theta$
$e_r$	unit vector in the direction of $r$
$e_z$	unit vector in the direction of $z$
$F_{ij}^{el}$	electrostatic force between sphere $i$ and sphere $j$ and the electrode surface, N
$F_{ij}^{rep}$	repulsive force on particle $i$ due to particle $j$ and the electrode surface, N
$F_i^{hyd}$	hydrodynamic force applied to particle $i$ in a medium fluid, N
$F_0$	$\frac{3}{16}\pi\epsilon_c\epsilon_p\beta^2E^2$ in equation (1), N
$H$	gap separation, m
$H_0$	initial gap separation, m
$H_{poc}$	height of POC-shaped space, mm
$m_i$	mass of particle $i$ , kg
$N$	number of particles
$r_c^*$	cutoff radius
$R$	electrode radius, m
$R_{ij}$	distance between particle $i$ and $j$ in spherical coordinates, m
$R_m$	mean diameter, m
$R_{poc}$	radius of POC-shaped space, mm
$t_s$	characteristic time, sec
$\Delta t^*$	dimensionless time step
$v_r$	velocity field applied to a suspension in the direction of $r$ , m/sec
$v_z$	velocity field applied to a suspension in the direction of $z$ , m/sec
$V$	applied voltage, kV
$V_0$	squeezing rate, m/sec
$\Delta z^*$	dimensionless squeezing distance

### GREEK SYMBOLS

$\alpha$	ratio of the dielectric constant of the particles to that of the continuous phase
$\beta$	dielectric mismatch
$\gamma$	strain
$\delta_{wall}^*$	dimensionless length of no slip boundary condition
$\epsilon_c$	dielectric constant of the base fluid
$\epsilon_p$	dielectric constant of the particle

$\epsilon_0$	permittivity of vacuum ( $=8.8542 \times 10^{-12}$ ), F/m
$\theta_{ij}$	angle between particle $i$ and $j$ in spherical coordinates, radian
$\theta_{poc}$	angle of POC-shaped space, radian
$\eta_c$	viscosity of the base fluid, Pa · sec
$\sigma_i$	diameter of particle $i$ , m
$\langle \tau_{rz} \rangle$	shear stress of the component $rz$ , Pa
$\langle \tau_{zz} \rangle$	averaged normal stress against the squeezing force, Pa

## 참고문헌

1. W.M. Winslow, "Induced fibrillation of suspensions", *J. Appl. Phys.*, **20**, 1137, (1949).
2. D.L. Klass and T.W. Martinek, "Electroviscous fluids I. Rheological properties", *J. Appl. Phys.*, **38**, 67 (1967a).
3. H. Conrad and A.F. Sprecher, "Characteristics and Mechanisms of Electro-rheological Fluids", *J. Stat. Phys.*, **64**, 1073 (1991).
4. Z.P. Schulman, E.V. Korobko and Yu.G. Yanovskii, "The mechanism of the viscoelastic behaviour of Electro-rheological suspensions", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, **33**, 181(1989).
5. 황인석, 주상현, 이승중, "실리카 현탁액의 전기유변학적 연구", *유변학*, 제6권, 제1호, 49 (1994).
6. Department of Energy, Electrorheological (ER) Fluids, (U.S. Government Printing Office, 1993).
7. H. Block and J.P.Kelly, "Electro-rheology", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **21**, 1661 (1988a).
8. J.L. Sproston, R. Stanway and A. Faghmous, "The electro-rheological effect and its industrial application", *Rev. Gen. Electr., Sept.*, 21 (1991).
9. D.A. Brooks, "Selection of Commercial Electro-rheological Device" proceedings of the International Conference on Electrorheological Fluids, 643 (1993).
10. R.T. Bonnecaze and J.F. Brady, "Dynamic simulation of an electrorheological fluids", *J. Chem. Phys.*, 2183 (1992a).
11. R.T. Bonnecaze and J.F.Brady, "Yield stresses in electro-rheological fluids" *J. Rheol.*, **36**, 73 (1992b).
12. P.M. Adriani, "Aggregation of colloidal suspension in external fields", Ph.D. Thesis, Stanford University (1990).
13. P.M. Adriani and A.P.Gast, "A microscopic model of electrorheology", *Phys. Fluids*, **31**, 2757 (1988).
14. D.J. Klingenberg, F. van Swol and C.F. Zukoski, "The small shear rate response of electrorheological suspensions. I. Simulation in the point-dipole limit", *J. Chem. Phys.*, **94**, 6160 (1991a).
15. D.J. Klingenberg, F. van Swol and C.F. Zukoski, "The small shear rate response of electrorheological suspensions. II. Extension beyond the point-dipole limit", *J. Chem. Phys.*, **94**, 6170 (1991b).
16. D.J. Klingenberg, "Simulation of the dynamic oscillatory response of electro-rheological suspensions: Demonstration of relaxation mechanism", *J. Rheol.*, **37**, 199 (1993).
17. K.H. Ahn and D.J. Klingenberg, "Relaxation of polydisperse electrorheological suspensions", *J. Rheol.*, **38**, 713 (1994).
18. M.M. Denn, *Process Fluid Mechanics*, (Prentice-Hall, New Jersey, 1980).
19. 주상현, "전기유변 유체의 압착 유동에 대한 연구", 서울대학교 공학박사 학위논문(1998).