

좁은 평행평판전극 사이의 ER유체 유동의 가시화

박명관* · 이은준** · 大島修造*** · 山根 隆一郎***

(1998년 3월 18일 접수)

The Flow Visualization of ER Fluid Between Two Parallel-Plate Electrodes Separated by Small Distance

Myeong-Kwan Park, Eun-Jun Rhee, Shuzo Oshima and Ryuichiro Yamane

Key Words: Electrorheological Fluids (ER유체), Flow Visualization (유동 가시화), Circle-Shaped Electric Field (원형 전기장), Bingham Model (빙햄모델)

Abstract

The purpose of present research was to get characteristics and basic knowledges of electrorheological(ER) suspension. To observe behaviors of the ER suspensions, transparent conductive plates were used to visualize the flow of ER suspensions between two parallel plate electrodes. The influence of flowing speed and intensity of electric field on the ER fluid were examined in circle-shaped electric field, and it takes several hundred milliseconds that suspensions in flow cluster. The present study also conducts a numerical analysis adopting the Bingham model. It is found that simple Bingham model can not property describe the flow behavior in the parallel plates.

1. 서론

ER유체는, 일반적으로 부하되는 전기장에 의해 유체의 점도가 변화하는 것을 총칭한 것으로 1949년, W. M. Winslow가 부하되는 전기장에 의해 실리카를 입자로 한 유체의 점성이 변함을 발표하여 Winslow 유체로 널리우기도 한다.^(1,2) 1967년도에 Klass와 Matinek⁽³⁾가 ER효과와 계통적인 검토로 연구를 더욱 발전시킨 후, 세계 각국에서 ER유체가 주목받기 시작했다. 최근에 ER유체는 신 기능성 유체로 주목받고 있으며 많은 연구가 진행되어지고 있고 ER효과를 이용하여 여러 분야에 적용한 연구도 활발화 되어가고 있다. ER유체는 절연성의 유체에 유전고체 미립자를 분산시킨 현탁액으로서 외부로부터 전기장 인가에 의해 겔보기 점도가 변화하는 액체이다. 일반적으로 유체는 압력, 온도가 일정하면 밀도, 압축률 및

점도 등의 물성치가 일정하지만 ER유체는 인가된 전장의 강도에 영향을 받아 점도의 변화가 급변하고, 점도변화의 응답성이 양호하여 수백 Hz 정도의 전기입력신호에 추정할 수도 있으며 외부로부터의 인가된 전기장의 크기에 따라 유체특성이 달라지므로 전기장의 제어에 의해 유동특성 제어가 가능한 특성을 가지고 있다.

현재까지 알려진 ER유체는 크게 2 종류가 있는데 하나는 분산미립자 표면에 수분을 포함하는 합수계 ER유체, 또 하나는 수분을 포함하지 않은 비수계 ER유체로 나눌 수 있다. 현재는 비수계 재료의 고성능화 개발이 활발한데 이것은 온도변화에 따른 안정성을 갖기 위함이다. 따라서 물을 대신하는 고비동점의 첨가제를 개발함으로써 합수계 ER유체의 큰 점성효과를 얻을 수 있도록 하는 연구도 가능할 것이다. ER효과와 발생은 전기장의 인가에 의해 분산매 중의 분산입자가 유전분극 할 때 플러스극을 형성하고 여기서 형성된 클러스터는 분산매의 파단력에 의해서 전단되어 점도가 상승하여 나타나게 된다. 분산계 ER유체는 거시적으로 보면 무전기장에서는 뉴턴성유체로서 전기장 인가시는 항복용력이 발생하여 빙

* 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

** 회원, 부산대학교 대학원

*** 동경공업대학 공학부 기계과학과

행유체와 유사하게 거동한다.⁽¹⁴⁾ 합수계돈 비수계돈 보다 효과적인 ER유체의 조건은 작은 전압으로 입자간 큰 인력이 얻어질 수 있는 것으로서 입자간의 큰 인력을 얻기 위해서는 입자와 분산매의 유전율의 차를 크게 하여 전기쌍극자를 크게 하는 방법을 생각할 수 있으나 전기쌍극자만을 고려해서 계산한 결과는 실험 값과 잘 일치하지 않는다. 따라서 그 외 ER효과에 영향을 주는 인자로서는 전극과 입자의 상호작용과 입자계면의 효과 등을 생각할 수 있는데 아직 검토되어진 바 없으며 정확한 메커니즘의 해명도 불충분한 상태이다. 보다 우수한 ER유체를 개발하기 위해서는 위에서 지적한 점을 고려하여 큰 항복용력을 안정적으로 나타낼 수 있는 분산입자를 설계하여야 할 것이다.

이제까지의 대부분의 연구들은 유동상태에 있어서 분산매의 유동과 입자의 거동을 함께 파악하고 있지 않으며 ER효과를 이용한 응용연구⁽⁴⁻⁹⁾와 ER효과 의 발생 기구를 미시적 견지^(10,11)에서 해명하는 것을 목적으로 한 것이 대부분으로 유체역학적 검토^(12,13)가 아직 미흡하다. 응용분야에 관한 것으로는 가변전퍼, 방진장치, 엔진마운트, 플러치 등이며 최근에는 에너지 순환계를 구성하는 액츄에이터에 대한 연구까지 수행되고 있으나 이들 ER효과를 이용한 각종 기기를 설계하는데 있어서 ER효과와 거시적인 유체운동과의 상호관계를 아는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 ER유체의 중요한 특성에 관한 기초적인 지식을 얻기 위하여 ER유체의 유동을 비교적 잘 표현할 수 있는 빙행유체의 모델을 사용하여 그 유효성을 알아보기 위해 평행평판 전극내의 유동특성 변화 실험에 의한 ER유체의 기본성질을 검토하였으며 전기장 인가 부분을 원형으로 하는 무명전도기 판을 사용하여 ER유체의 평행평판 사이의 유동을 가시화 하여 ER유체의 거동을 살펴보고 또 ER유체를 빙행유체로 취급하여 수치해석을 수행한 결과와 비교하고자 한다. 그런데, 일반적으로 ER유체의 거동 특성을 거시적 관점에서 빙행거동이라고 분류하여 취급하고 있으나 실제로 각종 응용장치에 빙행거동처럼 적용하여 실험해 보면 예상치과 결과치 사이에 다소 오차가 발생하고 있다. 본 연구에서 사용한 ER유체의 경우도 전기장의 세기와 전단용력의 발생관계를 보면 낮은 전단속도 영역에서는 빙행거동과는 다소의

차이를 보이고 있는데 이러한 특성을 나타내게 하는 원인을 찾아내는 것이 ER유체를 사용한 각종 응용장치의 정확한 사용을 위한 목적이라고 할 수 있다. 이 때문에 전자기학, 입자론, 전산유체, 레올로지, 탄성론 등등의 각종 방법을 사용하여 ER유체의 특성을 잘 근사화 시킬 방법들이 활발히 연구되고 있는 추세이다. 종래의 가시화 실험은 균일한 전기장 내에서 농도에 따른 플러스터의 형성 과정을 측면에서 관찰한 것이 대부분으로 국소적으로 전기장을 인가한 경우의 거동을 조사한 것은 거의 찾아볼 수 없으며, 전기유변효과를 복수의 뱀브로 동시에 제어하는 경우에는 국소적인 거동을 조사하는 것도 중요하므로 본 연구에서는 무명 전극을 이용하여 원형의 국소적 전기장을 인가한 경우의 거동을 가시화 실험과 간단한 해석에 의해 검토하였고 공학적 장치로서는 전극하부에 출력포트를 가지는 뱀브를 의미하고 있다. 유동 특성은 유동조건이 달라지면 변화하며 특정의 유동조건하에서 높은 차수의 근사식으로 구성 방정식을 풀더라도 다른 유동에 적용하는 경우에는 완전히 다른 결과를 가져올 수 있는데 플러스터의 구성상황이 유동조건에 강하게 의존하기 때문이다. 현재 상황으로서는 전기장의 인가방향, 전기장 강도 분포, 유동조건 등 ER유체의 거동에 영향을 미칠 수 있는 인자들을 전부 고려하여 고정도로 유동특성을 예측할 수 있는 모델이 존재하고 있지 않으며 앞으로 기대하기 어려움을 감안하여 장방향 유로의 유동특성으로부터 빙행유체로 근사화하였다.

2. 실험 및 고찰

2.1 ER유체 특성 실험 및 고찰

2.1.1 빙행유체로서의 거동

ER유체는 전기장 비인가시에는 뉴턴성 유체와 같은 특성을 가지지만 전극사이에 전기장이 인가되었을 때에는 항복용력을 가지게 되어 빙행유체와 같은 특성을 가지게 된다. 따라서 전기장 인가시 ER유체의 거동에 대한 실험결과를 정리하기 위해 다음과 같은 기초식을 유도한다.

먼저, 유로높이 H 에 비해 유로폭 B 가 충분히 큰 즉 $H/B \ll 1$ 인 경우, 평행평판 내의 ER유체의 유동을 유로높이 H 에 대하여 유로폭이 넓은

2차원 전단류로 근사하면 전단응력은 다음과 같다. (Fig. 1 참조)

$$\tau \cong z \frac{\Delta P}{l} \quad (1)$$

또

$$\tau = p_y - \eta_B \frac{du}{dz} \quad (2)$$

이므로

$$\tau = p_y - \eta_B \frac{du}{dz} = z \frac{\Delta P}{l} \quad (3)$$

전단응력은 $z=0$ 에서 $\tau=0$, 관벽 $z=2/H$ 인 곳에서 최대치 τ_w 가 된다. 따라서 $z=h_y$ 인 곳에서 τ 는 항복치 p_y 와 같아지므로 비플러그 높이 h_y 와 항복응력과외 관계는 다음과 같다.

$$p_y = h_y \frac{\Delta P}{l} \quad (4)$$

$z > h_y$ 일 경우에는 식 (3), (4)로부터

$$\tau = p_y \frac{z}{h_y} \quad (5)$$

식 (3), (5)와 경계조건 ($z=2/H$ 에서 $u=0$)으로부터 다음과 같이 된다.

$$u = \frac{p_y}{\eta_B} \frac{1}{2h_y} \left(\left(\frac{H}{2} - h_y \right)^2 - (z - h_y)^2 \right) \quad (6)$$

무차원 수 a 와 h' 를 각각 다음과 같이 정의하면

$$a = \frac{2h_y}{H} = \frac{p_y}{\tau_w} \quad (7)$$

$$h' = \frac{2z}{H} \quad (8)$$

다음 식과 같이 Fig. 1에 나타나는 속도분포형을 얻을 수 있다.

$$u = \frac{H p_y}{2 \eta_B} \left(\frac{1 - 2a + 2ah' - h'^2}{2a} \right) \quad (9)$$

여기서 u 는 유속, η_B 는 점도, H 는 전극의 간

극, τ_w 는 전단응력, a 는 비플러그 반경(Relative plug radius)이다. 플러그부 유속 u_m 은 식 (9)에서 $h' = a$ 로 두면 다음과 같이 된다.

$$u_m = \frac{H p_y}{2 \eta_B} \beta \left(\beta - \frac{(1-a)^2}{2a} \right) \quad (10)$$

여기서 유량 q 는 다음 식으로 표현된다.

$$q = 2 \left(\int_0^{h_y} u_m dz + \int_{h_y}^{H/2} u dz \right) \quad (11)$$

$$q = \frac{H^2 p_y}{\eta_B} a \left(a = \frac{a^3 - 3a + 2}{12a} \right) \quad (12)$$

또 여기서 $a \ll 1$ 이라면 q 는 다음과 같이 고칠 수 있다.

$$q = \frac{H^2 p_y}{\eta_B} \frac{2-3a}{12a} = \frac{H^2 \tau_w}{6 \eta_B} - \frac{H^2 p_y}{4 \eta_B} \quad (13)$$

그러므로 식 (4), 식 (7), 식 (13)에서 τ_w 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_w = \left(q + \frac{H^2 p_y}{4 \eta_B} \right) \frac{6 \eta_B}{H^2} = \eta_B \frac{6q}{H^2} + \frac{3}{2} p_y \quad (14)$$

여기서 $\frac{6q}{H^2}$ 는 유체의 전단속도를 나타낸다.

2.1.2 ER유체의 특성

본 실험에서 사용한 분산계 ER유체는 강 염기성 용이온 교환수지(三菱化成 SA10AS, 일본)를 분산 질로 하고 접연유인 실리콘 오일(다우코닝 SH200-100, 일본)을 분산매로 하여 제작하였으며 이온교환수지는 시판의 것을 수분제거장치를 사용하여 감압, 가열처리해서 수분을 제거하였다. 또 큰 ER효과를 얻기 위해서는 분산 질 입자의 입자 경을 작게 그리고 동일한 크기를 유지할 필요가 있으므로 입자 경을 평균적으로 200 μm 정도의 것으로 선정하였으며 입자의 중량농도가 10%, 20%의 2가지 경우에 대해 ER유체의 거동을 관찰하였다. 그리고 ER유체의 기본적인 특성을 파악하기 위하여 폭이 10mm, 길이가 300mm인 평행평판의 전극 2개를 사용하여 높이가 1mm인 유로를 제작하고 일정한 유속으로 유동하는 ER유체를 유로 사이로 주입시킨 후 ER유체에 일정한 세기의 전기장을 인가하여 발생하는 압력손실을 압력변환기로 측정하여 전기장의 세기에 의한 전단응력의 크기를 알아보았다. 그리고 유체의 유입과 유출시 발생하는 각종 손실에 의한 유동의 흠어짐을 고려하여 입구와 출구에

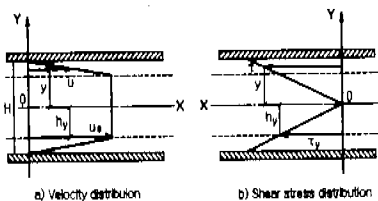


Fig. 1 Bingham flow model.

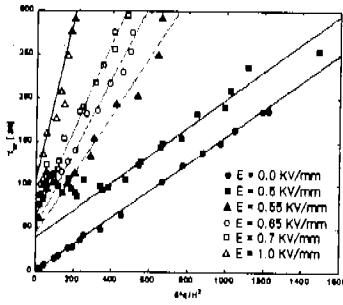


Fig. 2 Shear stress τ_w vs shear rate $6q/H^2$ at various electric field strengths (10 vol. %).

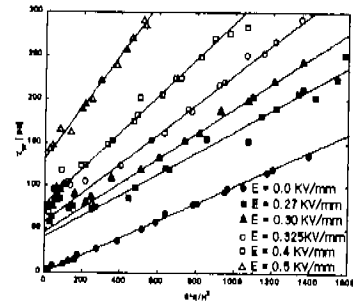


Fig. 3 Shear stress τ_w vs shear rate $6q/H^2$ at various electric field strengths (20 vol. %).

50mm의 입출구 영역을 설정하였다.

Fig. 2 및 Fig. 3은 중량 농도가 10%, 20%인 ER유체에 대해 전기장 크기에 따른 전단응력의 크기를 각각 나타낸 그림인데 전기장 비인가시에는 뉴턴성 유체와 같이 거동하다가 전기장을 인가하면 비뉴턴성 유체의 병행거동과 매우 유사하게 거동하는 것을 보이고 있다.

2.2 유동가시화 실험 장치 및 실험 방법

실험장치의 개략은 Fig. 4와 같고 전극의 형상 및 치수는 Fig. 5에 나타내고 있다. 압축기로 압축된 공기를 감압밸브로 원하는 압력으로 하여 ER유체가 들어있는 상류 탱크로 보내면 ER유체는 압축 공기에 의해 압축되어 시험부를 지나 하류탱크로 흐르며 이 과정에서 고압 직류 전원외 의한 전기장의 작용을 받게된다. 유속은 탱크내의 압력 조절에 의하며 유체는 입자의 침전을 방지하기 위해 수직방향으로 흐르게 하고 수평방향으로 전기장을 인가하여 그 때의 유량을 중량법으로 구하였다. 전극은 유동의 가시화를 위해 두께 1.0mm의 전기 저항이 낮고 광선 투과율이 높은 투명한 전도 유리기판 2장을 상하 벽으로 이용하고 측벽은 두께 2.0mm의 아크릴 판을 삽입하여 접착시켰다. 전도 유리기판은 투명 유리기판 표면에 ITO(도전성 금속산화물)막을 코팅한 것으로, 화학처리에 의해 ITO막을 제거시킴으로써 입자의 전극형상을 얻을 수 있다. 전기장 인가부분은 Fig. 5와 같이 직경 20mm의 원형으로 하고 전극간극은 2.0mm로 하였으며 유로 폭은 50mm이다. 입자의 중량농도가 10%, 20%의 2가지 경우에 대해 상류탱크의 압력과 인가전압을 변화시켜 가면서 ER유체의 거동을 관찰하였다.

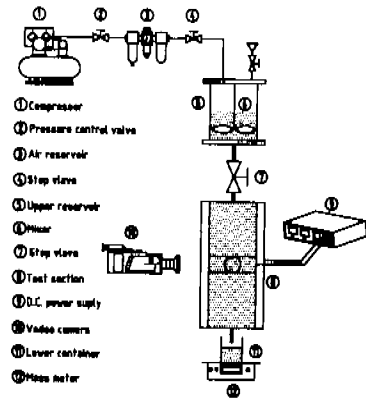


Fig. 4 Visualization experimental apparatus.

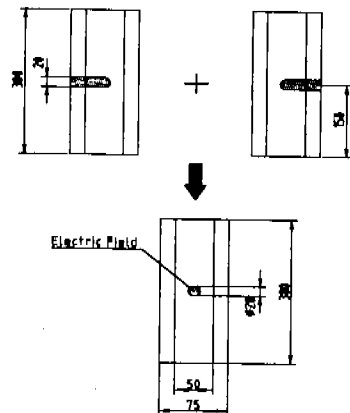


Fig. 5 Electro shape.

2.3 유동가시화 실험결과 및 고찰

ER유체의 거동을 아래와 같이 3종류로 분류하여 각각의 경우에 대한 유동의 모습을 가시화한

모습을 Fig. 6~Fig. 9에서 나타내고 있다.

2.3.1 A: 전기장 인가부분에서 정지영역을 형성하지 않고 유동하는 경우

Fig. 6, Fig. 7에서 나타내듯이 정지영역이 형성되지 않고 그냥 흘러가고 있다. 이와 같은 거동은 유속이 빠르거나 전기장의 세기가 약할 때 나타난다. 또 Fig. 7에서는 유선이 확실히 굽어져 있는 것을 확인할 수 있는데 이것은 전기장 인가부분(원형 내부)에서 ER효과가 나타나기 시작하여 작동유체의 유속이 감속되기 때문이다.

2.3.2 B: 전기장 인가부분에서 정지영역을 일부 형성하고 그것이 성장해 갈 경우

Fig. 8은 전기장 인가부분의 후방까지 충분히 발달한 플러스터가 형성되어 그 영역의 유속이 저하되어 마침내는 정지영역이 만들어지는 것을 보여주고 있다. 형성된 정지영역은 점차 상류로 성장하는데 이것은 회전 점도계와 같이 전체적인 농도 차가 생기지 않으므로 유동상태가 순간적으로 변화하는 것이 아니라 국소적으로 전기장 인

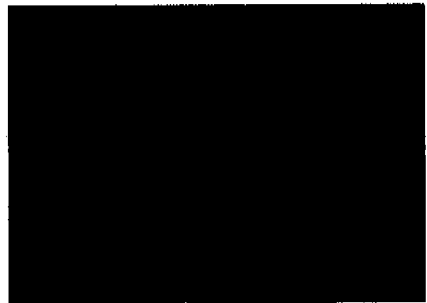
가에 의해 영역내부에서 플러스터가 성장하여 하류영역에서부터 전기유변효과가 가장 강하게 나타나고 상류로부터 유입해 오는 입자를 끌어당겨 하류에서 상류 쪽으로 플러스터가 성장하기 때문이다. 그러므로 정지영역의 상류 즉 정체점 부근에서는 유속이 느려 발달된 플러스터가 형성되기 쉽게 되고 새롭게 형성된 플러스터는 상류의 정체점 부근에서 퇴적되어 정지영역은 전기장 인가부분 전역에 걸쳐 확대되어 가는데 이와 같이 전기장 인가부분에서 입자의 응집이 발생하고 충분한 시간이 경과하면 Hele-Shaw 유동에 가까워진다.



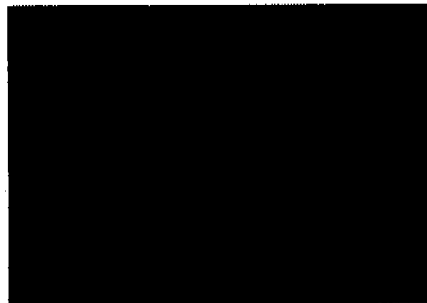
Fig. 6 Pattern A (Density 10%, $E=0.55\text{kV/mm}$, $V=108.5\text{mm/s}$).



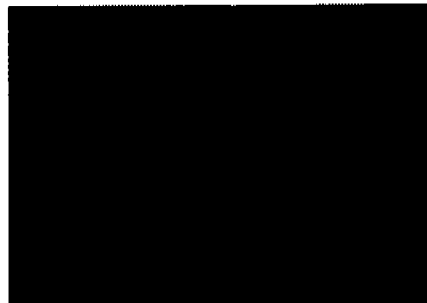
Fig. 7 Pattern A (Density 20%, $E=0.30\text{kV/mm}$, $V=63.2\text{mm/s}$).



(a)



(b)



(c)

Fig. 8 Pattern B (Density 20%, $E=0.33\text{kV/mm}$, $V=64.7\text{mm/s}$).

2.3.3 C: 전기장 인가부분에서 정지영역을 급속히 형성하는 경우

Fig. 9에서 알 수 있듯이, 전기장 인가부분에서 강한 클러스터가 순간적으로 형성되어 상류로부터 쌓이는 형상이 상류 부에 미약하나마 발생하는 정도인데 유로 폭 전체가 전극인 경우는 반드시 유체가 전기장 영역을 통과하지 않으면 안되기 때문에 시간의 경과와 함께 입자밀도가 상승하는 형상이 발생하지만 본 연구와 같이 일부에만 전기장을 인가한 경우에는 전기장 영역을 우회하는 영역이 발생하기 때문에 새로운 분산질의 침입이 억제되어 B패턴에 비해 전기장 인가 부분에서는 초기의 입자 농도에 가까운 상태가 되고 반면에 전기장 인가부분 상류에서는 클러스터간에 입자가 침입하여 상대적으로 입자밀도가 높아지게 된다. 그러므로 강한 전기장 하에서는 B의 경우보다도 입자밀도가 낮고 순간적으로 형성된 정지영역의 유동 방해로 인해 Hele-Shaw 유동과 유사함을 알 수 있다.

이상의 3가지 경우에 대해 유량을 유속으로 변환하여 유속 V 를 x 축으로 하고 전기장 세기 E 의 제곱을 y 축으로 한 그래프를 Fig. 10에 나타내었는데 기울기가 작은 실선보다 아래쪽은 패턴 A영역을 그리고 두 실선 사이의 영역은 패턴 B 영역을, 기울기가 큰 실선보다 위의 영역은 패턴 C의 영역을 각각 나타내고 있고 파선은 입자농도가 20%인 경우의 결과를 나타내고 있다.

유속이 크게 되면 전극 내의 과도적인 영향의 증대와 전단층의 증가에 의해 충분히 발달한 클러스터를 형성하기 어렵게 되기 때문에 유속이 작을 때보다도 클 때가 정지영역을 형성하므로 보다 큰 전기장의 강도가 필요하다. 또한 입자밀

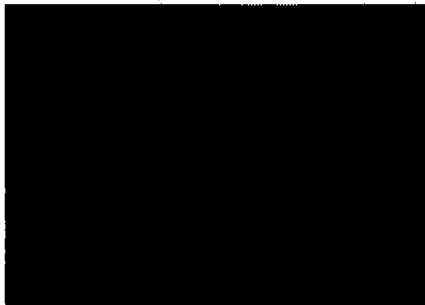


Fig. 9 Pattern C (Density 10%, $E=0.70kV/mm$, $V=98.0mm/s$).

도가 높으면 클러스터를 형성하기 쉽고 형성된 클러스터 밀도도 높아져서 농도가 20%의 경우보다 10%의 경우보다 분산매와의 상호작용이 강해지기 때문에 명백하게 10% 보다 20% 쪽이 약한 전기장에서도 정지영역이 형성되어 흐름이 멈추고 있음을 알 수 있다. 또한 클러스터 형성에 요하는 시간은 일반적으로 수 ms라고 알려져 있으나 이러한 응답성은 용매와 용질의 종류 및 농도에 따라 차이를 보이며 본 실험에서 제작하여 사용한 ER유체는 전기장이 없는 상태에서 전기장이 있는 곳으로의 과도적인 유동에 해당하므로 수십 ms에서 수백 ms정도라고 추정된다.

3. 수치해석

3.1 기초식

빙협유체의 구성 방정식은 각각의 경우에 대해 아래와 같이 성립한다.

$$\frac{1}{2} \rho_{ii} \rho_{ii} > \rho_y^2 \text{에 대해서}$$

$$\sigma_{ii} = -\rho \delta_{ii} + 2 \left(\eta_B + \frac{\rho_y}{\sqrt{4|\Pi|}} \right) e_{ii} \quad (15)$$

$$\frac{1}{2} \rho_{ii} \rho_{ii} \leq \rho_y^2 \text{에 대해서} \quad e_{ii} = 0 \quad (16)$$

ρ_{ii} , σ_{ii} , e_{ii} 는 각각 편차 응력텐서, 응력텐서, 전단층 텐서이며 ρ_y 는 항복 응력을, η_B 는 점도를 나타낸다.

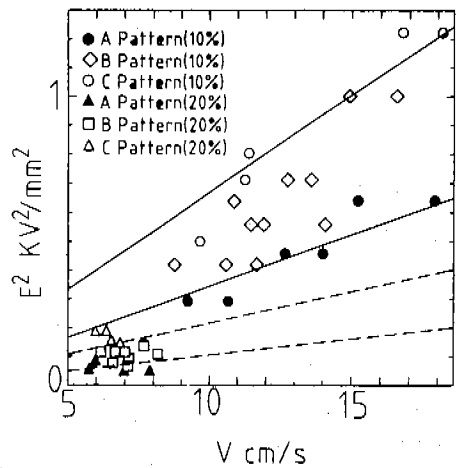


Fig. 10 Stream pattern.

$|\Pi_j|$ 은 다음 식에 의해 주어진다.

$$\begin{aligned} 4|\Pi_j| &= 2\Pi_j = 2e_{ij}e_{ji} \\ &= 2(e_{11}^2 + e_{22}^2 + e_{33}^2) + 4(e_{23}^2 + e_{31}^2 + e_{12}^2) \\ &\approx 4(e_{23}^2 + e_{31}^2 + e_{12}^2) \\ &(e_{11}^2, e_{22}^2, e_{33}^2 \ll e_{23}^2, e_{31}^2, e_{12}^2) \end{aligned} \quad (17)$$

연속방정식

$$\frac{\partial v_j}{\partial x_j} = 0 \quad (18)$$

좁은 평행평판 사이의 유동을 2차원 단순 전단유동으로 가정하면 전단률을 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$\begin{aligned} e_{yx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \approx \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial x} \\ e_{xx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \approx \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 x, y, z 는 평행 평판 유로의 중심을 원점으로 하는 공간 좌표계이고 u, v, w 는 각 방향의 속도성분이다. z 축 방향으로 압력 구배가 변화하지 않는 것으로 가정하면 응력은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_{xx} = -z \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \sigma_{yx} = -z \frac{\partial p}{\partial y} \quad (20)$$

식 (20)을 식 (15)에 대입하면

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= -z \frac{\partial p}{\partial x} \\ &= 2 \left\{ \frac{\eta_B}{2} + \frac{p_y}{2\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}} \right\} \frac{\partial u}{\partial z} \\ &= \left\{ \eta_B + \frac{p_y}{\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}} \right\} \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \quad (21)$$

$$-z \frac{\partial p}{\partial y} = \left\{ \eta_B + \frac{p_y}{\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}} \right\} \frac{\partial v}{\partial z} \quad (22)$$

평판 유로 중심에서의 거리를 h 로 두면 $z > h$, 또는 $z = h_y$ 에 있어서

$$\sigma_{xx} = -h_y \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \sigma_{yx} = -h_y \frac{\partial p}{\partial y} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yx}^2 &= p_y^2 \\ &= h_y^2 \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (24)$$

이 된다. 여기서 h_y 는 플라그부까지의 거리이다. 식 (21), (22), (23), (24)으로부터

$$\begin{aligned} \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2} &= \frac{p_y}{h_y} \\ &= \frac{1}{z} \left[\eta_B + \frac{p_y}{\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}} \right] \\ &\quad \times \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \end{aligned} \quad (25)$$

$$= \frac{1}{z} \eta_B \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} + \frac{p_y}{z}$$

위 식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} = \frac{p_y}{\eta_B} \left(\frac{z}{h_y} - 1 \right) \quad (26)$$

식 (26)을 식 (21), (22)에 대입하면

$$\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\eta_B} \frac{\partial p}{\partial x} (z - h_y) \quad (27)$$

이 되고, 식 (27)을 적분하고 속도분포 $u(z), v(z)$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} u(z) &= \int_h^z \frac{\partial u}{\partial z} dz \\ &= \frac{-1}{\eta_B} \frac{\partial p}{\partial x} \left[\frac{1}{2} - z^2 - h_y z \right]_h^z \\ &= -\frac{1}{2\eta_B} \frac{\partial p}{\partial x} [(z - h_y)^2 - (h - h_y)^2] \end{aligned} \quad (28)$$

$$v(z) = -\frac{1}{2\eta_B} \frac{\partial p}{\partial y} [(z - h_y)^2 - (h - h_y)^2] \quad (29)$$

$z = h_y$ 의 플라그 부의 유속은

$$u_m = \frac{1}{2\eta_B} \frac{\partial p}{\partial x} (h - h_y)^2 \quad (30)$$

$$v_m = \frac{1}{2\eta_B} \frac{\partial p}{\partial y} (h - h_y)^2$$

전체영역의 평균속도분포는

$$\begin{aligned} \bar{u} &= -\frac{1}{h} \left[\int_0^{h_y} u_m dz + \int_{h_y}^h u dz \right] \\ &= -\frac{1}{6\eta_B} \frac{\partial p}{\partial x} (h - h_y)^2 (2h + h_y) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\bar{v} = -\frac{1}{6} \eta_B \frac{\partial p}{\partial y} (h - h_y)^2 (2h + h_y) \quad (32)$$

이 된다. 여기서 식 (31) 과 식 (32)을 식 (18)에 대입하면 아래와 같이 압력 방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} (h - h_y)^2 (2h + h_y) \\ & + \frac{\partial p}{\partial x} \left[-2(h - h_y)(2h + h_y) \frac{\partial h_y}{\partial x} \right. \\ & \left. + (h - h_y)^2 \frac{\partial h_x}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} \right] \\ & = (h - h_y)^2 \left[\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} (2h + h_y) - 3 \frac{\partial h_y}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (33)$$

식 (33)을 정리하면 다음 식이 되며,

$$\begin{aligned} & (2h + h_y) \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - 3 \frac{\partial h_x}{\partial x} \frac{\partial p}{\partial x} \\ & + (2h + h_y) \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - 3 \frac{\partial h_y}{\partial y} \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (34)$$

다음의 무차원량에 의해 무차원화 하면

$$\begin{aligned} \bar{u}^* &= \frac{\bar{u}}{U}, \quad \bar{v}^* = \frac{\bar{v}}{U}, \quad h_y^* = \frac{h_y}{h}, \\ p^* &= \frac{p h^2}{\eta_B U d}, \quad x^* = \frac{x}{d}, \quad y^* = \frac{y}{d} \end{aligned} \quad (35)$$

여기서 U 는 유입속도를 나타내고 d 는 전기장 인가부분의 직경 즉 원형 정지영역의 직경을 나타낸다.

식 (34)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} & (2 + h_y^*) \frac{\partial^2 p^*}{\partial x^{*2}} - 3 \frac{\partial h_y^*}{\partial x^*} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \\ & + (2 + h_y^*) \frac{\partial^2 p^*}{\partial y^{*2}} - 3 \frac{\partial h_y^*}{\partial y^*} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} = 0 \end{aligned} \quad (36)$$

또 h_y 를 결정하는 방정식은 식 (24)에 의해

$$\begin{aligned} h_y^* &= \frac{h_y}{h} = \frac{p_y}{\sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)^2}} \frac{1}{h} \\ &= \frac{N_B}{\sqrt{\left(\frac{\partial p^*}{\partial x^*}\right)^2 + \left(\frac{\partial p^*}{\partial y^*}\right)^2}} \end{aligned} \quad (37)$$

이 되고 방행 수는 다음과 같다.

$$N_B = \frac{p_y h}{\eta_B U} \quad (38)$$

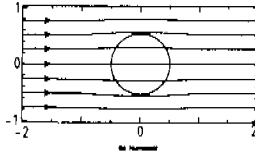
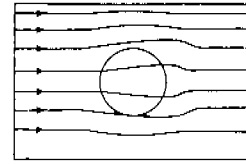


Fig. 11 Stream line (Pattern A, $N_B=0.23$).

식 (31), 식 (32)는 다음과 같이 되며

$$\bar{u}^* = -\frac{1}{6} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} (1 - h_y^*)^2 (2 + h_y^*) \quad (39)$$

$$\bar{v}^* = -\frac{1}{6} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} (1 - h_y^*)^2 (2 + h_y^*) \quad (40)$$

$$R_s = \frac{\rho U d_m}{\eta_B} \quad (41)$$

여기서 R_s 는 레이놀즈 수를 나타낸다. 그리고 항복 응력이 없는 경우의 압력 구배는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} &= -\lambda \frac{\rho U^2}{2} \frac{1}{d_m} \\ &= -\frac{46}{R_s} \frac{\rho U^2}{2} \frac{1}{d_m} \\ &= -\frac{96 \rho U^2 \eta_B}{4 \rho U h \cdot 2} \frac{1}{4h} \\ &= -3 \frac{U}{h^2} \eta_B \end{aligned} \quad (42)$$

여기서 d_m 은 수력직경을 나타낸다.

무차원량은 아래와 같이 수치계산에서 초기치로서 이용한다.

$$\frac{dp^*}{dx^*} = -3 \quad (43)$$

그리고 $\bar{u}^*, \bar{v}^*, -\xi$ 를 각각 아래와 같이 두면 유선을 구하기 위한 유량함수의 방정식을 얻는다.

$$\bar{u}^* = \frac{\partial \psi^*}{\partial y^*} \quad (44)$$

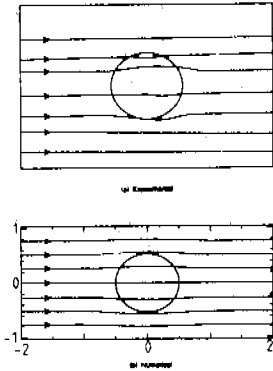


Fig. 12 Stream line (Pattern A, $N_B=0.77$).

$$\overline{v^*} = -\frac{\partial \Psi^*}{\partial x^*} \quad (45)$$

$$-\zeta = \frac{\partial^2 \Psi^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \Psi^*}{\partial y^{*2}} \quad (46)$$

$$= \frac{\partial u^*}{\partial y^*} - \frac{\partial v^*}{\partial x^*}$$

$$\frac{\partial^2 \Psi^*}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 \Psi^*}{\partial y^{*2}} \quad (47)$$

$$= \frac{1}{2}(1-h_y^2) \left[\frac{\partial v^*}{\partial x^*} \frac{\partial h_y}{\partial y^*} - \frac{\partial v^*}{\partial y^*} \frac{\partial h_y}{\partial x^*} \right]$$

3.2 해석결과 및 실험과의 비교

ER유체를 빙햄유체로 해석한 결과를 실험결과와 비교하였다. 해석에서는 전기장인가 부분만을 빙햄유체로 취급하고 전기장 인가부분에서 유동이 멈추지 않는 경우 (패턴 A, Fig.12)는 빙햄 수 N_B 를 변화시키고, 전기장인가 부분에서 유동이 정지하는 경우(패턴 B와 패턴 C, Fig.13)는 Hele-Shaw 유동으로서 계산을 수행하였다.

계산에서는 빙햄유체로서 취급하고 있기 때문에 유선은 전기장 인가 부분을 중심으로 상하 대칭으로 되어 있으나 실험결과로부터 얻어진 유선은 전기장 인가부분을 중심으로 대칭적이지 않음을 알 수 있는데 이것은 분산계 ER유체를 이용하고 있기 때문에 입자의 판성으로 인해 전기장 인가 부분에 입자가 들어오더라도 순간적으로 플러스터를 형성하지 못하고 감소하면서 플러스터를 형성해 가기 때문이다. 이러한 현상은 실험에 의해 ER유체와 전기장 인가에 따른 항복용력의 변화를 고찰한 뒤 이들 결과를 이용하여 빙햄 수를

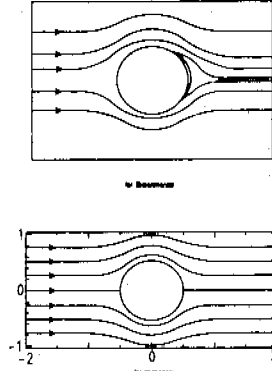


Fig. 13 Stream line (Pattern B and pattern C, $N_B=0.26$).

구함으로써 앞서 언급한 3가지의 유동 상태를 예측할 수 있다. 빙햄 수가 커지는 것은 유체가 점점 소성체처럼 변화한다는 것을 의미하는데, Fig. 14와 Fig. 15에서 전기장 인가에 의해 빙햄 수는 점점 증가하다가 일정량 이상의 전기장에서는 그 변화가 완만해져 가는 모습을 볼 수 있으며 이는 전기장 인가에 의해 ER효과가 발생함으로써 유체가 점점 소성체로 변화해 가다가 영역에 이르던 더 이상 변화가 일어나지 않는 것을 의미한다

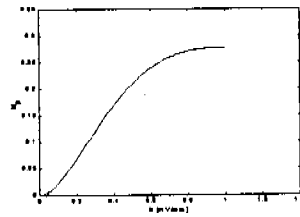


Fig. 14 Bingham number N_B vs. electric field strength (10%).

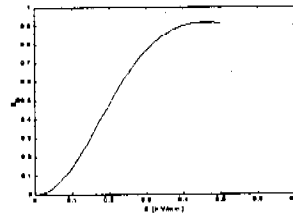


Fig. 15 Bingham number N_B vs. electric field strength (20%).

다. 따라서 이 곡선의 기울기를 통해 콜러스터 형성에 있어서 구분된 콜러스터 형성의 시작부와 콜러스터 형성의 천이영역 콜러스터 형성의 끝부분을 예측 할 수 있다. 10% 중량비율 가진 ER 유체의 경우 전기장의 인가가 각각 0.55KV/mm부터 0.7KV/mm의 영역 증가추세가 달라지고 있으며 20% 중량비율 가진 ER유체는 0.3KV/mm부터 0.4KV/mm 영역에서 병행 수의 증가 추세가 달라지는데 이것은 바로 이 영역이 콜러스터 형성의 천이영역임을 의미하며 가시화에 의해서 얻어진 실험 결과와 일치하고 있다. 따라서 ER유체는 병행유체로서 단순하게 취급하기보다는 콜러스터의 형성과정까지도 고려하여 해석해야 할 필요가 있다.

4. 결 론

원형의 전기장을 인가한 무명한 평행전극 사이에 분산매로 실리콘오일을 사용하고 분산질로 이온교환수지물 이용한 ER유체의 유동을 가시화하고 병행유체로서 이론적으로 시뮬레이션한 결과를 검토해서 다음의 결론을 얻었다.

(1) 무명한 전극 기판을 이용하여 ER유체의 유동의 가시화가 가능함을 알 수 있었다.

(2) 전기장 강도에 의해 3종류의 유동상태가 확인하였으며 전기장의 세기에 따른 병행 수 증가율로 전기장 세기에 따른 유동 상태의 예측이 가능하다.

(3) 유로의 일부에 전기장을 인가하고 있기 때문에 전기장 인가구간에서 입자의 용집이 일어나 유로 내에서 밀도 차가 발생하였으며 이것은 ER 유체를 병행유체로서 단순히 취급할 수 없는 원인으로 작용한다.

(4) 용질의 중량비가 클수록 전기장의 인가에 따른 병행 수의 크기가 커지며 이 둘 관계를 나타내는 그래프를 통해 용질 중량비가 클수록 ER효과가 더 커짐을 알 수 있다.

참고문헌

(1) Winslow, W. M., 1949, "Induced Fibrillation of Suspension," *J. Appl. Phys.*, Vol. 20, pp. 1137~1140.
 (2) Winslow, W. M., 1947, U.S. Patent, 2417850.
 (3) Klass, D. L. and Matinek, T. W., 1967, "Electroviscous Fluids II, Electrical Properties," *J.*

Appl. Physics., Vol. 38, No. 1, pp. 75~80.
 (4) Petek, Nichols K, 1992, "Shock Absorber uses Electrorheological Fluid," *Automotive Engineering*, Vol. 100, No. 6, pp. 27~30.
 (5) Kobayashi, H., Kobayashi, N., Yokoi, R., Saitoh, O., and Morishita, S., 1993, "Fundamental Performance of the Controllable Vibration Damper using Electrorheological Fluid," *Trans. of JSME(c)*, Vol. 59, No. 566, pp. 3008~3012.
 (6) Morishita, S. and Mitsui, J., 1992, "An Electronically Controlled Engine Mount Using Electrorheological Fluid," *SAE Paper No.922290*, pp. 92~103.
 (7) Carlson, J.D. and Duclos, T. G., 1989, "ER Fluid Clutch and Brakes-Fluid Property and Mechanical Design Consideration," *Proc. 2nd Int. Conf. Electrorheological Fluid*, pp. 353~367.
 (8) Kondo, Y., Yokota, S., and Hori, T., 1997, "Actuators Making Use of Electro-Rheological Fluids," *Proceedings of the 9th Symp. on Electromagnetics and Dynamics*, pp. 503~505.
 (9) 김상국, 정동운, 최윤대, 1994, "전기유변유체 동작매체로하는 실험용 토크전달장치 제작 및 성능평가," 대한기계학회논문집, 제18권, 제10호, pp. 2706~2711.
 (10) Bonnecaze, R. T., Brady, J.F., 1990 "Dynamic Simulation of a Suspension of Dielectric Particles Forming an Electrorheological Fluid," *Electrorheological Fluids*, pp. 27~40.
 (11) Brady, J. F., Phillips, R. J., Lester, J. C. and Bossis, G., 1988, "Dynamic Simulation of Hydrodynamically Interacting Suspensions," *J. Fluid Mech.*, Vol. 195, pp. 257~280.
 (12) Kita, Y., Oshima, T., Takase, H., Kondo, I., and Fujisawa, S., 1993, "Fundamental Study of Electrorheological Fluids," *Trans. of JSME(B)*, Vol. 59, No. 562, pp. 42~47.
 (13) Tsukiji, T. and Utashiro, T., 1997, "Flow of ER Fluids Between Two Parallel-Plate Electrodes for Sinusoidal Electric Fields," *Trans. of JSME(B)*, Vol. 63, No. 608, pp. 1221~1228.
 (14) Yen, W. S. and Achorn, P. J., 1991, "A Study the Dynamic Behavior of an Electrorheological Fluid," *J. Rheol* 35(7), pp. 1375~1392.