

ER유체의 클러스터 형성 메커니즘에 관한 연구

이은준*·박명관**

A Study on the Mechanism of Clusters Formation of ER Fluids

Eun-Jun. Rhee* and Myeong-Kwan. Park**

Key Words : ERF (Electro-Rheological Fluids), ER Effects (ER효과), Bingham Behavior (Bingham 거동), Visualization(가시화), Cluster(클러스터)

Abstract

Electrorheological fluids(ERFs) show a rapid and reversible increase in viscosity by applied electric field. It is called the electrorheological effect (ER effect). The reason for ER effect is the induction of an electric dipole in each particle, leading to the formation of clusters in the direction of the field, which resist fluid flow. Generally, the behavior of ER fluids has been modeled on those of Bingham fluids. But there are some differences between Bingham fluids and ER fluids. The visualization of ER fluids are presented and ER effects by the forming, growing and breaking of clusters are discussed. In the low shear rate area, the pressure drop is measured by a pressure sensor and the formation of ER particles is visualized by video camera. The reason for the nonlinear behavior of ER fluids at low shear rate is explained through results of visualization.

1. 서론

ER유체는 외부에서 전기장을 가함으로써 유체의 점도를 변화시킬 수 있는 기능성 유체를 말하며[1], 기존의 액체가 기준 온도에서 하나의 점도만을 가지는 데 비해 부하하는 전기장의 세기에 따라 여러 가지 점도로 변화하는 성질로 인해 밸브, 클러치 및 브레이크 시스템, 펌프등 다양한 분야에서 그 응용성이 연구되고 있다.[2],[3] 알려진 바와 같이 ER유체는 전기장의 부하만으로 고상과 액상간의 가역 변화가 쉽게 이루어 질 수 있고 응답속도도 수 ms로 매우 빠르기 때문에 기존의 기계적 요소가 가지는 소음, 진동, 고장 등의 문제를 비교적 쉽게 해결할 수 있다. ER유체에 전기장을 가하게 되면 절연유에 분산된 미립자 사이에 분극현상이 발생하여 미립자들이 클러스터를 형성하게되고 이때 형성된 클러스터에 의해 유체 유동이 방해되어 점성이 증가하는 것과 같은 효과를 가지게 된다. 이와 같은 효과로 인해 ER유체는 전기장 무부하시에는 뉴턴성 유체와 같이 거동하다가 전기장 부하시에는 Bingham 소성체와 같이 거동하게 된다. 따라서 ER유체에 관한 대부분의 응용장치에서는 ER유체를 Bingham 소성체로 가정한 지배방정식에 기초하여 이루어진다. 그러나 거시적 관점에서는 ER유체와 Bingham 소성체의 거동이 유사하지만 미시적 관점에서는 많은 차이를 보이고 있다. 특히 분산계 ER유체의 경우 낮은 전단속도 영역에서 비선형적 거동이 심하기 때문에 낮은 전단속도 영역에서의 불안정성으로 인해

시스템의 정확한 제어가 매우 어렵다. 따라서 ER응용장치의 정확한 제어를 위해서, 처음부터 작동구간 선정에 있어 비선형 거동이 발생하기 쉬운 낮은 전단속도 영역을 제외하거나[4] 구간별로 거동을 선형화하여 제어기법을 달리하는 제어기법[5] 등이 소개되고 있지만 기본적인 지배방정식의 모델링 오차로 인해 여전히 세부적 적용에는 문제를 안고 있다.

본 연구에서는, ER효과와 메커니즘을 규명하기 위해 투명한 사각 채널 내부의 ER유체 유동의 가시화를 시도하였다. 전기장 부하에 따른 채널 내부의 클러스터의 형성, 성장, 파괴의 과정을 가시화를 통해 알아보고 유체 유동 시 발생하는 채널 양 끝단 부의 압력차 측정을 통해 전기장의 세기가 유체 유동에 미치는 영향과 클러스터의 형성이 유체 유동에 미치는 영향 등을 고찰함으로써 ER유체 유동의 모델링에 기초를 마련하였다.

2. 실험장치 구성 및 실험방법

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 서보모터로 유체속도를 조절하여 채널 내부에 유입하고 채널의 전극에 연결된 고전압 발생장치로 부하되는 전기장의 세기를 증가시키면서 채널 양 끝단부에서 발생하는 압력차를 측정하였다. 이때 채널 내부의 전극 주위에서 형성되는 클러스터 모양의 변화를 비디오 카메라로 기록하였다.

사용한 채널은 폭이 7mm, 길이가 120mm, 간극이 2mm이고 전극의 길이는 50mm이다. 또한 클러스터 형성을 가시화 하기 위해 채널의 위아래 부분은 투명한 유리를 사용하였다.

ER유체는 강염기성 음이온 교환수지와 다우코닝사의 실리콘 오일(비중 0.964) 100cst을 혼합하여 만들었다. 음이온 교환수지

* 부산대학교 기계기술연구소, jun@pusan.ac.kr

** 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소,
mkpark1@pusan.ac.kr

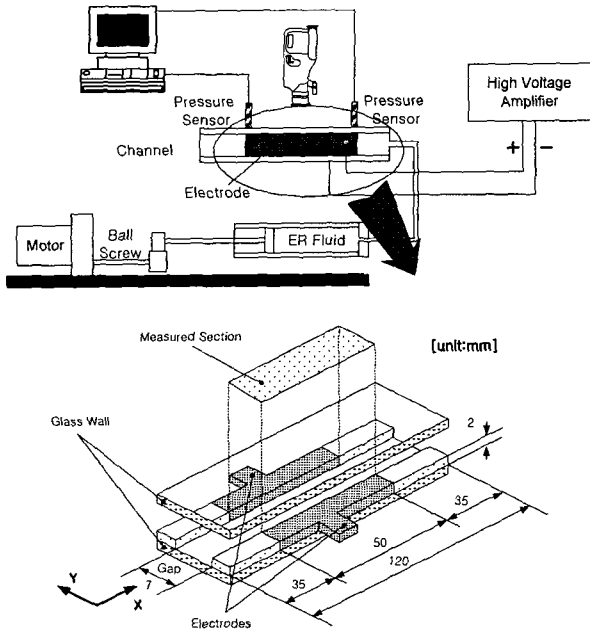


Fig. 1 Experiment Setup

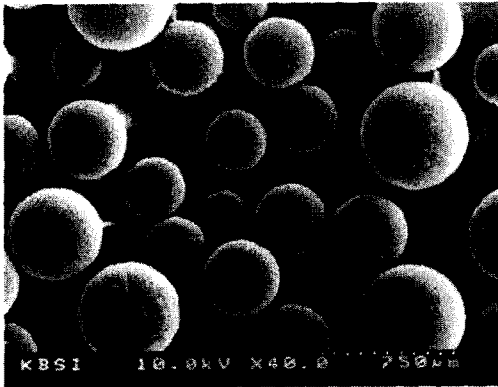


Fig. 2 ER Particles

의 모양은 Fig.2와 같다. ER입자의 가시화를 용이하게 하기 위해 비교적 큰지름의 평균직경 473 μ m인 입자를 사용하였고 농도는 0.5wt%로 비교적 낮게 설정하였다.

3. 실험결과 고찰

3.1 클러스터 형성 과정

Fig. 3은 전기장 부하에 따른 클러스터 형성과정을 0.1초 간격을 나타낸 것이다. 전기장을 가하기 전에 입자들이 채널 내부에 전체적으로 고루 분포되어 있다가 전기장이 가해지면서 채널주위로 클러스터가 점차 크게 형성되는 것을 볼 수 있다.

3.2 전기장 세기에 따른 클러스터의 형성

Fig. 4는 전기장의 세기에 따른 클러스터 형성 모습을 나타낸 것이다. 전기장의 세기가 커짐에 따라 클러스터가 크고 굵어지며 전극 주위로 집중되는 현상이 두드러지게 나타나고 있다.

3.3 클러스터 층의 발생

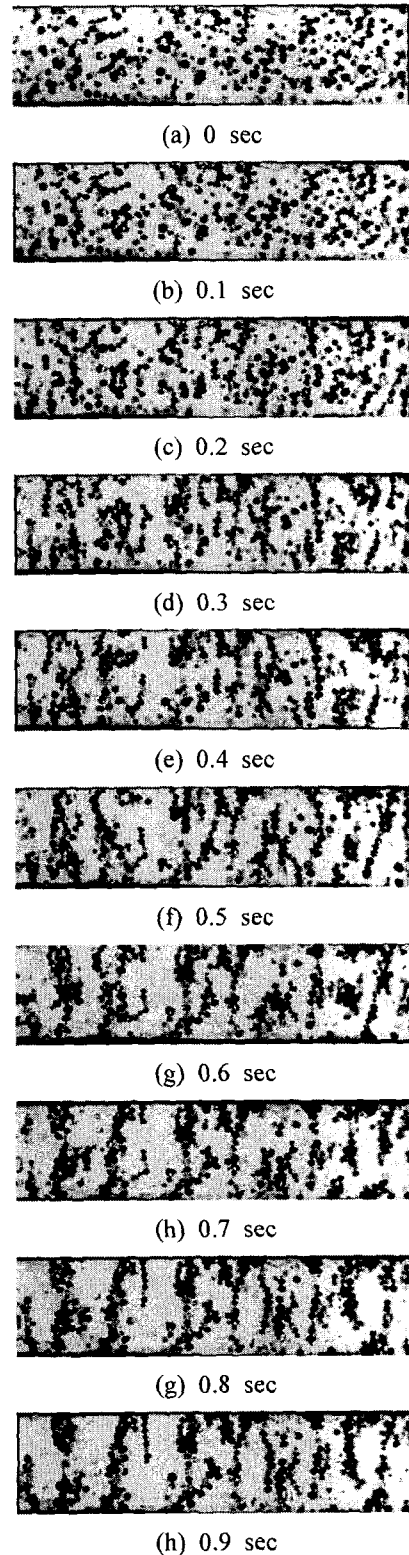


Fig. 3 Process of ER Cluster Formation without Flow (6kV / 0.1sec Step)

전극에 전기장의 부하하여 채널 내부의 ER입자들을 클러스터로 형성시킨 후 ER유체를 유동시키면 클러스터들은 형성, 성장, 파괴, 그리고 성장의 단계를 반복하게 된다. 특히 전기장의 세기와 유체 유속에 따라 Fig. 5와 같이 전극 주변에 ER입자의 층이 생기고 유동은 그 층 사이에서만 일어나므로 마치 유로의 폭이 좁

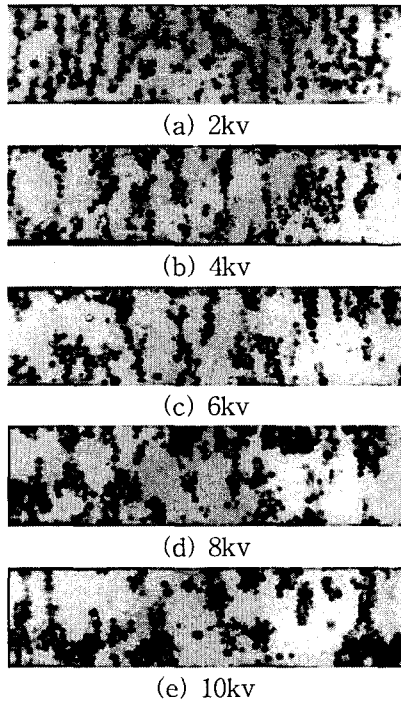


Fig. 4 Cluster Formation without Flow

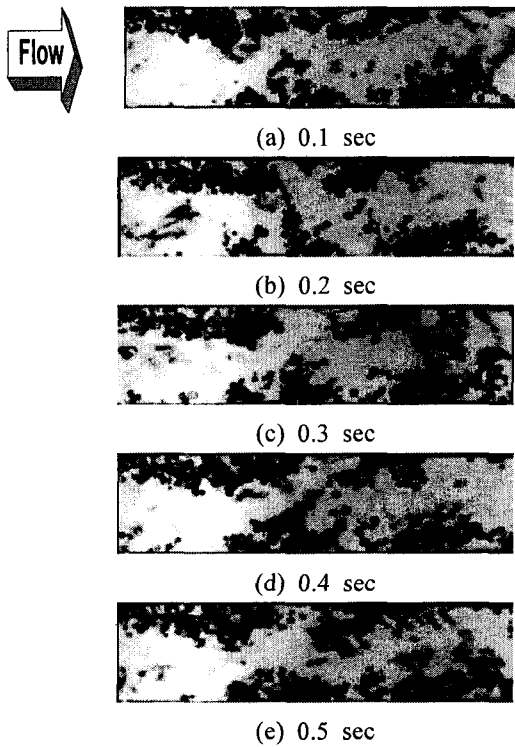


Fig. 5 Formation of Cluster Layer and Flow (8kv, 5.9cm/s)

아지는 효과를 가지게 된다. 클러스터 층의 발생은 입자의 결합력보다 유체의 유동력이 작을 때 일어난다. Fig. 6은 클러스터 층의 발생조건을 나타낸 것인데 조건에 따라 클러스터 층이 발생하는 구간과 발생하지 않는 구간으로 나뉘게 되는데 이것은 유체의 유속과 전기장의 세기에 의해 결정되는 것을 알 수 있다.

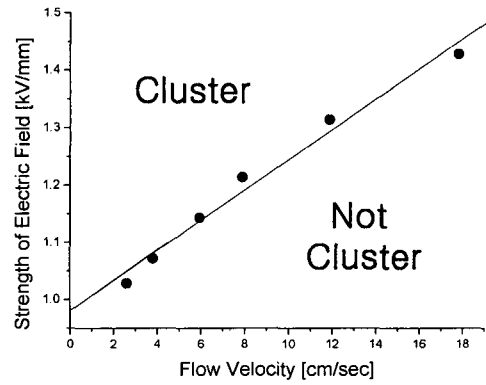


Fig. 6. Occurrence of Cluster Layer

3.4 전기장의 세기와 압력강하

전기장 부하에 의해 클러스터가 완전히 형성된 후 유동을 발생시키는 채널 양 끝단 부에서는 차압이 발생하는데 그 결과는 Fig. 7과 같다. 거시적으로는 Bingham plastic 거동과 매우 유사한 특성을 보이고 있지만 유속이 느린 구간에서는 비선형적 특성이 나타나고 있다. Fig. 7의 결과를 이용해서 다음과 같은 형태로 채널에서 발생한 차압에 의해 전단응력을 유속과 전기장의 관계로 표시할 수 있다.

$$\tau = \eta \frac{6q}{H^2} + \frac{3}{2} \tau_y \quad (1)$$

여기서, q : 유량, H : 채널의 간극, η : 점도, τ_y : 항복응력

Fig.8은 전기장의 세기에 따른 유체의 점도변화를 나타낸 것이다. 전기장의 부하에 의한 점도변화는 거의 발생하지 않는다. 이것은 용질로 사용한 ER입자의 크기가 용매로 사용한 실리콘 오일의 분자보다 훨씬 크기 때문에 클러스터의 형성이 점도 변화에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타난다.

Fig. 9는 전기장의 세기에 따른 항복응력의 변화를 나타낸 것이다. 항복응력의 변화는 크게 세 구간으로 나뉘어 지는 것을 볼 수 있다. 전기장의 세기가 낮은 구간에서는 항복응력의 증가율이 매우 낮으며 어느 세기 이상부터는 항복응력의 증가율이 급격히 증가하다가 전기장의 세기가 큰 구간에서는 증가율이 처음과 같이 다시 감소한다. 이 결과를 이용하여 식(1)을 다시 구성하면 다음과 같다.[6]

$$\tau = 0.296 \frac{6q}{H^2} + \frac{3}{2} \times \begin{cases} 0.0218 & \text{for } E < 0.5 \\ 0.017E + 0.0218 & \text{for } 0.4 < E < 1.0 \\ 0.032 & \text{for } E > 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

이것은 ER유체의 항복응력을 전기장의 함수로 나타낼 때 구간을 설정해야함을 의미한다. 전기장의 세기에 따른 ER유체의 항복응력은 전기장의 세기에 따라 무한히 커질 수 있는 것이 아니라 항복응력 어느 정도 커지고 나면 전기장의 세기를 계속 증가시켜도 항복응력은 더 이상 증가하지 않기 때문에 ER유체를 사용한 응용장치에 적용되는 전기장의 세기는 ER유체의 종류에 따라 적용 범위가 결정되면 응용장치의 설계시 이러한 점을 반드시 고려해야 한다.

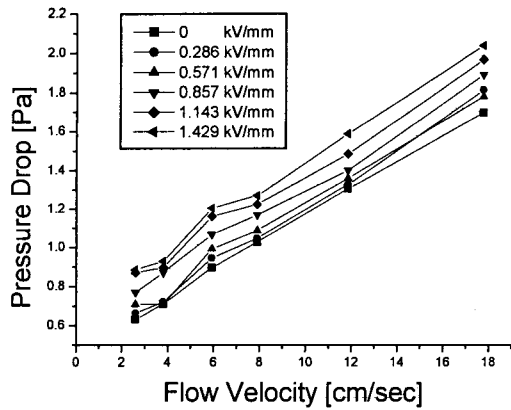


Fig. 7. Pressure Drop of ER Fluid

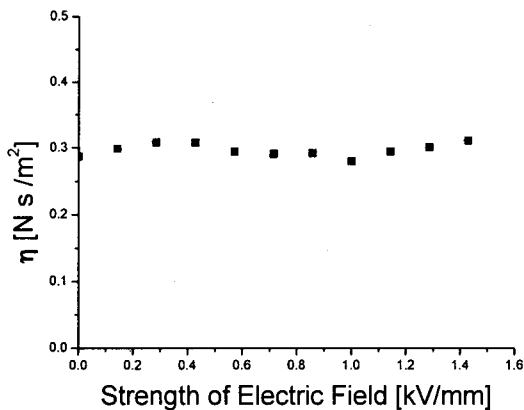


Fig. 8. Relation between Viscosity and Electric Field

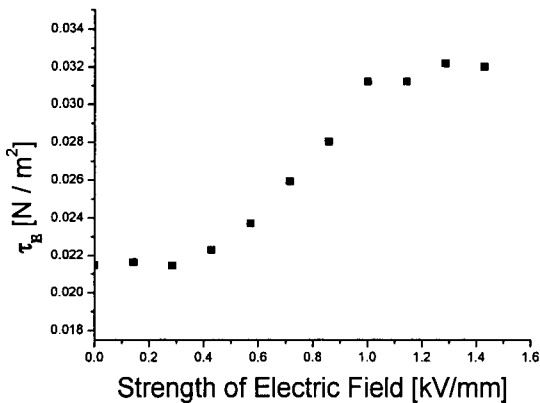


Fig. 9. Relation between Yield Stress and Strength of Electric Field

4. 결론

부하하는 전기장의 세기에 따라 ER유체에 발생하는 ER효과를 규명하기 위해 채널사이의 ER유체 유동상태를 가시화 하였고 이때 발생한 차압을 측정하여봄으로써 여러 가지 비선형 거동의 원인을 규명하였다. 전기장의 세기가 커지면 클러스터의 크기가 커지고 이에 따라 전극주위에는 클러스터 층이 생긴다. 이 층은 유로를 좁게 하는 효과를 나타낸다. 또한 항복응력의 변화율은 전기장의 세기에 따라 달라지고 전기장의 세기가 일정 이상 커지면 더 이상 증가하지 않으므로 ER유체의 응용장치 설계시 이러한 점을 고려하여 전기장의 적용범위와 응용장치의 용량을 결정해야 한다.

참고문헌

- [1] Winslow, W. M., 1949, "Induced vibration of Suspension," J. Appl. Phys., Vol. 20, pp. 1137-1140.
- [2] 이현균, 최승복, 장유진, 한승직, 이승범, 2000, "실차 실험을 통한 ER현가장치의 성능평가," 대한기계학회 논문집(A), 제 24권, 제 2호, pp. 347-354
- [3] 최영태, 최승복, 2000, "복합형 ER엔지마운트의 성능평가 (I)," 대한기계학회 논문집(A), 제24권, 제 2호, pp. 370-377.
- [4] Maemori, K. I. et al., 1996, "Multiobjective Optimization of Vibration System with a Damper Using Electro-Rheological Fluid," 일본기계학회(C), Vol. 62, No. 597, pp. 1726-1730.
- [5] Maemori, K. I. et al., 1996, "Optimum Design of Hydraulic Shock Absorber Using Electrorheological Fluid," 일본기계학회(C), Vol. 62, No. 603, pp. 4224-4229.
- [6] Tada, S., Kabeya, N., Yoshida, H., Echigo, R., 1997, "hydrodynamic Behavior or Electro-Rheological Fluids," 일본기계학회(B), Vol. 63, No. 613. pp.2985-2992.