

F low Mode 유동에 대한 ER효과의 실험적 해석

임춘성*(부산대 대학원 지능기계공학과), 이은준(부산대 기계기술연구소),
주동우(양산대 자동차과), 박명관(부산대 기계공학부 및 기계기술연구소)

Experimental Analysis of ER Effects about Flow-Mode

C. S. Lim(Mechanics and Intelligent Systems Engineering, Dept., PNU), E. J. Rhee(RIMT, PNU)
D. W. Joo(Automotive Eng. Dept, YSC), M. K. Park(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

Abstract: ERFs(Electrorheological Fluids) are a complex system consisting of polarizable particles and insulation liquid. When an external electric field is applied to ERFs, its apparent viscosity increases dramatically. This phenomenon is called the ER effect. Generally, the behavior of ERFs has been modeled on those of Bingham fluids. But the behavior of ERFs differs from those of Bingham fluids in many respects.

In the paper, ER effect concerning flow mode of ERFs is analyzed experimentally. According to several flow conditions, the change of ER effect is presented and visualized. A new modeling methodology of ER effect to reduce the modeling error is presented.

Key Words : Electrorheological Fluids(ER유체), Bingham fluids(Bingham 유체), ER effect(ER효과)

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 부하시에는 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, ER효과의 메커니즘을 규명하기 위해 투명한 사각 채널 내부의 ER유체 유동의 가시화를 시도하였다. 전기장 부하에 따른 채널 내부의 클러스터의 형성, 성장, 파괴의 과정 등을 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. 실험

2.1 실험방법

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 시보모터로 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.

2.2 실험장치

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

ER유체는 강염기성 음이온 교환수지와 다우코닝사의 실리콘 오일(비중 0.964) 100cst을 혼합하여 만들었다. 음이온 교환수지의 모양은 Fig.2와 같다. ER 입자의 가시화를 용이하게 하기 위해 비교적 큰지름의 평균직경 473 μ m인 입자를 사용하였고 농도는 0.5wt%로 비교적 낮게 설정하였다.

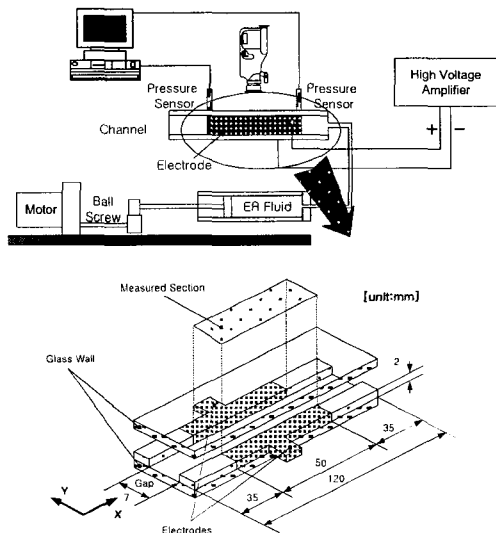


Fig. 1 Experiment setup

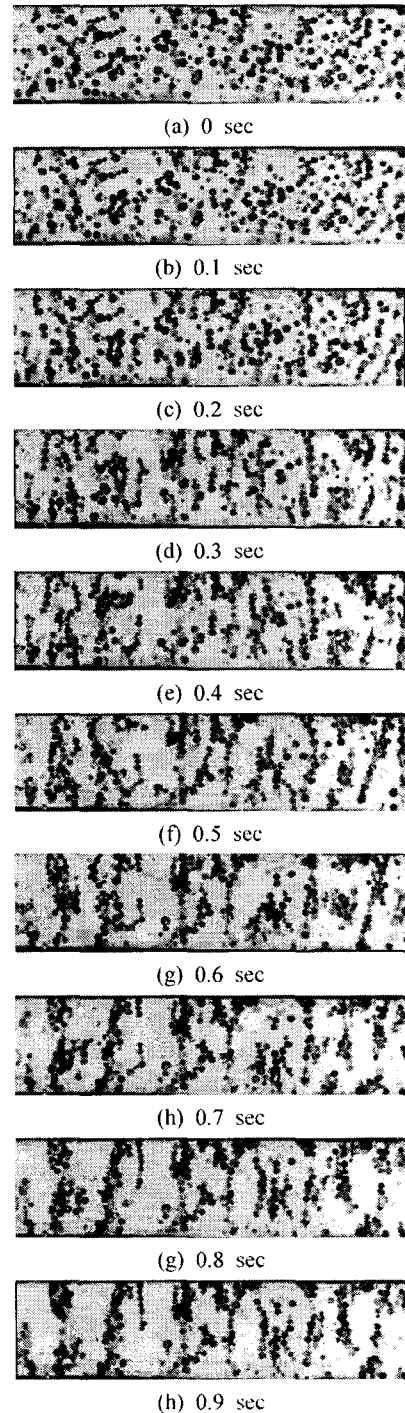


Fig. 2 Process of ER cluster formation without flow (6kV / 0.1sec Step)

3. 실험결과

3.1 클러스터의 형성

Fig. 2는 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. 또한 Fig. 3은 전기장의 세기에 따른 클러스터 형성 모습을 나타낸 것이다. 전기장의 세기가 커짐에 따라 클러스터가 크고 굵어지며 전극 주위로 집중되는 현상이 두드러지게 나타나고 있다.

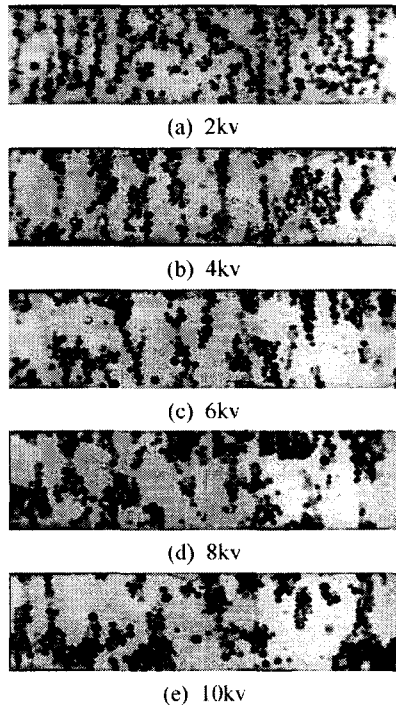


Fig. 4 Cluster formation without flow

3.2 Lock-up형성

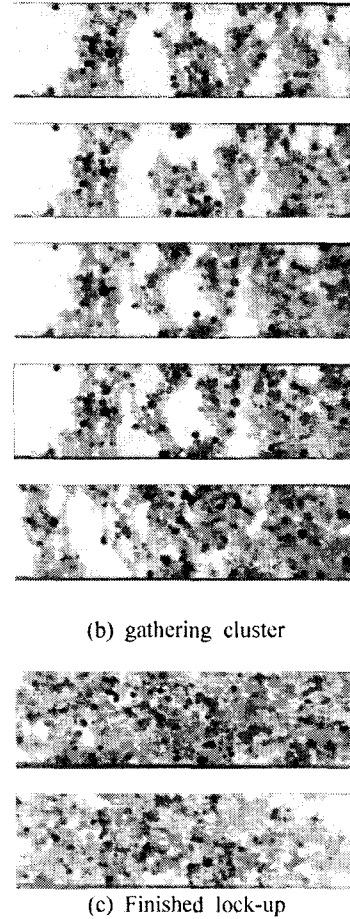
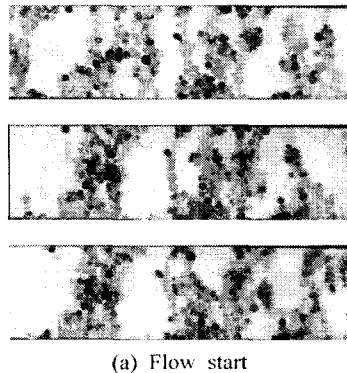


Fig. 5 Process of lock-up formation

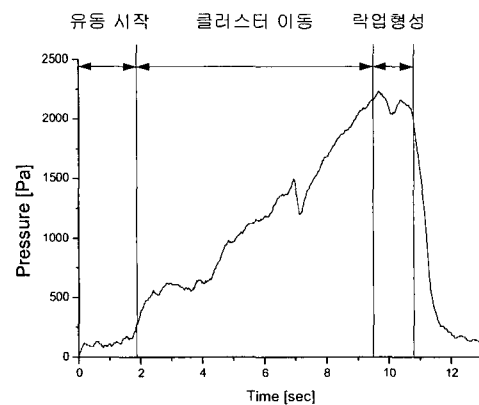


Fig. 6 Pressure drop by lock-up

Fig. 5는 전기장 부하에 의해 형성된 클러스터가 유동이 시작하면서 서로 들리붙어 락업현상을 나타내는 모습을 보여준다. 락업현상이 발생하면 유동에

의한 클러스터의 이동은 전혀 발생하지 않으며 이때 압력강하는 Fig. 6과 같이 나타난다. 락업현상이 발생할때의 압력강하는 매우 불규칙하며, ER유체를 이용한 응용장치에서 이러한 현상이 발생하면 시스템이 매우 불안정해지는 것을 의미하므로 ER유체 응용장치에서 전기장을 부하할 수 있는 구간이 제한되어야 한다.

3.3 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

이 결과를 이용하여 식(1)을 다시 구성하면 다음과 같다.¹⁶⁾

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

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.

4. 결론

부하하는 전기장의 세기에 따라 ER유체에 발생하는 ER효과를 규명하기 위해 채널사이의 ER유체 유동상태를 가시화 하였고 이때 발생한 차압을 측정

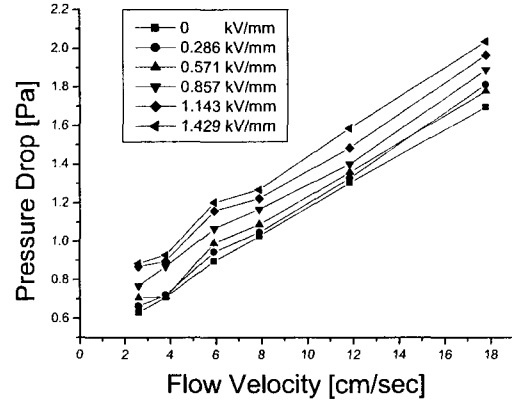


Fig. 7 Pressure drop of ER fluid

하여봄으로써 여러 가지 비선형 거동의 원인을 규명하였다. 전기장의 세기가 커지면 클러스터의 크기가 커지고 락업현상이 발생하여 매우 불안한 압력강하가 발생한다. 또한 항복응력의 변화율은 전기장의 세기에 따라 달라지고 전기장의 세기가 일정 이상 커지면 더 이상 증가하지 않는다. 따라서 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), 제24권, 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.