

## 가시화를 통한 ER유체의 클러스터 형성 구조에 관한 연구

이 은 준\* · 박 명 관†

(2000년 11월 14일 접수, 2001년 9월 18일 심사완료)

### A Study on the Mechanism of Clusters Formation of ER Fluid Through Visualization

Eun-Jun Rhee and Myeong-Kwan Park

**Key Words** : ERF(전기유변유체), ER Effects(전기유변효과), Bingham Behavior(빙햄거동) Visualization(가시화), Cluster(클러스터)

#### Abstract

Electrorheological fluids(ERFs) show a rapid and reversible increase in apparent 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. As result, the behavior of ER fluids is nonlinear at low shear rate with overshoot area because it is different to form the clusters according to the strength of electric field. The gap of electrodes becomes narrow because of the cluster layer occurrence near to electrodes in any conditions.

#### 1. 서 론

ER유체(Electrorheological fluids)는 가해지는 전기장의 세기에 따라 걸보기 점도가 변하는 유체를 총칭한 것으로, 이러한 현상을 ER효과 또는 Winslow 효과라고 부른다.<sup>(1)</sup> 최근 가제어성 유체(Controllable Fluids)의 관심이 높아지면서 댐퍼, 밸브, 클러치 및 브레이크 시스템, 펌프 등 많은 분야에 걸쳐 ER유체를 적용하기에 이르렀다. 알려진 바와 같이 ER유체는 전기장의 부하만으로 고상과 액상간의 가역 변화가 가능하고 응답속도가 수 ms로 매우 빠르기 때문에 기존의 기계

시스템이 가지는 장비의 복잡성으로 인한 소음, 진동, 고장 등의 문제를 간단히 해결할 수 있으므로 적용 장치에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 ER유체를 장치에 응용하기 위해, 대부분 ER유체의 거동을 Bingham 거동이라고 가정하고 사용하기 때문에 실제 사용에서 많은 차이를 일으키고 있다. ER유체의 경우 거시적 관점에서는 Bingham 거동과 매우 유사한 특성을 보이지만 미시적 관점에서는 많은 차이점이 있으므로 이를 해석하기 위한 연구가 이론과 실험을 통해 여러 방면으로 시도되고 있다.

ER유체의 거동 특성을 해석하기 위해 Tada Shigeru와 Tsukiji Tetsuhiro<sup>(2,3)</sup> 등은 평판내의 ER유체 유동 실험을 통해 전기장에 의한 걸보기 점도와 항복응력의 변화를 연구하였다. 또한 C. W. Wu, Tetsuhiro Tsukiji<sup>(4,5)</sup> 등은 부하한 전기장을 DC와 AC로 구분하여 이때 발생하는 현상을 나

\* 회원, 부산대학교 기계기술연구소

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계기술연구소 및 기계공학부

E-mail : mkpark1@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2464 FAX : (051)514-0685

타내었다. 수치해석 기법을 통해 입자 거동을 수치모사 하거나 가시화를 통해 여러 가지 현상의 고찰을 시도한 연구로써 Naoyuki Takeuchi, R. Tao<sup>(6,7)</sup> 등이 전기장 부하에 의한 클러스터 형성을 수치 모사를 통해 나타내었으며 Yasushige Mori<sup>(8)</sup>는 입자크기에 따른 ER효과를 연구하였다. 이러한 연구들은 수치 해석을 응용하여 유동장의 해석이나 클러스터를 이루는 입자들의 운동을 모사하고 있으나 여러 가지 비선형 요소들을 선형적으로 근사시킨 지배방정식에 의해 수치모사 된 것이므로 실험 결과와는 다소 차이를 보이고 있다. Takeshi Tomiuga<sup>(9)</sup>는 입자의 클러스터 형성 과정을 가시화를 통해 나타내었다. 그러나 낮은 전단 속도 영역에서 발생하는 ER유체의 비선형 거동의 원인을 알아내지는 못하였다.

대부분의 ER유체를 응용한 장치에 관한 연구는 ER유체를 Bingham 유체로 가정한 지배방정식에 기초하여 이루어진다.<sup>(10,11)</sup> 그러나 분산계 ER유체의 경우, 낮은 전단속도 영역에서 비선형적으로 거동하기 때문에 시스템이 불안정한 작동영역을 가지게 되어 원하는 동작을 얻기가 매우 어렵다. 이 때문에 처음부터 비선형 거동이 발생하는 낮은 전단속도 영역을 제외한 구간을 작동영역으로 한정하거나<sup>(12)</sup> 구간별로 제어 기법을 달리 하는 방법<sup>(13)</sup> 등의 향상된 제어기법의 적용을 시도하고 있으나 기본적인 지배방정식에 의한 모델링 오차로 인해 여전히 세부적 적용에는 문제를 안고 있다.

본 연구에서는, ER효과가 발생하는 메커니즘을 규명하기 위해 사각 채널 내부의 ER입자의 거동을 가시화 하였다. 이때 채널 양 끝단부에서 발생한 압력강화와 전기장의 세기와의 관계를 나타내었다. 채널 내부의 전극 주위에 형성되는 클러스터들의 형성과 성장, 파손의 과정을 가시화 하였으며 이를 통해 전기장의 세기에 의한 ER입자의 클러스터 형성 모습을 관찰함으로써 전기장에 세기에 따라 압력강화의 증가 원인을 나타내었고 전기장의 세기가 유체 점도와 항복응력에 미치는 원인을 나타내었다. ER유체의 유동에 의한 클러스터 형성과 파손, 성장 등의 과정을 가시화하고 이때 발생하는 압력차를 측정하여 클러스터 형성에 의한 전단응력의 변화를 고찰함으로써 낮은 전단 속도 영역에서 발생하는 비선형적인 압력강화의 발생 원인을 나타내었다.

## 2. 실험장치 구성 및 실험방법

본 연구에서 사용한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 서보 모터로 실린더 내부의 ER유체를 사각 채널 속에 주입한다. 이때 채널의 전극에 연결된 고전압 발생장치를 사용하여 전기장의 세기를 증가시키면서 그 때 채널 양 끝단에서 발생한 차압을 측정하고 전극 주위에 발생하는 클러스터의 형성과 성장, 파손 등의 과정을 비디오 카메라로 기록하였다.

사용한 채널은 폭이 7mm, 길이가 120mm, 간극이 2mm이며 이때 사용한 전극의 길이는 50mm이고 채널의 중앙에 위치시켰으며 클러스터 형성의 가시화를 위해 채널의 위·아래 부분은 투명한 유리를 사용하였다.

ER유체는 강 염기성 음이온 교환수지와 다우코닝사의 실리콘 오일(비중 0.964) 100cst을 혼합하여 만들었다. 음이온 교환 수지의 모양은 Fig. 2와 같이 완전구의 형상을 하고 있다. 입자 크기의 분포는 Table 1과 같으며 평균직경은 473.19 μm 이다. ER입자의 운동을 가시화하기 위하여 비교적 큰 지름의 입자를 사용하였고, 농도는 0.5wt%로 낮게 설정하였다.

전기장의 세기는 0kV - 10kV까지 1kV 간격으로 부하하였고, 이때 유입되는 ER유체의 속도에 대해 ER유체의 유동 및 클러스터 형성을 관찰하였다.

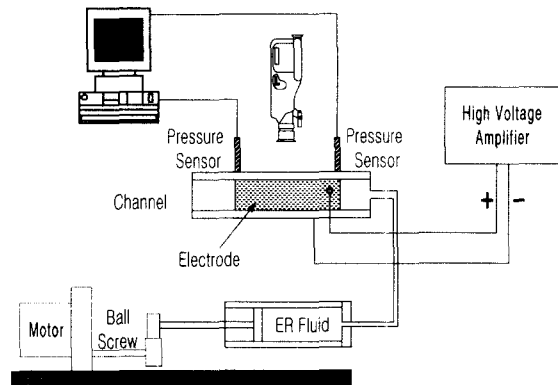


Fig. 1 Experiment setup

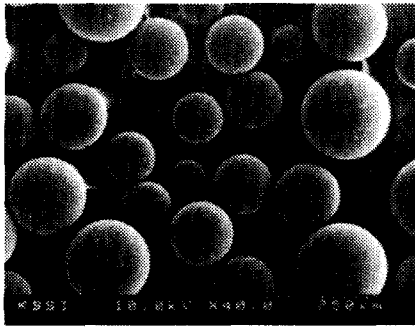


Fig. 2 ER particles

Table 1 Distribution of ER particle size

Size Low [ $\mu\text{m}$ ]	Size High [ $\mu\text{m}$ ]	Content [%]
140.58	163.77	0.01
163.77	190.80	0.03
190.80	222.28	0.14
222.28	258.95	0.53
258.95	301.68	1.77
301.68	351.46	5.33
351.46	409.45	13.33
409.45	477.01	30.99
477.01	555.71	47.87

### 3. 실험결과 고찰

#### 3.1 클러스터 형성

ER유체의 전단응력의 발생은, 유체에 전기장을 부하하면 ER입자에 분극현상이 발생하여 클러스터를 형성하게 되고 이때 형성된 클러스터에 의해 유체 유동이 방해받기 때문에 일어난다. 분극현상은 ER입자의 종류에 따라 약간의 차이가 있다. ER입자에 수분을 포함한 함수계의 경우, 전기장을 부하하기 전에는 이온이 입자 표면에 흡착한 상태로 존재하여 전기 이중층을 구성하고 있다가 전기장을 부하하면 전하의 치우침이 생겨 양전하 중심과 음전하 중심이 어긋나고 전기 쌍극자를 형성하여 발생한 인력에 의해 클러스터를 형성한다. 그러나 ER입자가 수분을 포함하지 않는 비수계의 경우는, 전기장이 부하되기 시작하면 자기 자신이 분극하여 클러스터를 일으

키게 된다. 이러한 차이로 인하여 ER입자가 수분을 포함한 경우가 포함하지 않은 경우보다 더 큰 ER효과를 나타내게 되지만 온도 변화에 따른 수분함량의 변화로 인해 성능의 변화를 초래할 수 있다. 본 연구에서는 ER입자의 수분을 완전히 제거한 비수계 입자를 사용하였다.

#### 3.1.1 클러스터 형성의 변화

ER유체에 전기장이 가해지면 ER입자에 분극현상으로 인해 클러스터가 형성된다. Fig. 3은 전기장을 6kV 가한 상태를 0.1초 간격으로 나타낸 것이다. ER입자들이 전극 전체에 걸쳐 고루 분포되어 있다가 전기장이 가해지면 클러스터를 형성하고 점차 클러스터의 크기가 커지는 것을 알 수 있다.

#### 3.1.2 전기장 세기에 의한 클러스터 형성 모습

Fig. 4는 전기장의 세기에 따른 클러스터 형성 모습을 나타낸 것이다. ER유체에 가해지는 전기장의 세기에 따라 클러스터들의 형상이 조금씩 차이를 보이고 있다. 낮은 전기장 영역에서는 전극 전극사이에 클러스터가 가늘고 긴 모양을 형성하고 있지만 높은 전기장에서는 클러스터들의 크기가 커질 뿐만 아니라 전극주위로 집중되는 현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다.

#### 3.1.3 클러스터 층의 발생

ER입자에 유동이 가해지면 클러스터들은 형성, 성장 및 파손의 단계를 계속해서 거치게 된다. 특히 전기장의 세기와 유체 유동의 관계에 따라 전극 주위에서는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 ER입자의 층이 생기고 유동은 그 유체 층 사이에서만 일어나므로 마치 유로의 폭이 좁아지는 효과를 가지게 된다.

클러스터 층의 발생은 입자의 결합력보다 유체 유동에 의한 힘이 작을 때 일어난다. Fig. 6은 클러스터 층의 발생 조건을 나타낸 것인데 조건에 따라 클러스터 층이 발생하는 영역과 발생하지 않는 영역으로 나뉘게 되며 그 구간은 전기장의 세기와 유체의 유속에 의해 결정된다. 그래프 내의 직선은 클러스터 층의 발생 조건의 경계를 의미한다. 따라서 층류영역에서 사용되는 장치의 지배방정식에는 이러한 클러스터 층의 형성에 관한 내용이 반드시 고려되어야 할 것이다.

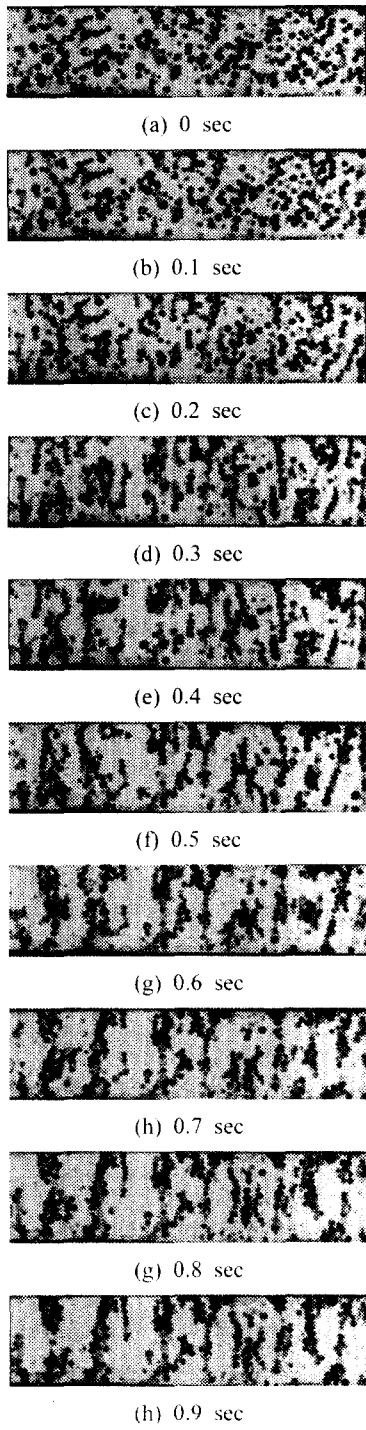


Fig. 3 Process of ER cluster formation without flow (6kV / 0.1sec Step)

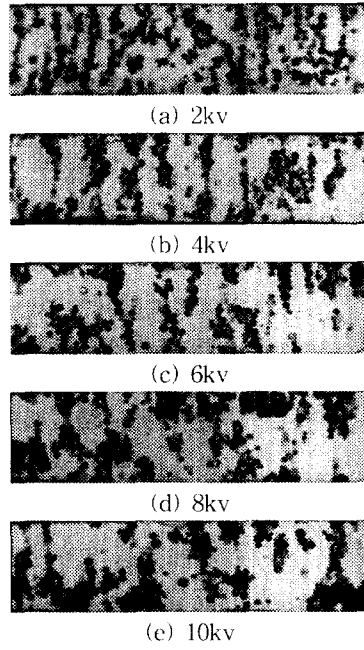


Fig. 4 Cluster formation without flow

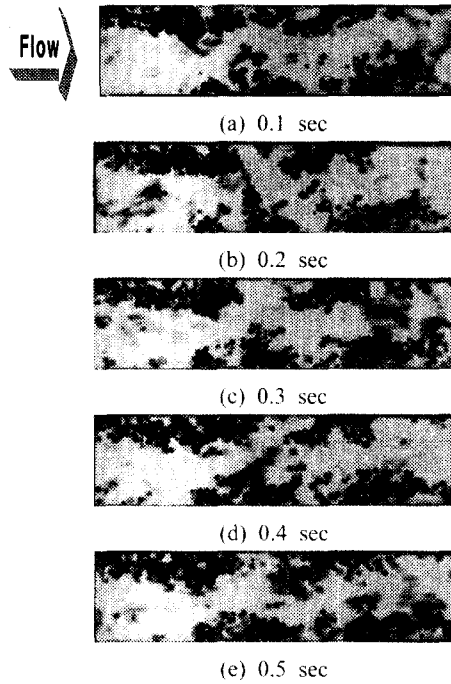


Fig. 5 Formation of cluster layer and flow ( 8kV , 5.9cm/s )

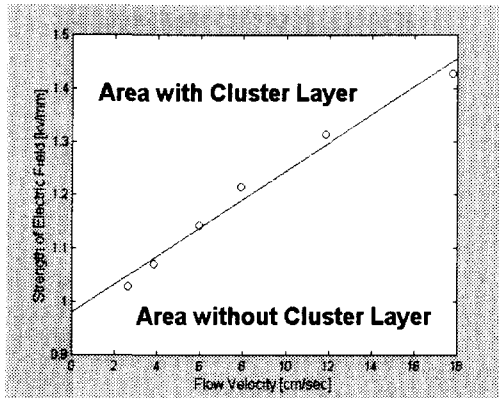


Fig. 6 Occurrence of cluster layer

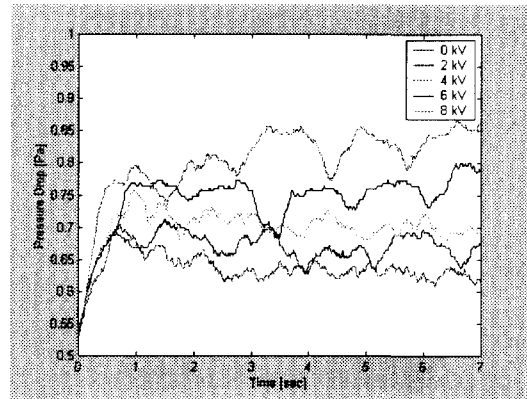


Fig. 7 Transition state (Flow velocity=2.6cm/s)

3.2 압력강하의 변화

3.2.1 유동에 의한 압력강하의 연속적인 변화

채널에 전기장을 부하하고 클러스터 형성이 완료된 후 유동을 일으키기 시작하면 전기장의 세기에 따라 Fig. 7과 같이 압력강하가 발생한다. 부하한 전기장의 세기가 증가하면 채널에서 발생한 압력강하가 전체적으로는 증가하고 있지만 그 양상은 약간의 차이를 보이고 있다. 부하한 전기장의 세기가 작을 경우 압력강하 변화의 진폭이 작고 전기장 세기가 커질수록 진폭이 커진다.

부하하는 전기장의 세기를 증가하면 입자간의 상호 결합력이 더 커지므로 유체 유동에 의한 압력강하의 변화가 증가하지만 변화폭이 심해지는 것을 알 수 있다. 이것은 전기장의 세기가 증가하면 입자간에 발생하는 결합력의 크기가 증가하여 클러스터의 형성, 성장 그리고 파손시 발생하는 저항력의 차이가 심해 유동에 불규칙적으로 영향을 미치기 때문이다.

3.2.2 전기장의 세기와 압력강하

전기장 부하에 의해 클러스터가 완전히 형성된 후 유체 유동에 의해 발생하는 채널 양 끝단부의 차압을 측정하여 평균을 취하면 Fig. 8과 같이 나타난다. 거시적으로 Bingham 거동과 매우 유사한 거동 특성을 보이고 있지만 유속이 느린 구간에서는 오버슈트 현상이 두드러지게 나타나서 Bingham 거동과는 다소 차이를 보이고 있다. 유속이 느린 구간의 압력강하의 변화는 유체 유동력이 클러스터의 점착력보다 작은 구간, 유동력이 클러스터의 점착력과 평형을 이루는 구간,

그리고 유동력이 클러스터의 점착력보다 큰 구간 등의 3가지 영역으로 구분하여 설명할 수 있다.

특정 유속구간에서의 오버슈트 현상의 원인을 알아보기 위해 유속을 증가시켜 가며 오버슈트 현상이 발생하는 유속 근처에서 클러스터의 형성, 성장 그리고 파손등의 과정을 가시화 하였다. Fig. 9는 클러스터의 점착력이 유동에 의한 힘보다 큰 구간에서 클러스터 파괴, 형성 및 성장 등의 과정을 보여준다. 이 영역은 클러스터가 형성된 채널 내부에 유동이 낮은 속도로 막 일어나기 시작한 순간을 말한다. 유동이 시작되면 점착력이 가장 약한 유로의 중심 부분부터 클러스터의 파손이 발생하지만 클러스터 덩어리가 비교적 큰 부분 전극 주위에서는 유동에 의한 힘에도 불구하고 그 형상은 그대로 유지되고 있음을 알 수 있다. 이 구간에서는 유동에 의해 발생하는 압력강하의 변화는 매우 낮은 속도로 증가한다. Fig. 10은 클러스터의 점착력과 유동력의 균형이 깨어지기 시작한 구간에서 클러스터의 형성과 파괴 등의 과정을 나타내고 있다. 클러스터의 점착력이 유체의 유동력보다 클 경우에는 유동의 저항력이 커져서 채널 양 끝단에서 발생하는 차압이 계속 증가하지만 어느 순간에 힘의 균형이 깨어지면 큰 덩어리의 클러스터가 움직이기 시작하면서 압력강하의 증가율은 오히려 감소하게 된다. Fig. 11은 클러스터의 점착력 보다 유체의 유동력이 큰 경우를 나타내고 있다. 이 구간에서는 유체 유동에 의해 압력강하가 다시 상승하고 있으며 채널 내부의 클러스터의 전극 주위에 붙어 있는 약간의 클러스터들을 제외하고는 모두 유체 유동에 의해 모두 파손되어 있는 상태이다.

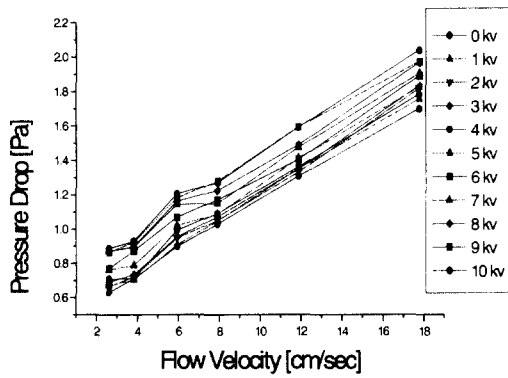


Fig. 8 Pressure drop of ER fluid

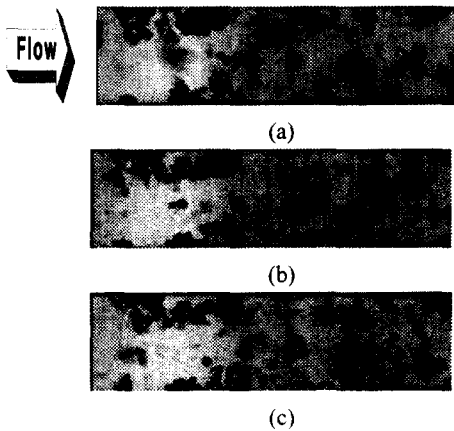


Fig. 9 Formation and breaking of ER cluster (Flow velocity = 2.6 cm/s near)

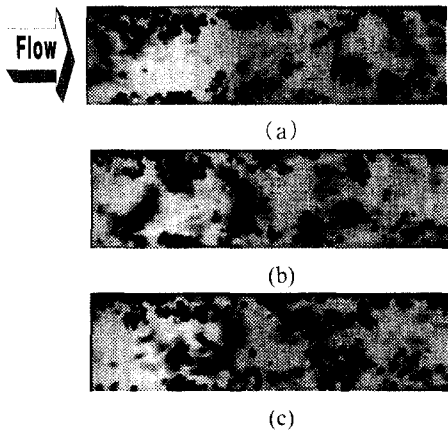


Fig. 10 Formation and breaking of ER cluster (Flow velocity = 5.9 cm/s near)

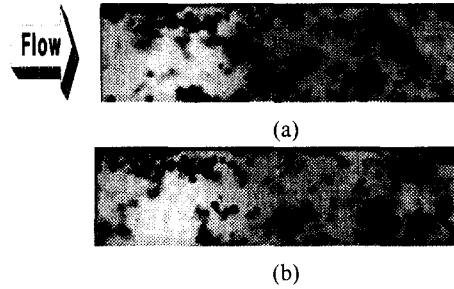


Fig. 11 Formation and breaking of ER cluster (Flow velocity = 7.9 cm/s near)

이때는 유로의 폭이 일정하게 계속 유지되며 압력강하의 증가도 꾸준히 이루어지고 있다. 따라서 낮은 전단속도 구간에서 작동되는 시스템을 구성할 경우, 클러스터 형성에 의한 압력강하의 변화가 Bingham유체와는 분명한 차이가 있으므로 이러한 점을 고려하여 지배방정식을 도출하거나 비선형적 구간을 작동영역에서 제외하는 것이 필요하다.

Fig. 8의 결과에 의해, 채널에서 발생한 전단응력을 유속과 전기장의 향으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y \tag{1}$$

여기서  $\eta$ 는 유체의 점도,  $\dot{\gamma}$ 는 전단변형을 그리고  $\tau_y$ 는 항복응력을 나타낸다.

Fig. 12는 전기장의 부하에 따른 유체 점도의 변화를 나타낸 것이다. 전기장의 부하에 의한 유체의 점도 변화는 거의 이루어지지 않고 있는데 이것은 용질로 사용한 ER입자의 크기가 용매로 사용한 실리콘 오일의 분자보다 훨씬 크기 때문에 전기장에 의한 클러스터의 형성이 점도변화에는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 전기장의 부하에 따른 항복응력의 변화를 나타낸 것이다. 항복응력은 변화는 전기장의 세기에 따라 크게 3 구간으로 나누어지는 것을 볼 수 있다. 전기장이 세기가 낮은 구간에서는 항복응력의 증가가 매우 낮고 일정 구간에 이르러서는 증가율이 급격히 증가하다가 다시 증가 폭이 처음과 같이 감소되는 모습을 볼 수 있다. 따라서 이 결과에 의해 식 (1)을 다시 구성하면 식 (2)와 같다.

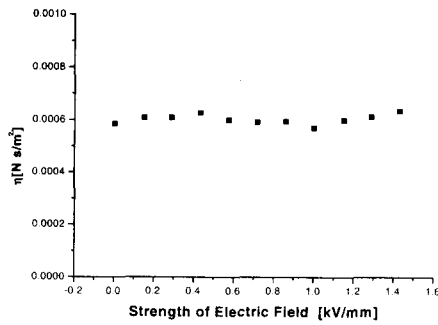


Fig. 12 Relation between viscosity and electric field

$$\tau = 0.0006 \dot{\gamma} + \begin{cases} 0.0038 & \text{for } E < 0.4 \\ 0.00325E + 0.0038 & \text{for } 0.4 \leq E \leq 1.0 \\ 0.00575 & \text{for } E > 1.0 \end{cases} \quad (2)$$

이것은 ER유체의 항복응력을 전기장의 함수로 나타낼 때 구간을 설정하여 나타내어야 함을 의미한다. 또한 전기장의 세기에 따른 ER유체의 항복응력의 크기는 어느 구간에 도달하면 더 이상 증가하지 않으므로 ER유체를 사용한 응용장치는 적용되는 전기장의 세기가 유체에 따라 정해져 있다는 것을 나타낸다. 즉 분산매 ER유체에서 발생하는 항복응력의 크기는 일정한 세기의 전기장 이후에서는 더 이상 증가하지 않으므로 응용장치의 설계시 이러한 점을 반드시 고려해야만 한다.

#### 4. 결론

ER유체에 부하하는 전기장의 세기에 따라 발생하는 ER효과를 규명하기 위해 투명전극 사이로 ER유체를 유동시킨 뒤 클러스터 형성과정을 가시화하고 이때 발생하는 압력 차를 측정함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 전기장의 세기가 커지면 ER입자의 클러스터 형성의 차이가 나타난다. 즉 전기장의 세기가 커지면 커질수록 ER입자의 클러스터들이 커지고 전극 주위에 클러스터 층이 생긴다.

(2) 유체 유동에 의한 힘이 입자의 점착력 보다 작을 때 전극 주위에는 클러스터 층이 발생하여 유로를 좁아지게 하는 효과를 나타낸다.

(3) 전기장의 세기가 증가하면 압력강하는 증가하지만 그 변화폭은 커지는데 이것은 전기장

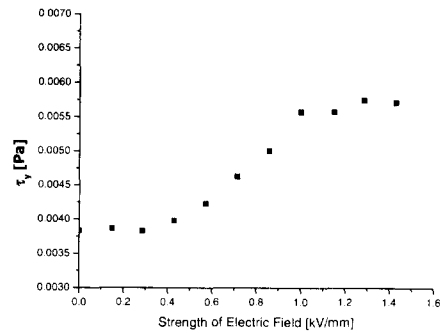


Fig. 13 Relation between yield stress  $\tau_y$  and strength of electric field

의 세기가 커지면 입자간에 발생하는 결합력의 크기가 증가하여 유동에 불규칙적으로 영향을 미치기 때문이다.

(4) 전기장 세기에 따른 항복응력의 변화는 전기장의 세기에 따라 다르다. 즉 전기장의 세기가 낮은 구간에서는 항복응력의 변화가 작게 일어나다가 중간 구간에서는 항복응력의 변화율이 증가하고 다시 높은 구간에 이르면 항복응력의 변화율이 감소한다.

(5) 낮은 전단 속도 영역에서는 압력강하의 증가 오버슈트 구간을 일으키게 되는데 이것은 유에 유동력이 클러스터의 점착력 보다 작을 때는 채널 내부에서 차압이 증가하다가 유체 유동력이 클러스터의 점착력보다 커지면 클러스터가 갑자기 파손되어 압력이 급격히 떨어지기 때문에 이러한 현상이 일어난다.

일반적으로, 거시적 관점에서 ER유체를 Bingham 거동이라고 가정하고 응용장치에 적용하지만 ER효과의 메커니즘은 분명 Bingham 유체와 다르기 때문에 일부 구간에서는 응용장치의 적용이 어렵게 된다. 따라서 ER유체의 거동이 Bingham 유체와 차이가 나는 명확한 원인의 규명에 의해 지배 방정식을 재구성하는 것이 필요하다.

#### 후기

본 연구는 부산대학교 학술연구조성비에 의해 수행되었습니다. 지원에 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Winslow, W. M., 1949, "Induced Vibration of Suspension," *J. Appl. Phys.*, Vol. 20, pp. 1137~1140.
- (2) Tada, S., Kabeya, N., Yoshida, H., Echigo, R., 1997, "Hydrodynamic Behavior of Electro-rheological Fluids," *일본기계학회논문집(B)*, Vol. 63, No. 613, pp. 2985~2992.
- (3) Tsukiji, T. and Utashiro, T., 1997, "Flow of ER Fluids between Two Parallel-Plate Electrodes for Sinusoidal Electric Fields," *일본기계학회논문집(B)*, Vol. 63, No. 608, pp. 1221~1228.
- (4) Tsukiji, T. Hori, K. I., 1997, "Flow Characteristics of Electrorheological Fluid," *Rheology and Fluid Mechanics of Nonlinear Materials ASME*, FED-Vol. 243/MD-Vol. 78, pp. 197~205.
- (5) Wu, C. W. and Conrad, H., 1997, "Theoretical and Experimental Considerations of Electro-rheological with DC and AC Fields," *Rheology and Fluid Mechanics of Nonlinear Materials ASME*, FED-Vol. 243/MD-Vol. 78, pp. 185~196.
- (6) Takeuchi, N. Park, M. K. Oshima, S. Yamane, R., 1997, "Formation of Clusters in ER Suspensions," *The 9th SEAD*, C12, pp. 489~492.
- (7) Tao, R. 1997, "Static and Dynamic Structures and Polarizable Fluids," *Rheology and Fluid Mechanics of Nonlinear Materials ASME*, FED-Vol. 243/MD-Vol. 78, pp. 151~158.
- (8) Mori, Y. Tsunamoto, T. Nakayama, H., 1999, "Computer Simulation of Electrorheological Fluids in the Binary System of Particles Size," *J. Modern Physics B.*, Vol. 23, Nos. 14, 15, &16, pp. 1822~1827.
- (9) Tomiuga, T., Okamoto, K., Madarame, H., 1999, "Visualization Study on Chain Structure in Electro - Rheological Fluids," *J. Modern Physics B.* Vol. 23, Nos. 14, 15, &16, pp. 1783~1790.
- (10) 이현균, 최승복, 장유진, 한승직, 이성범, 2000, "실차 실험을 통한 ER현가 장치의 성능평가." *대한기계학회 논문집(A)*, 제24권, 제2호, pp. 347~354.
- (11) 최영태, 최승복, 2000, "복합형 ER 엔진마운트의 성능평가(I)," *대한기계학회 논문집(A)*, 제24권, 제2호, pp. 370~377.
- (12) Maemori, K. I. Naito, H., 1996, "Multiobjective Optimization of Vibration System with a Damper Using Electro-Rheological Fluid," *일본기계학회 (C)*, Vol. 62, No. 597, pp. 1726 ~ 1730.
- (13) Maemori, K. I. Morihara, T., 1996, "Optimum Design of Hydraulic Shock Absorber Using Electrorheological Fluid," *일본기계학회(C)*, Vol. 62, No. 603, pp. 4224~4229.