

전단 유동 하에서 전기유변유체의 과도응답 특성

최병하* · 남윤주** · 박명관†

(2008년 10월 13일 접수, 2009년 4월 17일 수정, 2009년 5월 6일 심사완료)

Transient Response of an Electrorheological Fluid in Shear Flow

Byung-Ha Choi, Yun-Joo Nam and Myeong-Kwan Park

Key Words : Electrorheological Fluid(전기유변유체), Transient Response(과도 응답), Characteristic Time Constant(시상수), Cluster Formation Time(클러스터 형성 시간)

Abstract

The transient shear stress response of an electrorheological fluid is investigated experimentally. The characteristic time constants of an electrorheological fluid sheared between two concentric cylinders were obtained under various electric field strengths and shear rates. Also, two experimental modes are adopted to investigate the effect of the shear flow on the dynamic behavior of the fluid; one is that the electric field is induced before shearing, and the other is the electric field is induced after shearing. From the difference in the response time between two modes, the cluster formation time were obtained. The response times were decreased with the increase of the shear rate, irrelatively of the electric field strength. The cluster formation time were monotonically increased with increase of shear rate, and thereafter, were converged with a certain value.

1. 서론

전기유변유체(electrorheological fluids, 이하 ER 유체)는 비전도성 유체 매질에 분극성이 강한 미세 입자들이 분산된 현탁액(suspension)이다. 이는 가해지는 전기장(electric field)의 세기에 따라 ER 입자(electrorheological particles)들이 전기장 방향으로 배열되어 사슬(chain) 또는 기둥(column)구조를 형성함으로써 다양한 유변학적 물성, 즉 겔보기 점도(apparent viscosity)를 얻을 수 있는 효과(Winslow 효과, ER 효과)를 가진다.⁽¹⁾ ER 효과로 인해 간단한 전기장의 제어만으로 유체 특성을 변화시킬 수 있으며 전기장 인가에 따른 유체 내의 입자구조형성

(cluster formation)의 응답이 수 ms 로 빠르게 나타난다. 이런 빠르고 가역적인 응답 특성은 ER 유체를 기반으로 한 응용장치를 개발함에 있어 중요한 요인이며, 이를 효과적으로 제어하기 위한 응답과 정에서의 입자 거동 메커니즘에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. ER 유체를 이용한 응용장치는 간단히 전기장을 인가함으로써 ER 효과를 낼 수 있기 때문에 기존의 기계 시스템에 비해 그 설계나 제작이 용이한 장점이 있다.

이러한 ER 유체의 특성을 이용한 다양한 분야에서 실용화를 가능하게 하기 위해서는 각각의 작동 모드에 따른 ER 유체의 응답 특성에 대한 해석이 필요하다. ER 유체의 작동모드에는 크게 전단 모드(shear mode), 유동 모드(flow mode), 압착 모드(squeeze mode)가 있으며, 각각의 모드에 따라 그 해석방법과 응용영역이 다르다.

ER 유체를 기반으로 한 응용 장치 개발을 위한 대부분의 연구에서는 ER 유체를 Bingham 모델을

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : mkpark1@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2414 FAX : (051)514-0685

* 부산대학교 기계공학부

** 회원, 부산대학교 기계공학부

사용하여 해석하고 있다. 거시적인 관점에서 ER 유체의 특성은 Bingham 거동과 유사하지만, 실제 응용은 아직 많은 문제점을 안고 있으며, 그 해결 방법에 대한 연구도 답보 상태에 머물러 있다.⁽²⁾ 특히 ER 유체응답의 과도영역, 즉 상대적으로 아주 낮은 전단영역에서는 Bingham 모델로 그 거동을 해석하기에 무리가 따른다. 그 가장 큰 이유는 ER 유체에서 나타나는 항복응력 및 유효점도, ER 입자들의 움직임과 빠른 응답 메커니즘에 대한 충분한 이해가 아직 이루어 지지 않았기 때문이다.

본 연구에서는 실험을 통해 다양한 전단속도 (shear rate)에 따른 ER 유체의 전단응력을 측정하였으며, 클러스터 형성과정과 전단응력과의 관계를 통해 ER 유체의 과도응답 특성을 해석하고자 한다. 클러스터 구조의 생성과 성장과정은 전단응력의 변화에 영향을 미치며, 전단응력의 응답시간은 전기장 강도(electric field strength), 전단속도(shear rate), 온도(temperature), 체적 분율(particle volume fraction), 진동수(frequency) 등과 관련이 있다.

전기장의 인가로 인해 클러스터 구조가 형성되며 유체역학적 힘(hydrodynamic force, 이하 유체력)이 가해졌을 때 전단응력의 상승이 시작된다. 전단응력의 상승 영역에 있어서 전기장과 유체력의 상호작용에 의해 클러스터 구조가 형성되며 클러스터의 생성, 파괴, 재형성의 평형 점에서 정상상태에 이른다. 전기장 인가시의 ER 유체의 전단응력은 전기장과 전단변형이 가해진 입자 구조와 밀접한 관련이 있다. 따라서 클러스터 구조 형성의 응답시간은 전기장인가에 의한 입자간의 정전기적 인력과 유체력에 의한 점성 저항력의 상호작용에 의한 것으로 해석된다.

ER 유체의 동적 응답 특성에 관한 기존의 연구들은 다양한 방법을 통해 시도 되었으며, 이는 크게 실험을 통한 유변학적 물성 측정으로 응답시간을 알아보는 방법(experiment researches), 가시화 또는 시뮬레이션을 통해 클러스터 형성과정을 살펴보는 방법(optical methods), 이론적인 연구(theoretical researches)등으로 나누어 진다. Wang⁽³⁾ 등은 시뮬레이션을 통해 ER 유체의 과도응답 특성을 연구하였고 전단속도와 체적 분율이 증가할수록 응답시간이 짧아 진다고 밝혔다. 시간에 따른 응집된 입자구조의 크기는 증가하다가 일정하게 수렴하며, 이런 구조적인 성장과 전단응력의 상승에는 밀접한 관련이 있다. 전기장이 인가되지 않았을 때의 ER 입자들의 불규칙적 분산 상태로부터 전기장이 인가되었을 때의 사슬/기동 구조를 형성하기까지

구조적인 변화는 상 변화 과정을 표현함에 있어 중요한 요인이다. Tian⁽⁴⁻⁸⁾ 등은 압착모드, 전단모드, 유동모드 각각에서의 ER 유체의 응답특성에 관해 연구하였으며, 응력의 상승과 감소를 입자 구조의 변형과 연관해서 설명하였다. Wen^(8,9) 등은 ER 효과에 의한 클러스터의 성장을 가시화를 통해 연구하였다. 정적인 ER 유체는 전기장이 인가되면 불규칙적인 분산상태에서 준 안정상태의 사슬구조를 형성하며 시간이 지남에 따라 안정된 클러스터 구조를 형성한다. 정적인 가시화를 통해 입자 응집 시간을 측정할 수 있었지만, 이를 바탕으로 실제 작동모드의 ER 유체의 거동을 예상하기에는 한계가 있다. Vieira⁽¹⁰⁾ 등은 전단유동을 하는 ER 유체를 층상구조를 통해 설명하였다. 정전기적 인력과 유체역학적 힘에 의해 전단방향으로의 고리구조가 형성되며, 그 고리구조간의 유로 폭이 좁아지는 구조적인 변화를 통해 전단응력이 상승함을 밝혀냈다. Hanaoka⁽¹¹⁾ 등은 직류 전기장이 인가된 ER 유체의 내부구조와 그 특성에 관한 연구를 하였다. 항복응력은 ER 클러스터가 파괴되기 직전의 응력 임을 가시화를 통해 입증했으며, 전극간의 간극이 ER 유체의 항복응력을 결정하는 중요한 요인이라고 말하고 있다. Wu⁽¹²⁾ 등은 응답시간의 온도와 체적분율에 의한 영향을 실험을 통해 검증하였다. 응답시간은 온도가 15~50°C까지 증가함에 따라 약간 감소하며, 체적분율이 증가함에 따라 응답시간은 감소하는 것으로 밝혀졌다. Nava⁽¹³⁾ 등은 DC 와 AC 전압에서의 ER 유체의 응답을 비교하였으며, DC 전기장에서의 응답시간이 AC 전원에서의 응답시간보다 빠르다는 결과를 얻었다.

ER 유체의 동적 응답특성에 대해 조사한 기존의 논문들에서는 클러스터 구조의 형성과정과 ER 유체의 유변학적 물성이 바뀌는 과도영역의 연관성을 언급하고 있지만 이를 세부적으로 규정짓고 있지는 않다. 정적인 상태에서의 ER 입자는 전기장 인가하면 입자간에 분극화가 일어나고 분극화된 입자들은 서로 응집하여 사슬/기동형태의 클러스터구조를 형성하며 이 과정을 입자응집과정(aggregation)이라고 정의한다. 또한 유체력에 의한 전단력이 없다면, 응집된 입자들은 보다 안정적인 구조로 성장하며 이 과정을 입자조밀화과정(densification)이라고 정의한다. 하지만 유체력이 가해지면 입자조밀화에 의해 생성된 클러스터만큼 강한 구조의 클러스터를 형성하지는 않지만 전기장과 유체력의 상호작용에 의한 평형상태(equilibrium state)를 이루는 클러스터 구조를 형성하며, 이 상태

Table 1 Basic properties of TX-ER8

Physical properties	Value
Density	1.6 g/cm ³ (25 °C)
Viscosity	115mPa·s(25 °C)
Bulk modulus	8.3×10 ⁻⁴ cc/cc/°C
Water contents	0.2wt%
Current density(200/sec)	12.5 μ A/cm ²
Yield stress(200/sec)	5000Pa < 4kV/mm DC

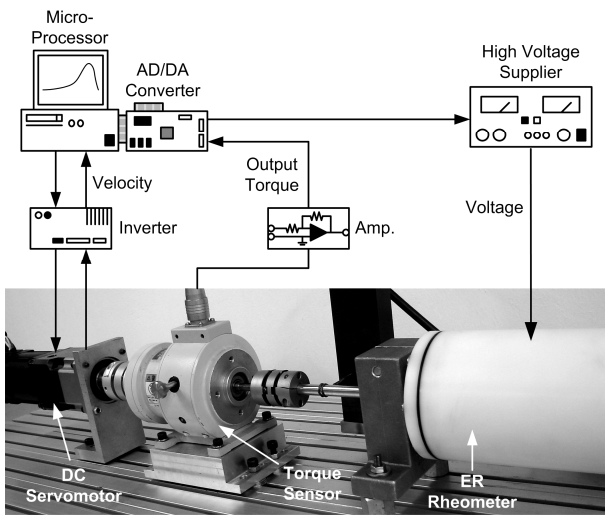


Fig. 1 Schematic of the test system of ER fluid sheared between two concentric cylinders

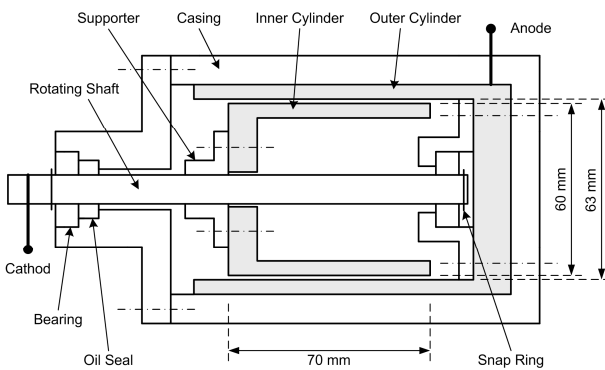


Fig. 2 A cross section of the two concentric cylinder type rheometer

에서 ER 유체는 정상상태의 토크를 가진다. 시간에 따른 클러스터 형성 과정은 크게 입자응집과정과 입자조밀화과정으로 구분할 수 있으며, 이런 클러스터형성 구조에 따라 ER 유체의 응답성에도 분명한 차이가 있다. 전단모드에서는 유동모드에서와 달리 입자조밀화과정이 뚜렷이 나타나지 않으며, 입자응집과정에 의해 그 응답특성이 결정된다.⁽¹⁴⁾ 따라서 본 연구에서는 클러스터구조의 생성 차이를 주기 위한 실험조건을 설정하였다. 두 실

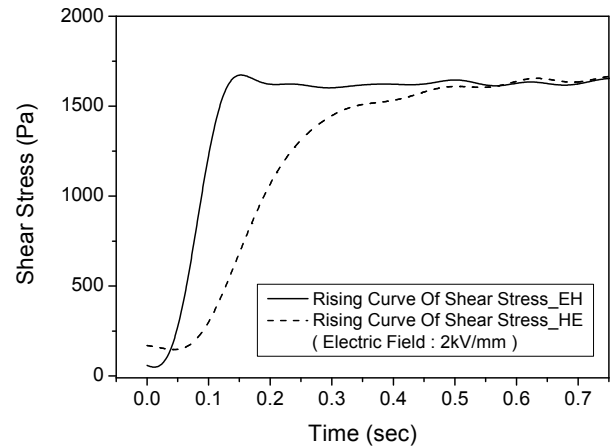


Fig. 3 Rising curve of shear stress

험조건에서 전단응력을 측정하였고, 그 응답시간의 차이로부터 클러스터 구조의 차이에 따른 응답시간과 클러스터 형성 시간을 얻어 낼 수 있었다.

2. 본 론

2.1 실험 장치의 구성

본 연구에서는 ER 유체의 전단응력 응답시간을 측정하기 위하여 Nippon Shokubai사에서 제작한 TX-ER8을 실험유체로 사용하였다. TX-ER8은 분산형 ER 유체로 분산용매로는 전기절연유인 플루오르(fluorine)오일과 실리콘(silicon)오일을 혼합한 용액을 사용하며, 분산입자로는 술폰화된 폴리머 입자(sulfonated polymer particle)가 사용되었다. TX-ER8의 특징은 Table 1과 같으며, 실험은 실온(25 °C)에서 이루어 졌다. 실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 고전압 발생기로부터 DC 계단입력 전압의 인가시기와 모터의 On/Off 시기를 제어하여 다양한 전기장 강도와 전단속도의 조건을 만들어 주었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 ER 유체의 전단응력의 상승시간 측정을 위해 동심 실린더형 점도계가 제작되었다. 내부 실린더와 외부 실린더의 간극을 1.5 mm로 설계하였으며, 내부 실린더에 (+)전압을 걸어주었다. 그리고 전단영역의 길이는 70 mm로 설정하였다. 간극을 일정하게 유지하고 실린더간 유격을 최소화하기 위해 내부 및 외부 실린더는 함께 축에 연결되었으며 외부 실린더는 축과 절연되도록 하기 위해 공학용 플라스틱으로 제작된 연결부위로 체결하였다. 내부 실린더는 관성부하를 줄이기 위해 안쪽을 파낸 형상으로 설계되었으며, 반경은 30 mm로 제작되었다. 제작된 실린더 형의 점도계는 디스크 형에 비해 그 전단면적이 넓으므로 큰 전단응력을 얻을 수 있다.⁽¹⁵⁾

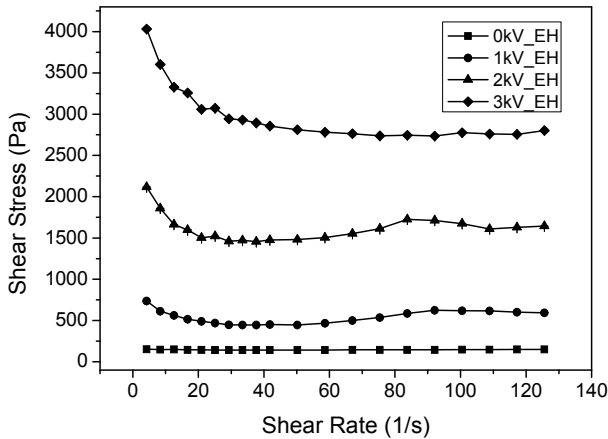


Fig. 4 Shear stress of ER fluids where Electric field is induced before shearing

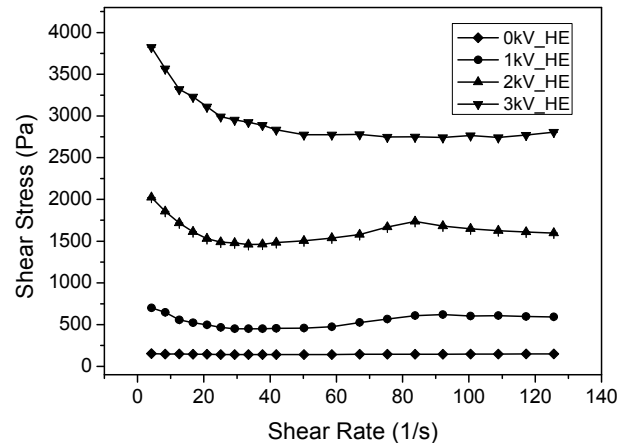


Fig. 5 Shear stress of ER fluids where Electric field is induced after shearing

2.2 실험 방법

전기장의 세기는 0 kV ~ 3 kV 까지 1 kV 간격으로 부하하였고, 전단속도는 4 s^{-1} ~ 125 s^{-1} 까지 변화시켜 주었다. 외부 실린더는 정지되어 있고, 내부 실린더는 토크 센서에 연결되어 있으며 일정한 각 속도로 구동 된다. 여기서 전극 사이의 간극이 내부 실린더의 반지름에 비해 충분히 작다면 회전하는 실린더 장치는 평행 평판계로 근사화될 수 있고, 전극 사이의 속도 분포는 다음과 같은 식으로 나타난다.

$$\frac{du}{dy} = \frac{r\omega}{h} \quad (1)$$

여기서 ω 는 모터의 각속도, r 은 내부 실린더의 반지름 그리고 h 는 전극 사이의 간극을 나타 낸다. Fig. 1 의 토크 센서에서 측정된 토크로부터 ER 유체의 전단응력을 산출하는 식은 다음과 같다.

$$\tau = \frac{T}{2\pi r^2 L} \quad (2)$$

T 는 모터의 회전에 의한 토크, L 은 내부실린더와 외부실린더 사이의 전단영역 길이를 나타낸다.

클러스터 형성의 차이를 주기 위한 두 가지 실험조건은 전기장과 유체력의 인가시기를 조절함으로써 다음과 같이 설정되었다. 초기상태에서 전기장을 인가한 후 모터를 가동시켜 유체력을 가해주는 것과 모터가 회전하고 있는 가운데 전기장을 인가하여 실험조건을 만들어 주었다. 두 조건에서의 시간에 따른 전단응력이 측정되었으며, 얻어진 데이터를 통해 정상상태 전단응력에 이르는 시상수(characteristic time constant)를 측정하여 응답시간을 도출하였다.

2.3 실험 결과 및 고찰

Fig. 3 은 3kV/mm 의 전기장 입력에서 실험조건에 따른 전단응력 상승곡선의 차이를 나타낸 그래프이다. 전기장을 인가한 상태에서 유체력을 가한 경우가 유체력을 가한 상태에서 전기장을 인가하는 경우보다 전단응력의 상승곡선이 상대적으로 가파르게 나타났고, 오버슈트 현상(overshoot phenomena)가 발생함을 확인되었다. 전단속도에 따른 전단응력은 Fig. 4 와 Fig. 5 의 그래프와 같고, 3 회에 걸친 실험결과는 오차 없이 동일한 경향을 보였다. 전단응력은 전기장 강도에 비례하여 증가하였고 전단속도의 영향은 거의 없었지만, 낮은 전단영역에서의 전단응력은 다소 크게 측정됐다.

상대적으로 낮은 전단속도에서는 가해지는 유체력이 작으므로 클러스터 형성이 용이하고, 정지상태로부터 실린더가 회전하려는 순간에 클러스터 구조와 실린더의 마찰로 인해 클러스터 구조를 파괴하는데 보다 큰 토크가 필요하다. 즉, 낮은 전단영역에서는 유체력이 없는 정지상태에서 ER 유체의 클러스터구조와 흡사한 형태의 클러스터 구조를 형성한다. 이때의 클러스터와 실린더와의 마찰은 정지 마찰에 가깝게 작용하며, 그 항복응력도 정적 항복응력(static yield stress)의 영향이 크다. 또한 전단속도가 증가함에 따라 클러스터 구조는 낮은 전단영역에서의 클러스터에 비해 덜 조밀하고

그 강도가 약한 클러스터 구조를 형성한다. 이때의 항복응력을 동적 항복응력(dynamic yield stress)이라고 한다.⁽¹⁶⁾ 전단응력의 결과 그래프로부터 정상상태에서는 전기장과 유체력의 인가 조건에 따른 차이는 없었고, 시간에 따른 전단응력변화는 지수함수적인 상승곡선을 그리며 정상상태에서의 전단응력과 함께 다음과 같이 표현된다.

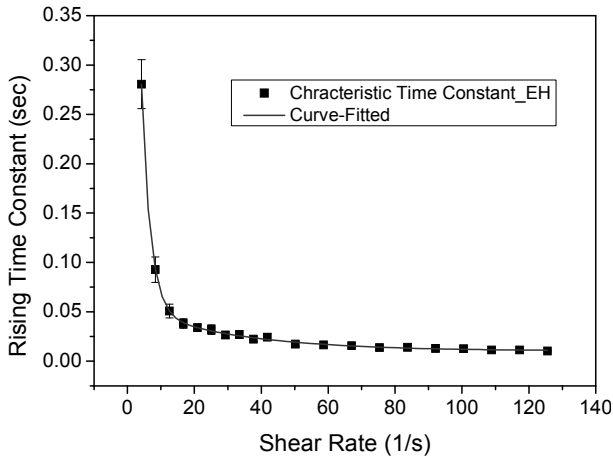


Fig. 6 Rising time constant of ER fluids where Electric field is induced before shearing

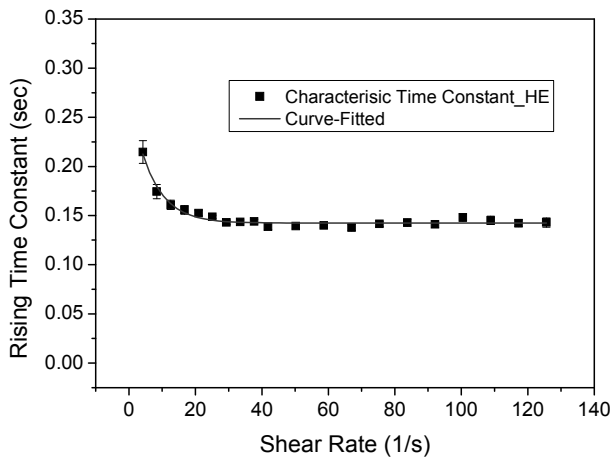


Fig. 7 Rising time constant of ER fluids where Electric field is induced after shearing

$$\tau(t) = \tau_s (1 - \exp(\frac{t_0 - t}{T_c})) \quad (3)$$

여기서 τ_s 는 정상상태에서의 전단응력, t_0 는 초기 시간 그리고 T_c 는 전단응력 상승시간의 시상수를 나타낸다. Fig. 6 과 Fig. 7 은 두 실험조건에서의 전단응력 상승의 시상수를 나타낸 그래프이다. 실험 결과 전기장 강도에 따른 응답시간의 차이는 거의 없었으며, 두 그래프는 1kV~3kV 에서의 결과값을 평균한 값이다. 과도영역에서의 응답시간은 전단 속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 즉, 유체력이 증가함에 따라 입자간의 충돌횟수 (collision chance)가 늘어나며, 이로 인한 정전기적 인력과 유체력의 상호작용력에 의해 응답시간이 단축된다. 또한 전기장을 먼저 인가했을 때의 응답이 전기장을 나중에 인가했을 때의 응답에 비해 단축됐으며, 이러한 응답시간의 차이는 실험조건

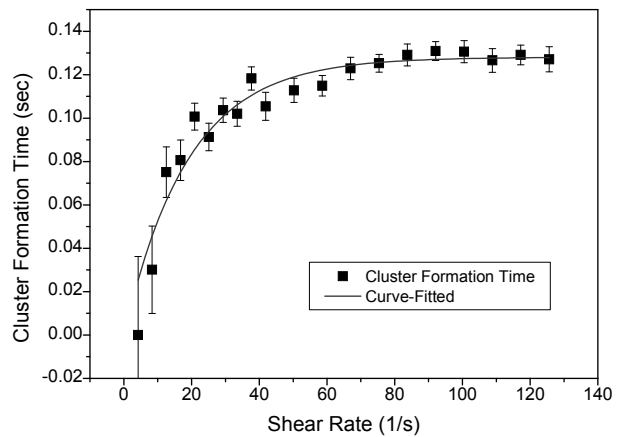


Fig. 8 Cluster formation time of ER fluid

에 따른 클러스터의 형성과정의 차이와 밀접한 연관이 있다.

전기장을 먼저 인가 한 경우는 정적인 ER 가시화 연구에서 이미 입증된 바와 같이 응집된 입자가 조밀해지는 안정적인 클러스터 구조가 형성된다. 이후 가해지는 유체력에 의해 클러스터는 항복점(yielding point)까지 인장(elongation)되고, 항복응력이상의 토크에서 파괴(destruction)된다. 토크 상승과정의 과도영역에서 전단응력은 항복영역 이전 (pre- yielding region)의 값이다. 따라서 전기장의 인가 이후 전단이 시작되는 실험조건에서의 응답시간은 클러스터 구조의 인장에 의한 변형 (deformation) 과정을 의미한다. 반대로 전단을 먼저 가해준 후 전기장을 인가한 실험조건에서는 유체력에 의해 이미 유동이 시작된 상태이며, 전기장에 의해 클러스터의 형성이 시작된다. 이 조건에서의 클러스터 형성과정은 안정된 구조의 클러스터 구조가 나타날 것이라고 기대하기는 어렵다. 하지만 이 과정에서도 토크는 정상상태로 일정하게 수렴하며 그때의 클러스터 구조는 파괴와 재형성(reformation)의 평형상태(equilibrium state)에 이른다. 따라서 불규칙적인 분산상태에서 유동하던 ER 입자들은 이런 평형상태에 도달할 때까지의 클러스터구조를 형성하며, 이 과정에서도 전단에 의한 클러스터의 변형은 일어난다.

본 연구에서는 두 가지 실험조건에서의 ER 유체의 응답시간 차이를 통해 클러스터 형성시간을 얻을 수 있었다. 클러스터 형성시간에는 정확히 구분할 수 없지만 입자응집과정과 입자조밀과정의 시간의 포함되어 있다. Fig. 8 은 클러스터 형성시간의 그래프이며, 전단속도가 증가할수록 지수함수적으로 증가하다가 일정하게 수렴하였다. 전단 속도가 증가할수록 클러스터의 형성시간이

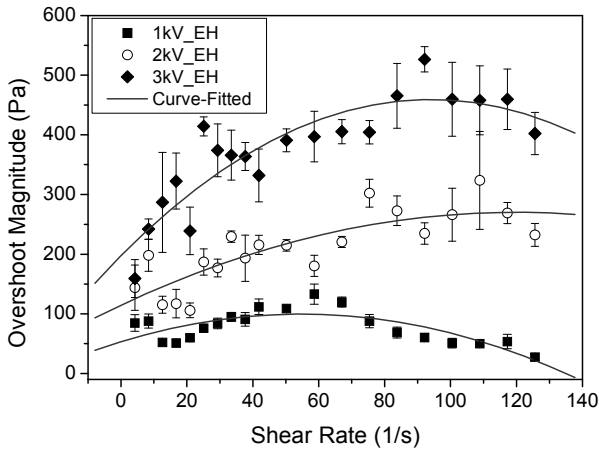


Fig. 9 Overshoot magnitude where Electric field is induced before shearing

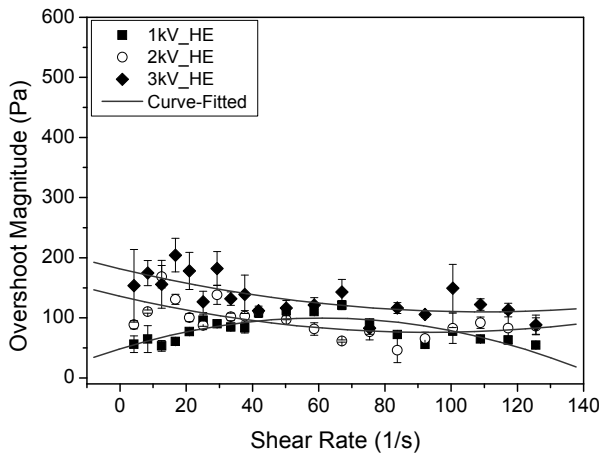


Fig. 10 Overshoot magnitude where Electric field is induced after shearing

길어지지만 전단응력상승의 응답은 빨라진다. 입자응집 과정에서 ER 입자들간의 응집이 일어나고, 응집된 입자구조는 전단속도가 증가함에 따라 유체력에 의한 충돌횟수 증가로 조밀해진 클러스터 구조를 형성한다. 이는 ER 유체의 전단응력 상승과 ER 입자의 클러스터 형성의 메커니즘이 밀접한 연관이 있음을 입증한다.

또한 두 실험조건인 전단응력 상승구간에서 오버슈트 현상의 차이가 있음이 확인되었으며, Fig. 9 과 Fig. 10 은 그 차이를 나타낸 그래프이다. 오버슈트의 크기만을 비교했을 때 전기장을 먼저 인가하고 전단을 준 경우의 오버슈트가 반대의 경우보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 또한 전기장의 강도와 전단속도에 비례해서 오버슈트의 크기도 상승했다. 전기장을 먼저 인가한 경우에는 안정된 1 차 클러스터 구조가 형성되며, 유체력에 의한 변형으로 전단응력이 상승한다. 정상상태의 클러스터 구조는 파괴와 재형성이 평형을 이루는 구조로

1 차 클러스터와는 그 강도에서 차이가 있다. 이때의 클러스터를 2 차 클러스터라고 할 때, 1 차 클러스터와 2 차 클러스터의 강도차이로 인해 오버슈트가 발생하는 것으로 보인다. 즉, 전단응력이 상승하는 과도영역은 1 차 클러스터가 변형, 파괴되어 2 차 클러스터를 재형성하는 과정이며, 1 차 클러스터의 항복 전단응력과 2 차 클러스터의 파괴, 재형성을 통한 정상상태 전단응력의 차이만큼의 오버슈트가 발생한다. 전단속도가 증가할수록 오버슈트의 크기도 커지는 경향을 보였다. 낮은 전단속도에서는 유체력의 영향이 작으므로 1 차 클러스터와 2 차 클러스터의 강도차이가 거의 없다. 따라서 오버슈트의 크기 역시 작게 나타난다. 높은 전단속도에서는 유체력의 영향이 크므로 1 차 클러스터와 2 차 클러스터의 강도 차이가 크며, 그 강도 차이만큼 오버슈트의 크기가 커진다고 볼 수 있다. 또한 높은 전단속도는 그 과도영역에 낮은 전단속도의 과정을 포함하며, 그 과정을 거쳐 정상상태의 전단속도에 이른다. 앞의 전단응력 그래프에서 낮은 전단속도에서는 전단응력이 높게 형성함을 확인할 수 있었다. 높은 전단속도에서는 낮은 전단속도의 높은 전단응력을 형성하는 과도영역을 거치므로 그 전단응력의 차이만큼 오버슈트의 크기가 커진다. 또한 전기장의 강도가 증가함에 따라 낮은 전단속도와 높은 전단속도에서의 전단응력의 차이가 커지므로 오버슈트의 크기도 커진다고 볼 수 있다. 반대로 유체력을 먼저 가한 후 전기장을 인가한 경우에는 전기장을 인가하는 순간 클러스터의 형성이 시작되어 1 차, 2 차 클러스터의 구분이 없으므로 오버슈트가 거의 나타나지 않았다. 이때의 전단속도는 이미 정상상태에 이른 이후이므로 전단속도의 영향은 나타나지 않았다.

3. 결론

실험을 통해 전단응력을 측정함으로써 ER 유체의 과도응답에 대해 해석하였다. 전단응력 상승의 주요인인 전기장 세기와 전단속도의 인가순서를 다르게 한 실험조건이 설정되었으며, 이에 따른 응답시간의 차이와 클러스터 형성 구조의 차이에 관한 연관성에 대해 논의되었으며 결과는 다음과 같다.

(1) 정상상태의 전단응력의 크기는 전기장의 세기에 비례하였고, 전단속도에 의한 영향은 거의 없었으나 낮은 전단영역에서 전단응력이 높게 형

성되는 경향을 보였다.

(2) 과도영역에서 전단응력의 상승은 전기장과 유체력의 상호작용에 의한 클러스터구조와 관계가 있으며, 응답시간은 전단속도가 증가함에 따라 감소하였다. 유체력에 의해 ER 입자의 응집과정은 방해받지만 응집된 입자간의 충돌횟수가 증가함으로써 클러스터구조가 조밀해지며 응답시간이 단축되었다.

(3) 전단응력이 상승하는 과도영역에서 오버슈트 현상이 있었으며, 실험조건에 따른 오버슈트의 크기가 측정되었다. 오버슈트의 크기는 전기장의 강도와 전단속도에 커짐에 따라 증가하였고, 전기장을 먼저 먼저 인가한 경우가 유체력을 먼저 인가한 경우보다 오버슈트의 크기가 큰 경향을 보였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Winslow, W. M., 1949, "Induced Vibration of Suspension," *J. Appl. Phys.*, Vol. 20, pp. 1137~1140.
- (2) Rhee E. J., Park M. K., Yamane R., and Oshima S., 2003, "A Study on the Relation between Flow Characteristics and Cluster Formation of Electrorheological Fluid Using Visualization," *Experiments in Fluids*, Vol. 34, No. 3, pp. 316~323.
- (3) Wang Z., Lin Z., Fang H., 1998, "Dynamic Response Times of Electrorheological Fluids in Steady Shear," *J. Appl. Phys.*, Vol. 83, No. 2, pp. 1125~1131.
- (4) Tian Y., Meng Y., and Wen S., 2004, "Dynamic Responses of Zeolite-based ER Fluid Sheared between Two Concentric Cylinder," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 15, No. 8, pp. 621~626.
- (5) Tian Y., Li C., Zhang M, Meng Y., and Wen S., 2005, "Transient Response of an Electrorheological Fluid under Square-wave Electric Field Excitation," *J. Colloid Interf. Sci.*, Vol. 288, No.1, pp. 290~297.
- (6) Tian Y., Meng Y., and Wen S., 2006, "Shear-Strain-Governed Transient Compressive Response of Electrorheological Fluid," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, No. 9, (094106).
- (7) Tian Y., Meng Y., Mao H., and Wen S., 2002, "Electrorheological Fluid under Elongation, Compression, and Shearing," *Phys. Rev. E*, Vol. 65, No. 3, (031507).
- (8) Wen W., Zheng D. W., and Tu K. N., 1999, "Chain-Column Evolution and Corresponding Electrorheological Effect," *J. Appl. Phys.*, Vol. 85, No. 1, pp. 530~533.
- (9) Wen W., Zheng D. W., Tu K. N., 1998, "In Situ Time Response Measurement of the Microspheres Dispersed in Electrorheological Fluids," *Phys. Rev. E*, Vol. 57, No. 4, pp. 4516~1519.
- (10) Vieira S. L., Pompeo Neto L. B., and Arruda A. C. F., 2000, "Transient Behavior of an Electrorheological Fluid in Shear Flow Mode," *J. Rheol.*, Vol. 44, No. 5, pp. 1139~1149.
- (11) Hanaoka R., Hotta K., Anzai H., Sakurai K., and Kuroda S., 2000, "Internal Structure and ER Properties in ER Suspensions of Disperse System under dc Electric Field," *Electric. Eng. Japan*, Vol. 132, No. 4, pp. 9~18.
- (12) Wu, C. W. and Conrad H., 1997, "Theoretical and Experimental Considerations of Electrorheology with DC and AC Fields," *ASME Int. Rheol. Fluid Mech. Nonlinear Mater. FED-Vol. 243/MD-Vol. 78*, pp. 185~196.
- (13) Nava R., Ponce M. A., Rejon L., Viquez S., and Castano V. M., 1997, "Response Time and Viscosity of Electrorheological Fluids," *Smart Mater. Struct.*, Vol. 6, No.11, pp. 67~75.
- (14) Nam Y. J., Park M. K., and Yamane R., 2008, "Dynamic Responses of Electrorheological Fluid in Steady Pressure Flow," *Exp. Fluids*, Vol. 44, No. 6, pp. 915~926.
- (15) Kim S. G., Jung D. W., and Choi Y. D., 1994, "Construction and Evaluation of an Experimental Type Torque Converter by Adapting an Electrorheological Fluid as an Operating Medium," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng.*, Vol. 18, No. 10, pp. 2706~2711 (in Korean).
- (16) Werely N. M., Lindler J., Rosenfeld N., and Choi Y. T., 2004, "Biviscous Damping Behavior in Electrorheological Shock Absorbers," *Smart Mater. Struct.* Vol. 13, No. 5, pp. 743~752.