한국공작기계학회 2005 춘계학술대회 논문집 pp.125~131

3포트 ER 밸브 개발을 위한 분산계 ER유체의 유동특성에 관한 연구

장문제*, 장성철+, 염만오+, 이동극++, 김기홍+++

A Study on Flow Characteristics of Dispersive ER Fluids for Development of 3-port ER Valves

Mun-Jey Jang*, Sung-Cheol Jang+, Man-oh Yum+, Dong-Guk Lee++, Ki-Hong Kim+++

Abstract

The purpose of the present study is to examine the flow characteristics of ER fluids between 2 port and 3 port rectangular tube brass electrodes. ER fluid is made silicon oil mixed with 2-3wt% starch having hydrous particles. Flow visualization of the ER fluids were obtained by CCD camera measuring those of the clusters using an image processing technique. This research found the flow rate(Q_L) with 0 kV/mm, 0.5kV/mm and 1.0kV/mm for Q_L = 0, 0 and 5.73cm^3/s. When the strength of the electric field increased, the cluster of ER fluids are clearly strong along the rectangular tube and the flow rate(Q) decreased.

Key Words : ER Fluid 전기점성유체, Flow Rate 유량, 3 Port Rectangular Tube 3포트사각튜브

1. 서 론

최근 ER유체에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이는 전기장의 강도에 따른 ER유체의 유변학적 특성이 뛰어나고, 응답시간이 수 내지 수십 msec 정도로 매우 빠르기 때문에 밸브와 클러치를 포함하여 로보틱스 분야에 응용이 가능해졌기 때문이다. 그러므로 새로운 응용분야의 적용 가능성을 넓히는 응용연구와 ER유체의 유동특성과 관련된 메커니즘을 규명하는 기초연구가 중요한 연구과제로 부상하고 있다. 그러나 ER유체의 유동상태에 관한 연구는 현재까지 매우 적고, ER유체를 응용한 기기 및 시스템의 성능향상을 위해서 ER유체의 유동상태를 아는 것은 매우 중요하다.

* 경남대학교 대학원 기계공학과 (kncpjmj@hanmail.net)
주소: 631-701 경남 마산시 월영동 449
\+ 경남대학교 기계자동화공학부
++ 항공기능대학 메카트로닉스과
+++ 구미1대학 컴퓨터응용기계설계과

ER유체의 유동상태에 관한 연구로서 Wang[1]등은 실험적인 고찰없이 수치해석 기법으로 ER유체의 유동 특성을 설명하였고, Tsukiji[2]는 ER유체를 빙햄유체로 가정한 기초식을 이용해서 이론계산을 수행하였다. 한편, 국내에서도 Jang[3,4] 등은 PIV 기법을 이용하여 평행평판 전극사이에서 ER유체의 유동특성을 실험적으로 검토한 경우가 있다. 그러나 지금까지의 연구결과에 의하면 입·출구가 하나인 평행평판(이하 2포트 Rectangular Tube라 함)에 관한 유동 가시화 연구는 많이 수행되어져 왔지만 입구가 하나이고 출구가 2개인 평행평판(이하 3포트 Rectangular Tube라 함)에 관한 유동 가시화 연구는 수행된 경우가 없는 것으로 조사되었다. 또한 3포트 Rectangular Tube의 입구에서 출구로 분기되는 2지점의 복잡한 유변현상을 규명하는 것은 3포트 ER 밸브를 개발하기 위한 중요한 기술적 과제이다.

본 연구에서는 3포트 ER 밸브를 개발하기 위한 전 단계로서, 2포트와 3포트 Rectangular Tube를 자체 제작하고, 전극 사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화시키면서 유량을 측정하고, CCD 카메라를 이용하여 유동가시화 실험을 수행하였다.

2. ER유체의 유변학적 특성

ER유체에 전기장이 인가된 상태에서 유체의 유동에 의한 관성력이 작용하게 되면 ER유체는 저항을 하게 된다. 관성력보다 전기장에 의한 입자들의 결합력이 작은 경우에 ER유체는 항복을 일으켜 유동이 발생하게 되며, 유동이 시작되는 부근에서 매우 복잡한 변화를 일으킨다. 이러한 현상에 대하여 정확히 설명할 수 있는 이론은 제시되어 있지 않다. 이러한 현상은 ER유체의 조성에 사용 된 입자의 크기, 입자의 형상, 절연유의 종류, 온도 및 전기장의 강도에 따라 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또한 유동속도변화 및 전기장의 강도에 따라 형성되는 클러스터의 형태는 달라지며, 이에 따라 전단력의 크기도 달라지게 된다. 이와 같이 유동속도 및 전기장 강도 변화에 따른 클러스터의 형성과정과 거동을 직접 관찰하고 이에 대한 자료를 구축한다면, 전기장 강도와 유동속도 변화에 따른 ER유체의 기초자료로 활용 될 수 있을 것이라 생각한다.

Fig. 1 (a) (b)는 2포트 Rectangular tube 전극내에서 전기장을 인가하지 않은 경우와 전기장을 인가한 경우의 유동특성을 나타낸 것이다. Fig. 1 (a)와 같이 전기장을 인가하지 않을 경우 2포트 Rectangular

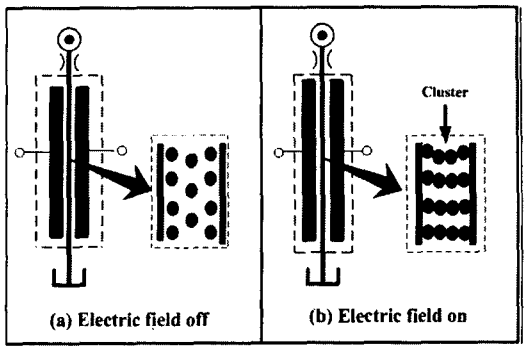


Fig. 1 Flow of ER fluids in 2 port

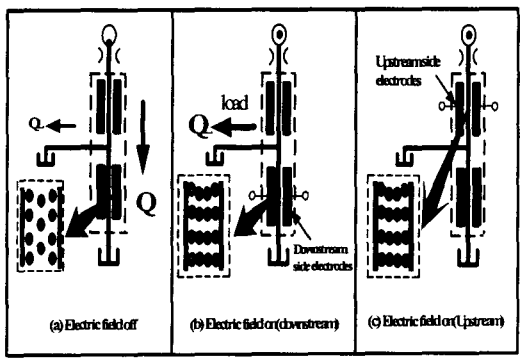


Fig. 2 Flow of ER fluids in 3 port

tube의 전극내에서 ER유체는 점성만으로 유동하여, 전극부분에서 유속이 영(zero)이고 나머지 부분에서는 포물선 형태의 속도 분포을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 1 (b)와 같이 전기장이 인가되면 ER유체가 클러스터를 형성하여 유량이 작아지며, 전극사이에서 플러그(plug) 유동 형태의 속도분포를 가지게 된다.

Fig. 2 (a) (b) (c)는 3포트 Rectangular tube 전극내에서 전기장을 인가하지 않은 경우와 전기장을 인가한 경우의 유동특성을 나타낸 것이다. Fig. 2 (a)는 전기장을 인가하지 않은 경우로서 Fig. 1 (a)와 같이 유동하는 것을 알 수 있다. Fig. 2 (b)는 Fig. 2 (a)와 같은 조건에서 하부 전극에 전기장을 인가한 경우로서, Fig. 1 (b)와 같이 클러스터를 형성하는 것을 알 수 있다. 이러한 하부 전극에 형성된 클러스터에 의해 부하 유량 Q_L이 증가하게

되며, 전기장의 강도가 증가할수록 부하유량 Q_L도 증가하게 된다. Fig. 2 (c)는 Fig. 2 (b)와 같은 조건에서 전기장을 상부전극에 인가하게 되면, 클러스터가 상부 전극내에 많이 형성되어 출구 유량 Q와 부하 유량 Q_L이 감소하게 된다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 3은 ER유체의 유동특성을 가시화하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. ER유체가 정지된 상태와 유동상태를 분리하여 관찰할 수 있도록 실험장치를 제작하였다. 실험에 사용된 ER유체는 실리콘 오일(KF96-50cSt)과 전분 입자(180㎛)를 혼합한 분산계 ER유체이며, 자체 조성하였다. 조성한 분산계 ER유체는 탱크내에 저장하고, 전분 입자의 침전을 방지하고 입자 분포를 균일하게 하기 위해 전동식 교반기로 교반하였다. ER유체는 탱크로부터 위치에너지 차이에 의해 2포트와 3포트 Rectangular tube의 유로를 흐르게 설계하였다. 유량은 2포트와 3포트 Rectangular tube 유로의 상류부와 하류부에 설치된 콕을 사용하여 조절하였다. 2포트와 3포트 Rectangular tube내에서 입자의 침전을 방지하기 위해서 15도 방향의 각을 주어 흐르게 하였다. 2포트와 3포트 Rectangular tube의 위쪽에는 CCD카메라와 광원을 설치하여 ER유체의 유동을 가시화 할 수 있도록 하였다. 광원은 공랭식 500mW Ar-ion 레이저를 사용하였다. 광원

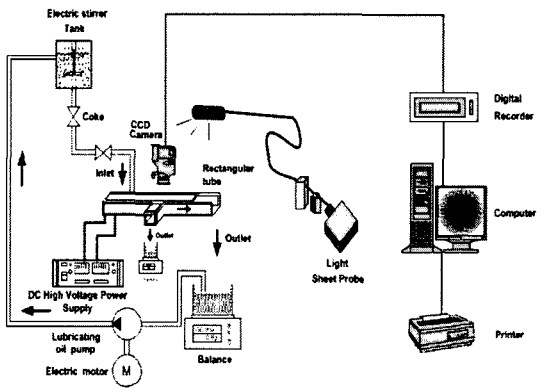


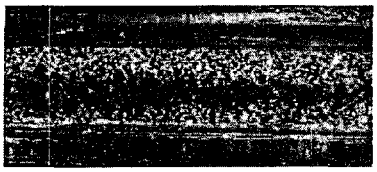
Fig. 3 Experimental apparatus

의 이동을 용이하게 하기 위해 광케이블로 빛을 이동시킬 수 있는 LLSP(laser light sheet probe)를 사용하였다. 또한 LLSP는 레이저 층의 두께를 약 1mm 정도 조절을 할 수도 있다. 광케이블의 길이는 약 10m이다. 펄스화된 광원을 얻기 위해서 AOM(acousyic optical modulator)을 사용하였다. 유동장의 획득을 위해서 1초에 30장의 이미지를 획득할 수 있는 CCD 카메라(Panasonic Co. WV3P310)를 사용하였으며, 영상의 기록을 위해 디지털 레코더가 사용되었다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 4와 Fig. 5는 전분 입자의 무게분율 2wt%로 조성한 ER유체에 대하여 전극 사이의 간극 12mm, 전기장 0~1.0kV/mm로 인가한 상태에서 2포트 Rectangular tube의 유량변화에 대한 가시화 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 4 (a)는 전기장을 인가하지 않은 상태에서 2포트 Rectangular tube 상부의 콕을 조금 열어 초기유동이 시작된 상태를 나타낸 것이고 (b)~(e)는 (a)의 상태에서 전기장의 강도를 증가시킨 경우이다. 전기장의 강도가 낮을 경우 전극 사이에서 형성된 클러스터의 양이 적어 유량변화가 적지만, 상대적으로 전기장의 강도가 높은 (e)의 경우 띠 형태의 단일 클러스터에서 복합 클러스터가 형성되어 유량이 많이 감소한 것을 알 수 있다. 이와 같이 형성된 복합 클러스터에 의해 ER유체의 속도분포가 바뀌게 되며, 입구와 출구에서의 유량 및 압력강하가 발생하게 된다. 전극사이에 형성된 띠 형태의 클러스터는 한번 형성된 후 그 형태를 지속적으로 유지하는 것이 아니고, 파괴와 생성의 과정을 짧은 주기로 반복하게 되는 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 복합 클러스터 형성과정은 단일 클러스터가 형성된 후 이들 단일 클러스터가 상호작용하여 복합 클러스터를 형성하거나, 전극 사이를 흐르는 ER입자들이 이미 형성된 단일 클러스터와 상호작용하여 복합 클러스터를 형성하는 것을 관찰 할 수 있었다.



(a) E=0kV/mm, Q=2.31㎤/s

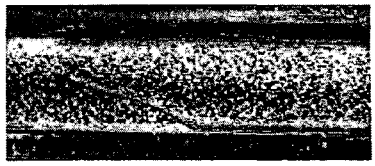
(b) E=0.25kV/mm, Q=2.13㎤/s

(c) E=0.5kV/mm, Q=2.09㎤/s

(d) E=0.75kV/mm, Q=1.93㎤/s

(e) E=1kV/mm, Q=1.76㎤/s

Fig. 4 Flow between 2 port Rectangular tube at Q=2.31㎤/s



(a) E=0kV/mm, Q=7.6㎤/s

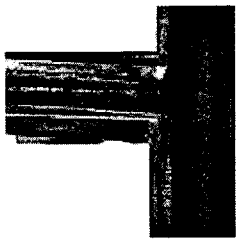
(b) E=0.25kV/mm, Q=6.42㎤/s

(c) E=0.5kV/mm, Q=6.38㎤/s

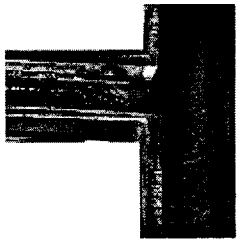
(d) E=0.75kV/mm, Q=6.14㎤/s

(e) E=1kV/mm, Q=5.86㎤/s

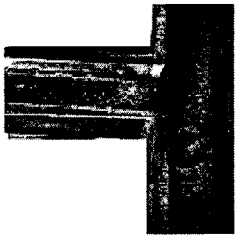
Fig. 5 Flow between 2 port Rectangular tube at Q=7.6㎤/s



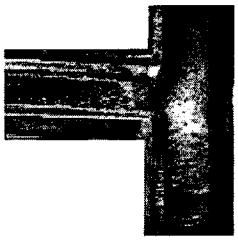
(a) E=0kV/mm,Q=2.48㎤/s,Q_L=1.03㎤/s



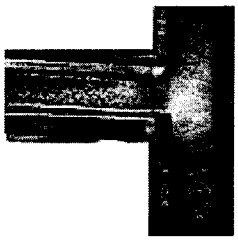
(b) E=0.25kV/mm,Q=2.33㎤/s,Q_L=1.07㎤/s



(c) E=0.5kV/mm,Q=2.04㎤/s,Q_L=1.14㎤/s

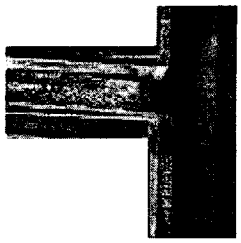


(d) E=0.75kV/mm,Q=1.06㎤/s,Q_L=1.45㎤/s



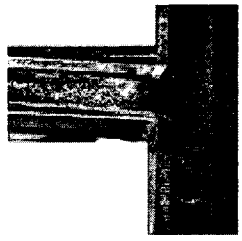
(e) E=1kV/mm,Q=0.32㎤/s,Q_L=2.01㎤/s

Fig. 6 Flow between 3 port Rectangular tube at Q=2.48㎤/s

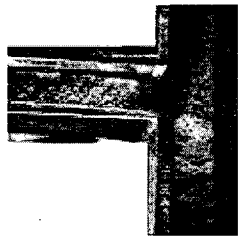


(a) E=0kV/mm,Q=4.75㎤/s,Q_L=0㎤/s

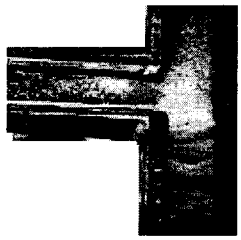
(b) E=0.25kV/mm,Q=4.88㎤/s,Q_L=0㎤/s



(c) E=0.5kV/mm,Q=4.86㎤/s,Q_L=0㎤/s



(d) E=0.75kV/mm,Q=3.07㎤/s,Q_L=1.6㎤/s



(e) E=1.0kV/mm,Q=0.25㎤/s,Q_L=5.73㎤/s

Fig. 7 Flow between 3 port Rectangular tube at Q=4.75㎤/s

또한 전기장의 강도가 증가할수록 복합 클러스터가 많이 형성되고, 전극에 부착되는 클러스터는 굵어지고 길어지게 되어 클러스터의 결합력이 더욱 증가하여 전극사이에서 흐르는 ER유체의 흐름 저항이 되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조건에서 2포트 Rectangular tube 상부의 콕을 완전히 열어 전극사이에서 ER유체의 유량이 최대인 상태를 나타낸 것이다. 유량이 적은 Fig. 4는 전극과 전극사이에 형성된 클러스터가 전극 중앙부까지 형성되지만, 유량이 많은 Fig. 5는 전극사이의 클러스터가 파괴되는 현상이 나타난다. 이것은 ER효과에 의해 형성된 전분 입자의 전기적 인력보다도 ER유체의 유량증가에 따른 관성력이 크기 때문에 클러스터가 파괴되는 것으로 생각된다. 그러나 유량이 증가하더라도 전극부근에서는 클러스터가 파괴되지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 전기장 증가에 따른 ER유체의 점성효과와 전분입자에 작용하는 전기적인 인력이 유체의 관성력보다 상대적으로 크기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6과 Fig. 7은 전분 입자의 무게분율 3wt%로 조성한 ER유체에 대하여 전극 사이의 간극 12mm, 전기장 0~1.0kV/mm로 인가한 상태에서 3포트 Rectangular tube의 유량변화에 대한 가시화 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 6 (a)는 전기장을 인가하지 않은 상태에서 3포트 Rectangular tube 상부의 콕를 조금 열어 초기유동이 시작된 상태를 나타낸 것이고 (b)~(e)는 (a)의 상태에서 전기장의 강도를 증가시킨 경우이다. 전기장을 인가하지 않은 경우 Fig. 3(a)에서 설명한 것과 같이 출구 유량 뿐 아니라 부하 유량도 많이 발생된 것을 알 수 있다. 그러나 전기장의 강도가 증가할수록 출구 유량은 감소하고 부하 유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 4에서 설명한 것과 같이 하부 전극에 전기장을 인가하게 되면 클러스터의 결합력이 더욱 증가하여, 전극사이에서 흐르는 ER유체의 흐름 저항이 발생되기 때문이라고 생각한다.

Fig. 7 (a) Fig. 6와 같은 조건에서 3포트 Rectangular tube 상부의 콕을 완전히 열어 전극사이에서 ER유체의 유량이 최대(Q=4.75㎤/s, Q_L=0㎤/s)인 상태를 나타낸 것이다. 유량이 적은 Fig. 6과 다르게 출구쪽으로 유량이 증가할 뿐 부하유량은 거의 발생되지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 전기장이 상대적으로 높은 E=0.75kV/mm에서 출구쪽 유량 Q=3.07㎤/s로 감소하고 부하 유량 Q_L=1.6㎤/s로 발생되는 것을 알 수 있다. 또한 전기장 E=1.0kV/mm인 경우 출구쪽 유량 Q=0.25㎤/s로 거의 발생되지 않고 부하 유량Q_L=5.73㎤/s로 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 사진에서도 알 수 있는 것과 하부 전극에 전기장을 인가하게 되면, 유량증가로 인해 전극 사이에서 ER입자가 많이 분산되어 전극부근에 형성된 단일 클러스터가 복합클러스터를 더욱 많이 형성하기 때문이라고 생각한다.

5. 결 론

본 연구에서는 3포트 ER 밸브를 개발하기 위한 전 단계로서, 2포트와 3포트 Rectangular Tube를 자체 제작하고, 전극 사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화시키면서 유량을 측정하고, CCD 카메라를 이용하여 유동가시화 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 전극사이에 형성된 띠 형태의 클러스터는 한번 형성된 후 그 형태를 지속적으로 유지하는 것이 아니고, 파괴와 생성의 과정을 짧은 주기로 반복하는 것을 알 수 있었다.
2. 3포트 Rectangular tube에서 전기장의 강도가 증가할수록 출구 유량은 감소하고 부하 유량이 증가하는 것은 하부 전극에 부착되는 클러스터는 굵어지고 길어지게 되어 클러스터의 결합력이 증가로 인해, 전극사이에서 흐르는 ER유체의 흐름 저항이 발생하는 것을 알 수 있었다.
3. 유량이 많이 증가하더라도 하부 전극에 전기장을 인가하게 되면, 유량증가로 인해 전극 사이에서 ER입자가 많이 분산되어 전극부근에 형성된 단일 클러스터가 복합클러스터를 더욱 많이 형성하는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구를 위해 실험에 많은 도움을 주신 경남대학교 대학원 기계공학과의 조원봉군과 서병준군께 감사의 말을 전합니다.

참 고 문 헌

1. K. C. Wang, R. Mclay and G. F. Carey, 1989,

ER Fluid Modelling, CFD Laboratory, College of Engineering, University of Texas at Austin, Austin, Tx, USA. *Proc. of the Second International Conference on ERF*, pp. 41~52.

2. Tetsuhiro Tsukiji, Jun Takahashi, Noboru Sugimoto, Hiroyasu Ikeda., 1996, "Flow Characteris tics of ERF between Two Parallel-Plate Electrodes", *JFPS*, Vol. 25, No. 4, pp. 104~561.
3. C, T. H and J, S. C., 2004, "An Experimental Study on Flow Characteristics of ERF Between Two Parallel-Plate Electrodes by Using PIV Technique", *KSME International Journal*, Vol.18 No.10, pp.1763-1771.
4. J, S. C. and K, D. T., 2003, "Flow Rate-Pressure Drop Characteristics of Dispersive ER Fluid According to Change of Electric Field Strength in Clearance between Parallel Plates", *KSMTE*, Vol. 12, No. 1, pp. 78~83.
5. M. Nakano and T. Yonekawa, 1994, "Pressure Response of ER Fluid in a Piston Cylinder ER Valve System", *Proc. of the 4th Int. Conf. on Electrorheological Fluid*, pp.477~489.
6. C, S. B. and C, C. C., 1994, "Performance Investigation of a Cylinderical Valve Featuring Electro-Rheological Fluids". *Korean Socity of Precision Engineering*, Vol. 11, pp. 148~157.