

3 포트 사각 튜브내에서 ER유체의 유동 가시화

장성철*, 염만오⁺, 장문제⁺⁺
(논문접수일 2005. 10. 10, 심사완료일 2006. 2. 3)

A Flow Visualization of ER Fluids in 3Port Rectangular Tube

Sung-Cheol Jang*, Man-oh Yum⁺, Mun-Jey Jang⁺⁺

Abstract

The purpose of this study is to visualize the characteristics of ER fluids as preceding step of developing 3 port ER valves. ER fluids are made with silicone oil and 3 weight fraction starch having hydrous particles. The flow visualization of ER fluids flow is obtained by CCD camera with changing the strength of electric field to ER fluids flow. As the strength of the electric field increases, more clusters in flow are made and these clusters are thought to be the reasons of the load flow rate being increased and the outlet flow rate being decreased. The ER Valves and load and outlet flow rate check method are considered to be applied to the fluid power control system.

Key Words : 3 Port Rectangular Tube(3포트 사각 튜브), Fluid Power Control System(유공압제어시스템), Electric Field(전기장), Load & Outlet Flow Rate(부하 및 송출유량), Weight Fraction(무게분율)

1. 서론

ER(Electro-Rheological)유체는 전기 절연성 오일에 전도성의 고체 미립자를 분산시킨 현탁액이며, 전기장에 대한 유변학적 특성이 뛰어나고 응답시간이 수 내지 수십 ms 정도로 매우 빠르기 때문에 밸브와 클러치를 포함하여 로봇틱스 분야에 응용이 되고 있다. 그러므로 새로운 응용분야의 적용 가능성을 넓히는 응용연구와 ER유체의 유동특성과 관

련된 기초연구가 중요한 과제이다. 특히 ER유체의 유동상태를 아는 것은 ER유체의 응용기기나 시스템의 성능향상을 위해서 매우 중요함에도 불구하고 이와 관련된 기초연구는 현재까지 많지 않은 실정이다.

ER유체의 유동상태에 관한 연구로서 Wang 등⁽¹⁾은 실험적인 고찰 없이 수치해석 기법으로 ER유체의 유동특성을 설명하였고, Tsukiji⁽²⁾는 ER유체를 빙헴유체로 가정한 기초식을 이용해서 이론계산을 수행하였다. 한편, 국내에서도 Jang

* 경남대학교 기계자동화공학부 (sccjang@kyungnam.ac.kr)
주소: 631-701 경남 마산시 월영동 449

+ 경남대학교 기계자동화공학부

++ 경남대학교 대학원 기계공학과

등^(3,4)은 PIV 기법을 이용하여 평행평판 전극사이에서 ER유체의 유동특성을 실험적으로 검토한 경우가 있다. 그러나 자료를 조사한 결과에 의하면 입·출구가 하나인 평행평판(이하 2포트 사각튜브라 함)에 관한 유동 가시화 연구는 많이 수행되어져 왔지만 입구가 하나이고 출구가 2개인 평행평판(이하 3포트 사각튜브라 함)에 관한 유동 가시화 연구는 수행된 경우가 없었다. 그러나 3포트 사각튜브의 입구에서 출구로 분기되는 두 지점의 복잡한 유변 현상을 규명하는 것은, 유량과 압력을 전기장의 강도만으로 조절하여 단순한 구조로 시스템을 설계할 수 있는 3포트 ER 밸브를 개발하기 위한 중요한 기술적 과제이다.

본 연구에서는 3포트 ER 밸브를 개발하기 위한 준비단계로서, 2포트와 3포트 사각튜브를 자체 제작하고, 전극 사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화시키면서 송출 및 부하유량을 측정하고, CCD 카메라를 이용하여 유동가시화 실험을 수행하여, 3포트 ER 밸브에서 발생할 수 있는 복잡한 유변현상을 규명하고자 하였다.

2. ER유체의 유변학적 특성

ER유체에 전기장이 가해진 상태에서 유체의 유동에 의한 관성력이 작음하게 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 구성에 사용된 입자의 크기, 입자의 형상, 절연유의 종류, 온도 및 전기장의 강도에 따라 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다^(5,6). 또한 유동속도변화 및 전기장의 강도에 따라 형성되는 클러스터의 형태는 달라지며, 이에 따라 전단력의 크기도 달라지게 된다⁽⁷⁾. 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 사각튜브 전극 내에서 전기장을 가하지 않은 경우와 전기장을 가한 경우의 유동특성을 나타낸 것이다. Fig. 1 (a)와 같이 전기장을 가하지 않을 경우 2포트 사각튜브의 전극 내에서 ER유체는 점성의 영향을 받으면서, 전극부분에서 유속을 영(zero)으로 하는 포물선 형태의 속도 분포를 가진다. 그러나 Fig. 1 (b)와 같이 전기장을 가하면 ER유체가 클러스터를 형성하여 유량이 적어지며,

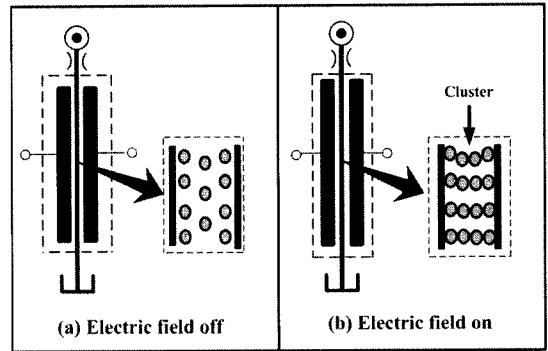


Fig. 1 Flow patten of ER fluids(2 port)

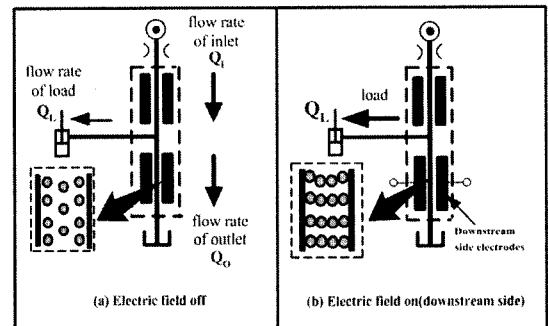


Fig. 2 Flow patten of ER fluids(3 port)

전극사이에서 플러그(plug) 유동 형태의 속도분포를 가지게 된다^(8,9).

Fig. 2 (a), (b)는 3포트 사각튜브 전극 내에서 전기장을 가하지 않은 경우와 전기장을 가한 경우의 유동특성을 나타낸 것이다. Fig. 2 (a)는 전기장을 가하지 않은 경우로서 Fig. 1 (a)와 같은 유동형태를 보이며, 3포트 사각튜브의 입구로 들어오는 유량(입구유량, Q_i), 송출되는 유량(송출유량, Q_o), 부하되는 유량(부하유량, Q_L)이 정해진다.

Fig. 2 (b)는 Fig. 2 (a)와 같은 조건에서 하부 전극에 전기장을 가한 경우로서, Fig. 1 (b)와 같이 클러스터를 형성하며, 이러한 하부 전극에 형성된 클러스터에 의해 송출유량이 감소하고 부하유량이 증가하게 되며, 전기장의 강도가 증가할수록 부하유량도 증가하게 된다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 3은 ER유체의 유동특성을 가시화하기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다. ER유체가 정지된 상태와 유

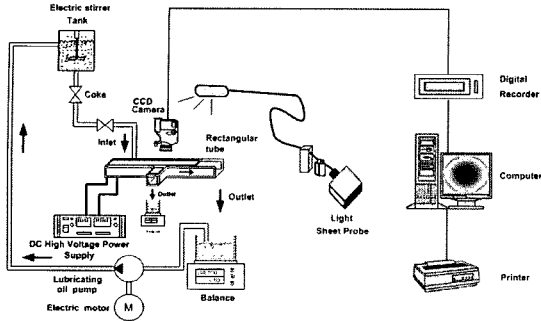


Fig. 3 Experimental setup

동하는 상태를 분리하여 관찰할 수 있도록 실험장치를 제작하였다. 실험조건은 유량을 일정하게 유지한 상태에서 전기장의 강도변화에 따른 클러스터 형성과정을 관찰하였으며, 송출 및 부하유량은 측정하였다. 실험에 사용된 ER 유체는 실리콘 오일(KF96-50cSt)과 전분 입자($180\mu\text{m}$)를 혼합한 분산계 ER유체이며, 자체 조성하였다. 조성한 분산계 ER유체는 탱크 내에 저장하고, 전분 입자의 침전을 방지하고 입자 분포를 균일하게 하기 위해 전동식 교반기로 교반하였다. ER유체는 탱크로부터 위치에너지 차이에 의해 2포트와 3포트 사각튜브의 유로를 흐르게 설계하였다. 유량은 2포트와 3포트 사각튜브 유로의 상류부와 하류부에 설치된 콧을 사용하여 조절하였다. 2포트와 3포트 사각튜브내에서 입자의 침전을 방지하기 위해서 15도 방향의 각을 주어 흐르게 하였다. 유동장의 획득을 위해서 1초에 30장의 이미지를 획득할 수 있는 CCD 카메라(Panasonic Co. WV3P310)를 사용하였으며, 영상의 기록을 위해 디지털 레코더를 사용하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 2포트 사각튜브

Fig. 4와 Fig. 5는 전분 입자의 무게분율 2wt%로 조성한 ER유체에 대하여 전극 사이의 간극은 12mm이고, 전기장은 0~1.0kV/mm로 가한 상태에서 2포트 사각튜브의 유량변화에 대한 가시화 결과를 나타낸 것이다.

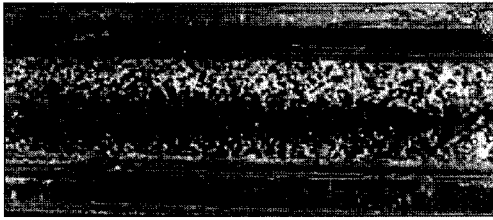
Fig. 4 (a)는 전기장을 인가하지 않은 상태에서 2포트 사각튜브 상부의 콧을 조금 열어 초기유동이 시작된 상태를 나타낸 것이고 (b)~(e)는 (a)의 상태에서 전기장의 강도를 증가시킨 경우이다. 전기장의 강도가 낮을 경우 전극 사이에서 형성된 클러스터의 양이 적어 유량감소가 작지만, 상대적

으로 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 ER 유체의 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. 이것은 2포트 사각튜브내에 전기장을 가할 경우, 크기가 서로 다른 ER입자 상호간 인력이 다르거나 ER유체의 관성력 때문이라고 생각한다. 그리고 복합 클러스터 형성과정은 단일 클러스터가 형성된 후 이들 단일 클러스터가 상호작용하여 복합 클러스터를 형성하거나, 전극 사이를 흐르는 ER 입자들이 이미 형성된 단일 클러스터와 상호작용하여 복합 클러스터를 형성하는 것을 관찰 할 수 있었다. 또한 전기장의 강도가 증가할수록 복합 클러스터가 많이 형성되고, 전극에 부

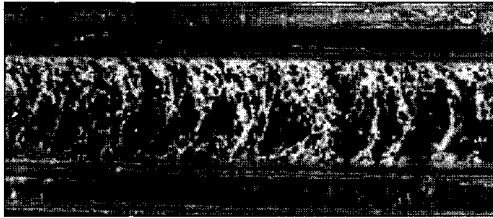
착되는 클러스터는 굵어지고 길어지게 되어 클러스터의 결합력이 더욱 증가하므로써 흐름 저항이 되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 Fig. 4와 같은 조건에서 2포트 사각튜브 상부의 콧을 완전히 열어 전극사이에서 ER유체의 유량이 최대한 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 생각한다. 그러나 유량이 증가하더라도 전극부근에서는 클러스터가 파괴되지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 전기장 증가에 따른 ER유체의 점성 효과와 전분입자에 작용하는 전기적인 인력이 유체의 관성력보다 상대적으로 크기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6과 Fig. 7은 Fig. 4와 Fig. 5의 유동 가시화 결과를 전기장의 강도와 송출유량의 관계로 나낸 그래프이다. 그래프에서 알 수 있는 것과 같이 전기장의 강도가 증가할수록 송출 유량은 비례적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 7의 그래프에서 전기장을 인가하지 않은 경우(송출유량 $Q=7.6\text{cm}^3/\text{s}$)보다 전기장을 가한 경우(송출유량 $Q=6.42\text{cm}^3/\text{s}$) 송출유량이 갑자기 감소한 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5의 유동가시화 결과에서 알 수 있는 것과 같이 유량이 증가하게 되면 2포트 사각튜브에서 실리콘 오일에 분산된 전분입자의 양이 Fig. 4에 비해서 상대적으로 많아지기 때문이라고 생각한다.



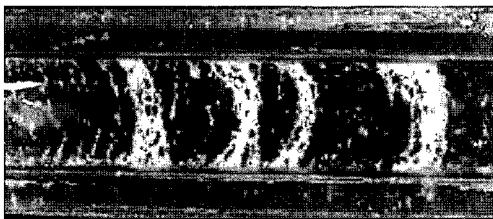
(a) $E=0\text{kV/mm}$, $Q=2.31\text{cm}^3/\text{s}$



(b) $E=0.25\text{kV/mm}$, $Q=2.13\text{cm}^3/\text{s}$



(c) $E=0.5\text{kV/mm}$, $Q=2.09\text{cm}^3/\text{s}$

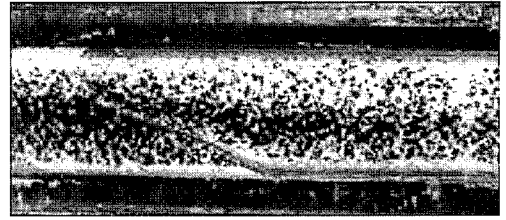


(d) $E=0.75\text{kV/mm}$, $Q=1.93\text{cm}^3/\text{s}$



(e) $E=1\text{kV/mm}$, $Q=1.76\text{cm}^3/\text{s}$

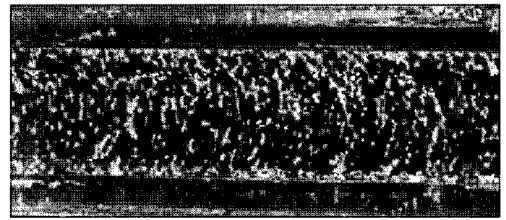
Fig. 4 Flow between 2 port rectangular tube at $Q_{i\text{ max}} = 2.31\text{cm}^3/\text{s}$



(a) $E=0\text{kV/mm}$, $Q=7.6\text{cm}^3/\text{s}$



(b) $E=0.25\text{kV/mm}$, $Q=6.42\text{cm}^3/\text{s}$



(c) $E=0.5\text{kV/mm}$, $Q=6.38\text{cm}^3/\text{s}$



(d) $E=0.75\text{kV/mm}$, $Q=6.14\text{cm}^3/\text{s}$



(e) $E=1\text{kV/mm}$, $Q=5.86\text{cm}^3/\text{s}$

Fig. 5 Flow between 2 port rectangular tube at $Q_{i\text{ max}} = 7.6\text{cm}^3/\text{s}$

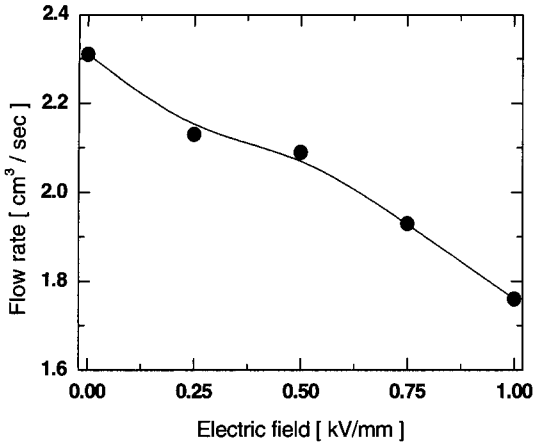


Fig. 6 Flow rate versus electric field strength of 2 port rectangular tube at $Q_{i \max}=2.31\text{cm}^3/\text{s}$

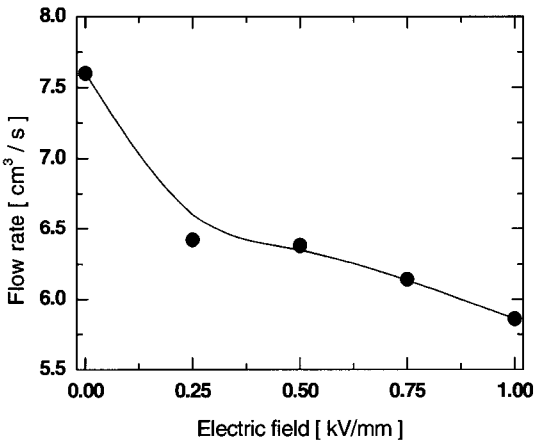
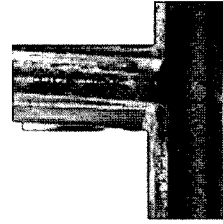


Fig. 7 Flow rate versus electric field strength of 2 port rectangular tube at $Q_{i \max}=7.6\text{cm}^3/\text{s}$

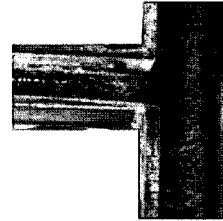
4.2 3포트 사각튜브

Fig. 8~Fig. 10은 전분 입자의 무게분율 3wt%로 조성한 ER유체에 대하여 전극 사이의 간극 12mm, 전기장 0~1.0 kV/mm로 인가한 상태에서 3포트 사각튜브의 유량변화에 대한 가시화 결과를 나타낸 것이다.

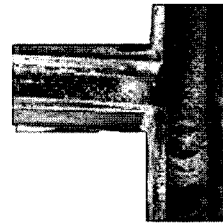
Fig. 8 (a)는 전기장을 가하지 않은 상태에서 3포트 사각튜브 상부의 콕을 조금 열어 초기유동이 시작된 상태를 나타낸 것이고 (b)~(e)는 (a)의 상태에서 전기장의 강도를 증가시킨 경우이다. 전기장을 가하지 않은 경우 Fig. 2 (a)에서 설명한 것과 같이 송출유량 뿐 아니라 부하유량도 많이 발생된 것을 알 수 있다. 그러나 전기장의 강도가 증가할수록 송



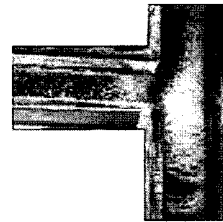
(a) $E=0\text{kV/mm}$, $Q_0=2.48\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=1.03\text{cm}^3/\text{s}$



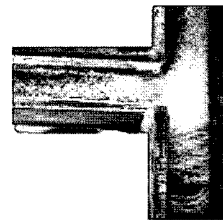
(b) $E=0.25\text{kV/mm}$, $Q_0=2.33\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=1.07\text{cm}^3/\text{s}$



(c) $E=0.5\text{kV/mm}$, $Q_0=2.04\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=1.14\text{cm}^3/\text{s}$

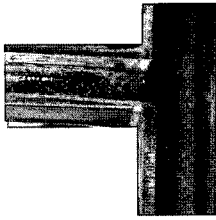


(d) $E=0.75\text{kV/mm}$, $Q_0=1.06\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=1.45\text{cm}^3/\text{s}$

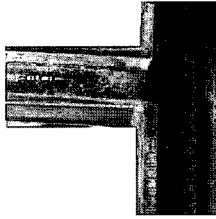


(e) $E=1\text{kV/mm}$, $Q_0=0.32\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=2.01\text{cm}^3/\text{s}$

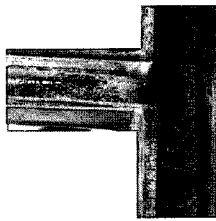
Fig. 8 Flow between 3 port rectangular tube ($Q_{i \max}=3.51\text{cm}^3/\text{s}$)



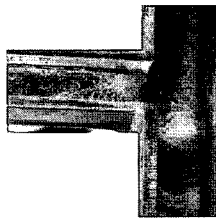
(a) $E=0\text{kV/mm}$, $Q_0=3.34\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=0.21\text{cm}^3/\text{s}$



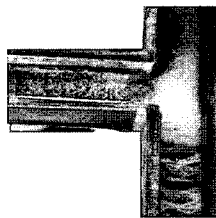
(b) $E=0.25\text{kV/mm}$, $Q_0=3.07\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=0.34\text{cm}^3/\text{s}$



(c) $E=0.5\text{kV/mm}$, $Q_0=2.87\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=0.48\text{cm}^3/\text{s}$

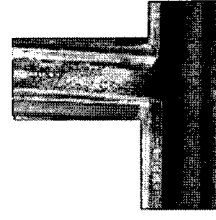


(d) $E=0.75\text{kV/mm}$, $Q_0=1.92\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=1.37\text{cm}^3/\text{s}$

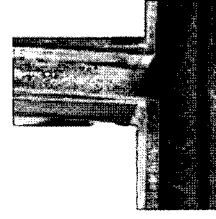


(e) $E=1.0\text{kV/mm}$, $Q_0=0.13\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=2.52\text{cm}^3/\text{s}$

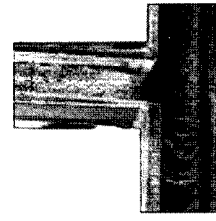
Fig. 9 Flow between 3 port rectangular tube
($Q_{i \max} = 3.55\text{cm}^3/\text{s}$)



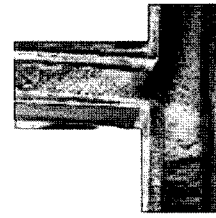
(a) $E=0\text{kV/mm}$, $Q_0=4.90\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=0\text{cm}^3/\text{s}$



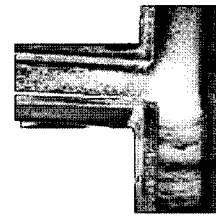
(b) $E=0.25\text{kV/mm}$, $Q_0=4.88\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=0\text{cm}^3/\text{s}$



(c) $E=0.5\text{kV/mm}$, $Q_0=4.86\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=0\text{cm}^3/\text{s}$



(d) $E=0.75\text{kV/mm}$, $Q_0=3.07\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=1.6\text{cm}^3/\text{s}$



(e) $E=1.0\text{kV/mm}$, $Q_0=0.15\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=4.18\text{cm}^3/\text{s}$

Fig. 10 Flow between 3 port rectangular tube
($Q_{i \max} = 4.90\text{cm}^3/\text{s}$)

출유량은 감소하고 부하유량이 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 커지기 때문이라고 생각한다.

Fig. 9 (a)는 Fig. 8과 같은 조건에서 콕을 반 정도 열어 송출유량 $Q_o=3.24\text{cm}^3/\text{s}$, 부하유량 $Q_L=0.21\text{cm}^3/\text{s}$ 인 상태를 나타낸 것이다. Fig. 8과 비교해 볼 때 전기장을 가하지 않은 경우 송출유량의 증가에 따라 부하유량이 감소함을 알 수 있다. 이것은 유량이 증가함에 따라 출구 쪽으로 흐르는 ER유체의 관성력이 증가해서 부하유량의 발생을 감소시키기 때문이라고 생각한다. Fig. 9 (b)~(e)는 Fig. 8과 같이 전기장의 강도가 커짐에 따라 송출 유량은 감소하고, 부하유량이 증가 하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10 (a)는 Fig. 8, Fig. 9과 같은 조건에서 3포트 사각 튜브 상부의 콕을 완전히 열어 전극사이에서 ER유체의 유량이 최대($Q_o=4.90\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=0\text{cm}^3/\text{s}$)인 상태를 나타낸 것이다. 유량이 적은 Fig. 8과 다르게 출구 쪽으로 유량이 증가할 뿐 부하유량은 거의 없는 것을 알 수 있다. 그러나 전기장이 높은 $E=0.75\text{kV}/\text{mm}$ 에서 송출유량 $Q_o=3.07\text{cm}^3/\text{s}$ 로 감소하고 부하유량 $Q_L=1.6\text{cm}^3/\text{s}$ 로 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 전기장 $E=1.0\text{kV}/\text{mm}$ 인 경우 송출유량(Q_o)은 $0.15\text{cm}^3/\text{s}$, 부하유량(Q_L)은 $4.18\text{cm}^3/\text{s}$ 로 급격히 증가하는 것을 알 수 있는데, 이것은 가시화 사진에서도 알 수 있는 것과 같이 하부 전극에 전기장을 인가하게 되면 유량증가로 인해 전극 사이에서 ER입자가 많이 분산되어 전극부근에 형성된 단일 클러스터가 복합클러스터를 더욱 많이 형성하기 때문이라고 생각한다.

Fig. 11~Fig. 13은 Fig. 8~Fig. 10의 유동가시화 결과를 3포트 사각 튜브의 전기장 강도에 따른 송출유량 및 부하유량의 관계로 나타낸 그래프이다. Fig. 8~Fig. 10의 가시화 결과와 마찬가지로 송출유량이 감소할수록 부하유량은 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 하부전극에서 형성된 ER유체의 클러스터 양에 따라 부하유량이 비례적으로 발생되기 때문이라고 생각한다. 그러나 Fig. 13의 그래프는 Fig. 11과 Fig. 12의 그래프에 비해 기울기가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 3포트 사각 튜브의 하부 전극에 전기장을 인가하게 되면 유량증가로 인해 전극사이에 ER입자가 많이 분산되어, 전극부근에 형성된 단일 클러스터들이 복합클러스터를 형성하거나, 이미 형성된 복합 클러스터가 서로 적층되어 더 많은 유동저항이 발생되기 때문이라고 생각한다.

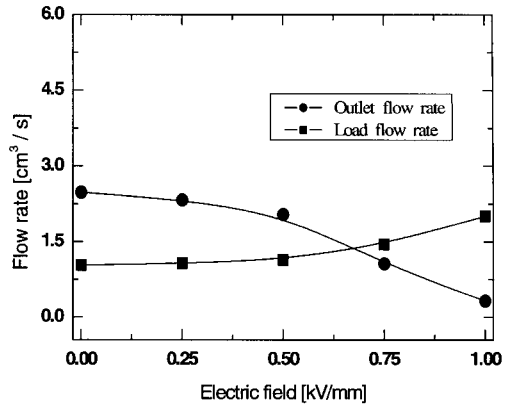


Fig. 11 Flow rate versus electric field strength of 3 port rectangular tube at $Q_{i\ max}=3.51\text{cm}^3/\text{s}$

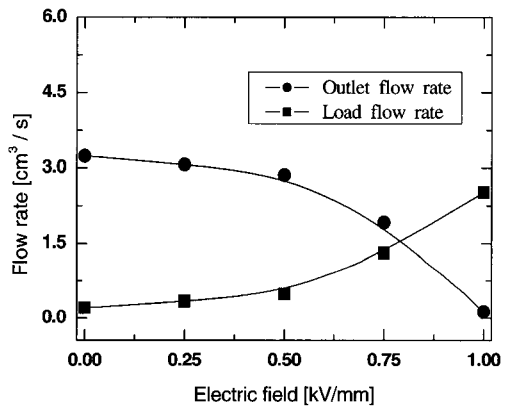


Fig. 12 Flow rate versus electric field strength of 3 port rectangular tube at $Q_{i\ max}=3.55\text{cm}^3/\text{s}$

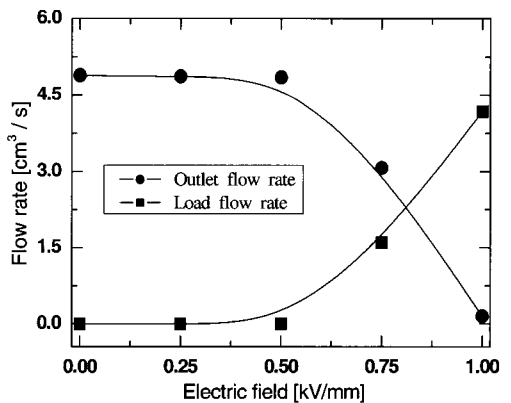


Fig. 13 Flow rate versus electric field strength of 3 port rectangular tube at $Q_{i\ max}=4.90\text{cm}^3/\text{s}$

5. 결론

본 연구에서는 3포트 ER 밸브를 개발하기 위한 준비단계로서, 2포트와 3포트 사각튜브를 자체 제작하고, 전극 사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화시키면서 송출 및 부하유량을 측정하였으며, 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 있다.
- (2) 3포트 사각 튜브에서 전기장의 강도가 증가할 수록 송출유량은 감소하고 부하유량이 증가하는 것은 하부전극에 ER유체가 클러스터를 형성하여 전극사이에서 유동저항을 발생시키기 때문인 것을 알 수 있다.
- (3) 송출유량이 감소할수록 부하유량이 비례적으로 증가하는 것은 하부전극에 형성된 ER유체의 클러스터 양이 증가함에 따른 것을 알 수 있다.
- (4) 유량이 많고 전기장의 강도가 높을수록 부하 유량이 급격히 증가하는 것은 3포트 사각 튜브 전극 사이의 유량 증가로 인해 ER입자가 많이 분산되어, 전극부근에 형성된 단일 클러스터들이 복합클러스터를 형성하거나, 이미 형성된 복합 클러스터가 서로 적층되어 더 많은 유동저항을 발생시키기 때문인 것을 알 수 있다.

참고 문헌

- (1) Wang, K. C., Mclay, R. and Carey, G. F., 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) Tsukiji, T., Takahashi, J., Sugimoto, N. and Ikeda, H., 1996, "Flow Characteristics of ERF between Two Parallel-Plate Electrodes," *JFPS*, Vol. 25, No. 4, pp. 104~561.
- (3) Jang, S. C., Yum, M. O. and Kim, 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.
- (4) Chang, T. H. and Jang, 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.
- (5) Choi, S. B. and Cheong, C. C., 1994, "Performance Investigation of a Cylindrical Valve Featuring Electro-Rheological Fluids," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 11, pp. 148~157.
- (6) Jung, D. W., Choi, Y. D. and Kim, S. G., 1994, "The Electrical and Rheological Properties of Zeolite Based ER Fluids," *Korea Journal of Materials Research*, Vol. 4, No. 2, pp. 213~218.
- (7) Yokota, S. and Kondoh, Y., 1996, "A Control valve by Making use of an ER Fluid," *JSME*, Vol. 62, No. 601, pp. 93~100.
- (8) Simmonds, A. J., 1991, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit," *IEE Proceeding-D*, Vol. 138, No. 4, pp. 400~404.
- (9) Brooks, D. A., 1992, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices," *Journal of Modern Physics*, Vol. 6, pp. 2705~2730.