

3 포트 ERF 밸브의 유량-방향 제어 성능 실험 -유압시스템 및 자동화 융합연구-

Performance Test of 3 Port ERF Valve for Controlling Flow Rate-Direction

장성철*†
S. C. Jang*†

(접수일 : 2012년 10월 26일, 수정일 : 2012년 10월 31일, 채택확정 : 2012년 11월 09일)

Key Words : Electro-Rheological(ER) Fluid(전기점성유체), 3 Port ER-Valve(3포트 ER밸브), Pressure Drop(압력강하), 3 Port Rectangular Tubes(3포트 사각튜브), Load Flow Rate(부하유량), Direction(방향)

Abstract : In this study, ER fluids were working fluid and yield shear stress of attained dispersive ER fluids made by analyzed to adapt effectively at the practical equipment like three port ER valve. In addition, movement of ER particle was observed by using a microscope the same as the strength of electric field with Bingham characteristic. Basis material was presented to develop 3 port ER-Valve by quantitatively comparing and analyzing entrance, load and outlet flow's differences of 3 port rectangular tubes. This study, after designing and producing the 3port ER-Valve, considered the characteristic of pressure drop, outlet and load flow rate by changing the strength of electric field on ER fluids flowing between electrodes.

1. 서 론

ER유체(electro-rheological fluid: 전기점성유체)는 비전도성의 절연성 오일 속에 강한 전도성의 고체 미립자를 분산시킨 현탁액이며, 전기장의 강도에 따라 유변학적 특성이 변화하는 기능성 유체이다. 전기적 신호만으로 ER유체의 유동을 제어할 수 있고, 응답시간이 수 내지 수십 ms 정도로 매우 빠르기 때문에 기존의 기계적 요소가 가지는 응답속도, 소음, 진동 등의 문제를 비교적 쉽게 해결할 수 있다. 또한 ER유체에 전기장을 인가하게 되면 절연성 오일 속에 분산된 전도성의 고체 미립자 사이에 분극현상이 발생하여 고체 미립자들이 체인 형태의 클러스터를 형성하게 되고, 이때 형성된 클러스터에 의해 유체 유동이 방해되어 마찰저항이 증가하게 된다.

ER유체로 작동되는 밸브(이하 ER 밸브라 함)에 관한 연구로 Simmonds¹⁾는 평판형의 ER-Valve를 제안하여 실험적인 고찰 없이 실용 가능성에 대해

언급하였다. Yokota와 Kondoh²⁾는 2포트 ER-Valve를 개발하여 전기장 강도에 따른 유량 및 밸브의 입·출구에서 생기는 압력강하 특성을 실험적으로 고찰하였다. Jeon³⁾은 전극길이 변화에 따른 3종류 형태의 실린더형 ER 밸브에 대한 성능연구를 수행하였다.

이와 같이 ER유체를 응용장치에 적용하기 위해서 여러 분야에서 연구가 진행되어 왔다⁴⁻⁶⁾. 그러나 지금까지의 연구결과에 의하면 2포트 ER밸브에 관한 연구는 많이 수행되어져 왔으나 3포트 ER밸브에 관한 연구는 수행된 경우가 없는 것으로 조사되었다. 또한 3포트 ER 밸브의 입구에서 출구와 부하 측으로 분기되는 두 지점의 복잡한 유변 현상을 규명하는 것은 중요한 기술적 과제이다.

본 연구에서는 3포트 사각튜브를 자체 제작하고, 전극 사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화 시키면서 송출 및 부하 유량을 측정하고, CCD 카메라를 이용하여 유동가시화 실험을 수행한 후 3포

*† 장성철(책임저자) : 한국폴리텍항공대학 메카트로닉스과
E-mail : scjang@kopo.ac.kr, Tel-055-830-3477

*† S. C. Jang(corresponding author) : Department of Mechatronics, Korea Aviation Polytechnic College
E-mail : scjang@kopo.ac.kr, Tel-055-830-3477

트 ERF 밸브를 설계·제작하여, 송출유량과 부하유량, 송출부와 부하부의 압력강하를 측정하여 유압시스템의 적용연구를 수행하였다.

2. ER유체의 유동특성

Fig. 1 (a), (b) 는 3포트 사각튜브 전극 내에서 전기장을 인가하지 않은 경우와 전기장을 인가한 경우의 유동특성을 나타낸 것이다. Fig. 1 (a)는 전기장을 인가하지 않은 경우로서, 3포트 사각튜브의 입구로 들어오는 유량(입구유량, Q_i), 송출되는 유량(송출유량, Q_o), 부하되는 유량(부하유량, Q_L)이 형성된다. Fig. 1(b)는 Fig. 1 (a)와 같은 조건에서 하부 전극에 전기장을 인가한 경우로서, 하부 전극에 형성된 클러스터에 의해 송출유량이 감소하고 부하유량이 증가하게 되며, 전기장의 강도가 증가할수록 부하유량도 증가하게 된다.

Fig. 2는 본 연구에서 설계·제작한 3포트 ER 밸브의 전체적인 형상과 내부구조를 나타낸 것이다. 제작된 3포트 ER밸브의 형상은 사각형의 적층으로 구성하였으며 전극판의 개수를 6개로 하여 총 5개의 유로가 형성되게 하였다. 내부 전극판의 재질은 전기전도도가 좋은 구리이며, 플라스틱 재질의 덮개를 상·하면에 부착하였으며, 플라스틱 볼트를 가공하여 압착시켰다. 플라스틱 볼트의 재질은 에폭시이며 직경은 6mm이다. 그리고 ER유체의 누설을 방지하기 위해서 전극판과 전극판 사이에는 실리콘 고무를 이용하였다. 각각의 전극판은 고전압 발생장치와 연결되어 있어 (+), (-)전극판으로 작용한다. 그리고 상판과 하판에는 오링('O'ring)으로 누유를 방지하였다.

Fig. 3은 3포트 ER밸브에서 발생하는 유량 및 압력강하 측정 원리를 나타낸 것이다. Fig. 3도 Fig. 1

과 동일하게 Q_i 는 입구유량, Q_L 은 부하유량, Q_o 는 송출유량으로 표시하였다. 그리고, 압력강하 ΔP_1 은 입구압력과 부하압력의 차이($\Delta P_1 = P_i - P_L$)이고, ΔP_2 는 입구압력과 송출압력의 차이($\Delta P_2 = P_i - P_o$)로 표시하였다. 3포트 ER 밸브의 전극사이에서 발생하는 전체 압력강하는 전기장이 인가되는 유로와 전기장이 인가되지 않은 유로의 형태로 표현할 수 있으며, 3포트 ER밸브의 전극사이에서 발생하는 전체 압력강하(ΔP)는 ER유체의 점성과 ER유체의 전기장에 따른 항복전단응력 변화에 의한 압력 강하의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{\mu} + \Delta P_{ER} \\ &= \frac{12\mu L Q_{ER}}{bh^3} + \frac{2L\tau_y(E)}{h} \\ &= \frac{12\mu L Q_{ER}}{bh^3} + \frac{2L\alpha E^{\beta}}{h} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 Q_{ER} 은 전기장 인가 시 3포트 ER밸브의 전극 사이를 통과하는 유량을 나타낸다. 식에서 나타난 바와 같이 전극 길이 L 이 클수록, 전극사이의 간극 h 가 작을수록 3포트 ER밸브에서 발생하는 전체 압력강하는 증가하게 된다.

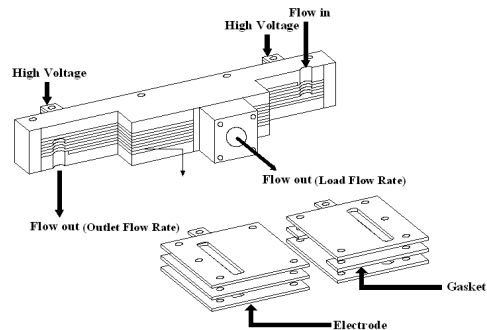


Fig. 2 Schematic diagram of 3 port ER-Valve

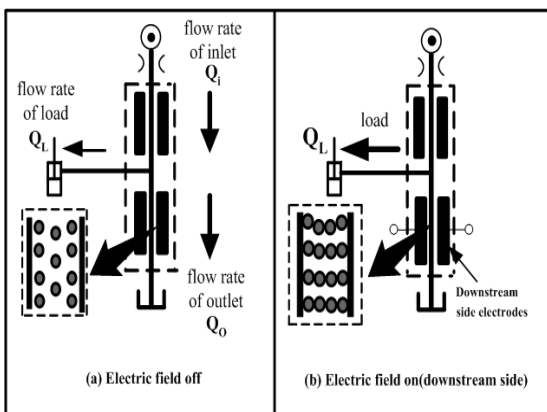


Fig. 1 Flow patten of ER fluids(3 port)

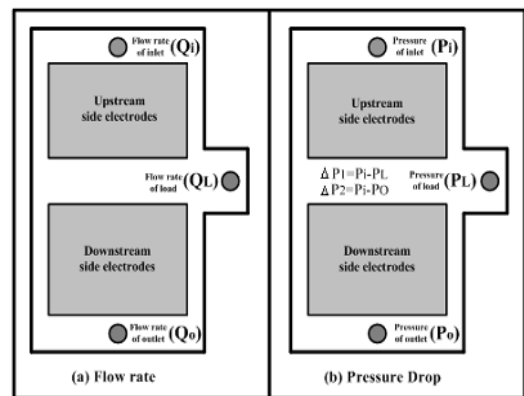


Fig. 3 Measurement of flow rate and pressure drop

3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 4는 본 연구의 실험 장치를 나타낸 것이다. 펌프에서 송출된 ER유체를 3포트 ERF밸브 간극 내부로 유입시키고, ERF밸브에 인가되는 전기장의 강도를 변화시켜 ER효과를 발생하게 하였다. 3포트 ERF밸브의 작동유체는 실리콘 오일(50cSt)과 전분입자의 무게분율이 35wt%인 ER유체를 사용하였다. ER유체에 혼합되어 있는 전분 입자의 침전을 방지하고, 입자분포를 균일하게 하기 위하여 탱크 안에 전동식 교반기를 장착하여 ER유체를 교반하였다. 유량을 공급하기 위한 펌프는 ER유체와 같이 유체내의 작은 입자들이 포함되어 있는 특수한 형태의 유체를 이송시키기 적합한 트로코이드 펌프를 사용하였고, 최대 유량은 4.5l/min 이다. 모터의 정격 회전수는 100rpm 이고 3상 교류 전압 220V로 구동하였다. 3포트 ERF밸브의 공급압력은 입구에 장착된 압계로 측정하였다. 공급압력은 펌프 송출측의 유량제어밸브(flow control valve), 바이패스밸브(by pass valve), 교축밸브 1,2,3을 조절하여 일정한 압력으로 유지하였다. 실험에서는 유량을 변화시켜 전기장 강도에 따른 압력 강하를 측정하였다. 유량은 단위 시간당 발생된 ER유체의 중량유량을 측정하였으며, 실리콘오일의 점성 및 전분 입자의 무게분율을 고려하여 체적유량으로 환산하였다. 전기장의 강도는 0~4kV/mm까지 1kV/mm씩 증가시켰다. 3포트 ERF밸브의 상부판의 입구부와 부하부 및 송출부에 압력 측정공을 뚫어 차압계를 연결하여 압력강하 ΔP_1 과 ΔP_2 를 측정하였다.

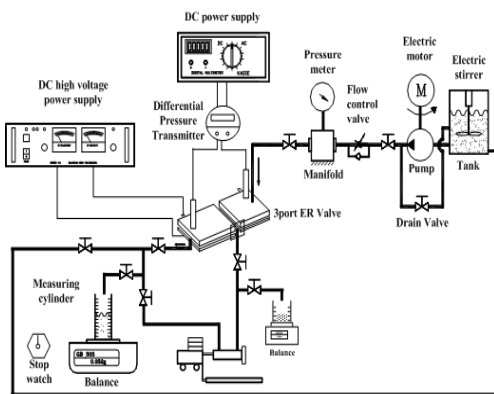


Fig. 4 Experimental apparatus

4. 실험결과 및 고찰

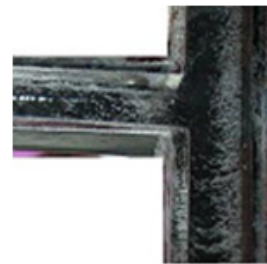
4.1 3포트 사각튜브

Fig. 5 (a)는 전기장을 인가하지 않은 상태에서 3

포트 사각튜브 상부의 콕을 조금 열어 초기유동이 시작된 상태를 나타낸 것이고 (b)~(e)는 (a)의 상태에서 전기장의 강도를 증가시킨 경우이다. 전기장을 인가하지 않은 경우 Fig. 1(a)에서 설명한 것과 같이



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



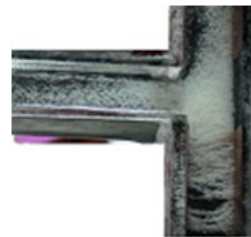
(b) $E=0.25\text{kV/mm}$, $Q_0=2.33\text{cm}^3/\text{s}$, $Q_L=1.07\text{cm}^3/\text{s}$



(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. 5 Flow in 3port Rectangular tube($Q_0=2.48\text{cm}^3/\text{s}$)

송출유량 뿐 아니라 부하유량도 많이 발생된 것을 알 수 있다. 그러나 전기장의 강도가 증가할수록 송출유량은 감소하고 부하유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 1(b)에서 설명한 것과 같이 하부 전극에 전기장을 인가하게 되면 클러스터의 결합력

이 더욱 증가하여, 전극사이에서 흐르는 ER유체의 흐름 저항이 커지기 때문이라고 생각한다.

Fig. 6 (a)는 Fig. 5와 같은 조건에서 3포트 사각튜브 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. 5와 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)은 $3.07\text{cm}^3/\text{s}$ 로 감소하고 부하유량(Q_L)은 $1.6\text{cm}^3/\text{s}$ 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 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.



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



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



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



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



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

Fig. 6 Flow in 3port Rectangular tube($Q_o=4.90\text{cm}^3/\text{s}$)

4.2 3포트 ER밸브

Fig. 7~Fig. 9는 3포트 ER밸브의 전기장 강도에 따른 송출유량 및 부하유량의 관계를 나타내는 실험 결과이다.

Fig. 7은 송출유량(Q_o)이 $9.92\text{cm}^3/\text{s}$, 입구압력(P_i)이 39.2kPa 인 경우이며 전기장의 강도가 증가할수록 송출유량은 감소하고 부하유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 하부전극에 인가된 전기장의 강도가 증가할수록 3포트 ER밸브의 하부전극에 형성된 ER유체의 클러스터의 저항으로 송출유량이 감소하고 부하유량이 비례적으로 증가되기 때문이라고 생각한다. 또한, 전기장이 인력가되기 전에는 송출유량이 부하유량보다 많게 나타나다 전기장이 $1\text{kV}/\text{mm}$ 인 경우 부하유량이 송출유량보다 많아지는 것을 알 수 있다. 이것은 전기장의 강도가 $1\text{kV}/\text{mm}$ 인 경우 하부전극에서 클러스터가 많이 형성되어 유동 저항이 발생되었기 때문이라고 생각한다.

Fig. 8은 송출유량(Q_o)이 $25.92\text{cm}^3/\text{s}$, 입구압력(P_i)이 98kPa 인 경우로 Fig. 7과 비교해 볼 때 전기장을 인가하지 않은 경우 송출유량의 증가에 따라 부하유량이 감소함을 알 수 있다. 그리고 전기장의 강도가 $1\text{kV}/\text{mm}$ 가 아닌 $2\text{kV}/\text{mm}$ 인 경우 부하유량이 송출유량보다 많아짐을 알 수 있다. 이는 Fig. 7과는 달리 유량의 증가로 인해 출구 쪽으로 흐르는 ER유체의 관성력이 커져 $1\text{kV}/\text{mm}$ 인 경우보다 $2\text{kV}/\text{mm}$ 인 경우 더 많은 클러스터들이 적층되고 결합력이 커져

전극사이에서 흐르는 ER유체의 흐름 저항이 증가되기 때문이라고 생각한다.

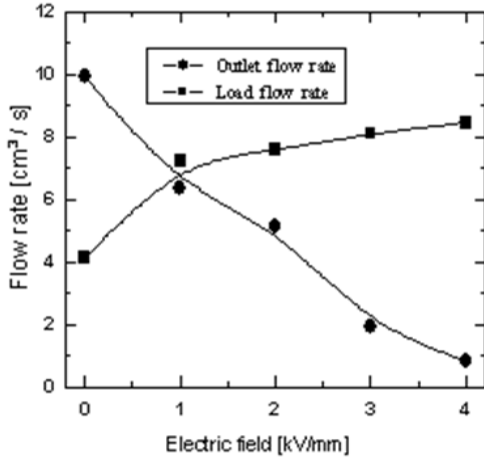


Fig. 7 Flow rate vs. electric field strength of 3port ER-Valve at $Q_o=9.92\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=39.2\text{kPa}$

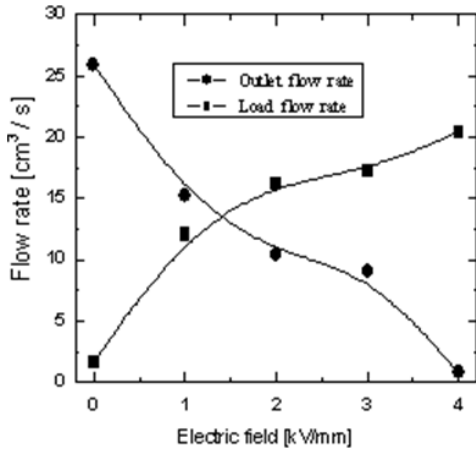


Fig. 8 Flow rate vs. electric field strength of 3port ER-Valve at $Q_o=25.92\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=98\text{kPa}$

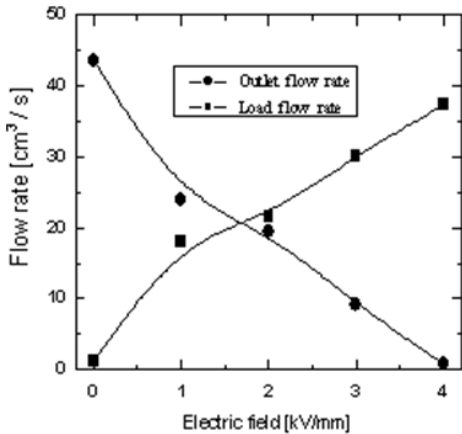


Fig. 9 Flow rate vs. electric field strength of 3port ER-Valve at $Q_o=43.55\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=176.4\text{kPa}$

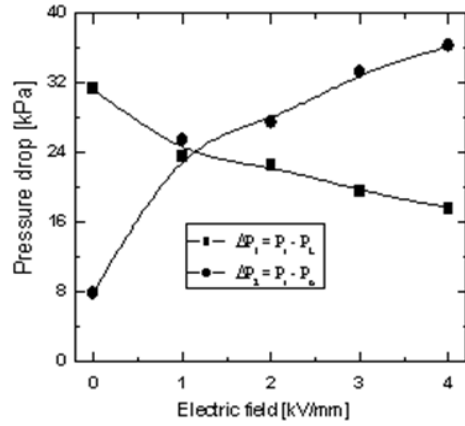


Fig. 10 Pressure drop vs. electric field strength of 3 port ER-Valve at $Q_o=9.92\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=39.2\text{kPa}$

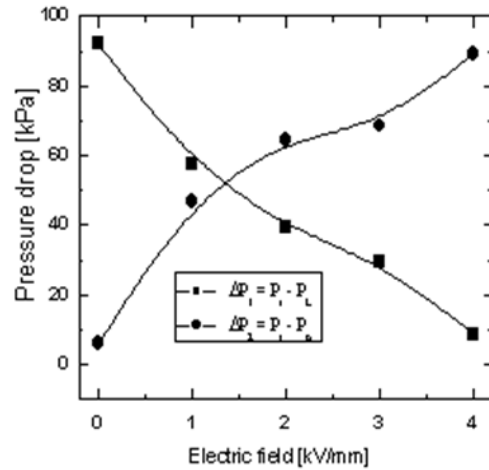


Fig. 11 Pressure drop vs. electric field strength of 3 port ER-Valve at $Q_o=25.92\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=98\text{kPa}$

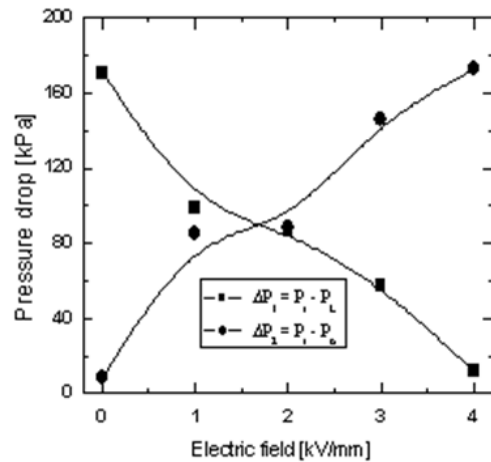


Fig. 12 Pressure drop vs. electric field strength of 3 port ER-Valve at $Q_o=43.55\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=176.4\text{kPa}$

Fig. 9는 유량이 최대(송출유량(Q_0)=43.55cm³/s, 입구압력(P_i)=176.4Pa)인 경우로 유량의 증가로 인해 전기장이 2kV/mm일 때 Fig. 8보다 그 차이는 작지만 부하유량이 송출유량보다 많아짐을 알 수 있다.

Fig. 10~Fig. 12는 3포트 ER밸브에서 발생하는 전기장 강도와 압력강하의 관계를 나타낸 실험결과이다.

Fig. 7~Fig. 9의 실험결과에서도 알 수 있듯이 전기장을 증가시키면 부하유량의 증가와 함께 부하압력도 증가하므로 입구부와 부하부의 압력강하(ΔP_1)는 감소하고, 송출유량의 감소와 함께 송출압력도 감소하므로 입구부와 송출부의 압력강하(ΔP_2)가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 3포트 ER밸브의 하부전극에 전기장을 인가하면 ER유체 속에 혼합되어 있는 ER입자가 클러스터 형태가 되어 유체의 유동저항을 증가시키고, 전기장의 강도가 증가할수록 전극에 부착하는 클러스터는 굵어지고 길어져서 클러스터의 결합력이 유동저항이 되거나, 굵어진 클러스터가 전극사이에서 적층되어 더 많은 유동저항을 발생시키기 때문이라고 생각한다.

5. 결 론

본 연구에서는 3포트 사각튜브를 자체 제작하고, 전극 사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화 시키면서 송출 및 부하 유량을 측정하고, CCD카메라를 이용하여 유동가시화 실험을 수행한 후 3포트 ER밸브를 설계·제작하여, 송출유량과 부하유량, 송출부와 부하부의 압력강하를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 3포트 사각튜브에서 전기장의 강도가 증가할수록 송출유량은 감소하고 부하유량이 증가하는 것은 하부 전극부근에 형성된 단일 클러스터들이 복합클러스터를 형성하거나, 이미 형성된 복합 클러스터가 서로 적층되어 더 많은 유동저항이 발생되기 때문이다.
2. 3포트 ER 밸브에서 송출유량과 부하유량의 합이 입구유량과 다르게 나타난 것은 실리콘 오일과 전분입자의 비중이 다르고, 전기장의 강도가 증가할수록 송출유량의 감소와 함께 하부전극에는 전기장으로 인해 형성된 ER유체의 클러스터가 적층되어 실리콘 오일보다 전분입자의 양이 많아지기 때문인 것을 알 수 있었다.
3. 3포트 ER밸브의 하부전극에 전기장 강도가 증

가할수록 부하유량이 증가하고 송출유량은 감소하며, 입구압력과 부하압력의 차(ΔP_1)는 감소하고 입구압력과 송출압력의 차(ΔP_2)가 증가하는 것은 하부전극에 ER유체가 클러스터를 형성하여 전극 사이에서 유동 저항을 발생시키기 때문인 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. A. J. Simmonds, 1991, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", IEE Proceeding-D, Vol. 138, No. 4, pp. 400-404.
2. S. Yokota, Y. Kondoh, 1996, "A Control valve by Making use of an ER Fluid", JSME, Vol. 62 No. 601, pp. 3478.
3. Y. S., Jeon., 1998, "Performance Investigation of Cylinder-Type ER Valves With Different Electrode Length", KSMTE, Vol. 7 No. 6, pp. 1-11
4. D. A. Brooks, 1992. 6, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", Journal of Modern Physics, Vol. 6 pp. 2705-2730,
5. 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.
6. S. C. Jang, M. O. Yum, 2003, "Design and Performance Test of Plate Type ER-Valve", KSMTE, Vol.12 No. 6, pp. 29-35.
7. S. C. Jang, 2011, "Flow Analysis of High Pressure and High Pressure Drop for Control Valve with 3-Dimensional Path Way Type", KSPSE Autumn Conference, pp. 330-333.
8. J. S, Jang, 2012, "A Study on the Selection Method of Parameters for Energy Saving in Pneumatic Cylinder Driving Apparatus", Vol.16 No. 2, pp. 60-65.