

ER유체 제어용 3포트 ER 밸브의 성능 고찰

장성철⁺, 염만오^{*}

(논문접수일 2007. 1. 31, 심사완료일 2007. 4. 17)

An Investigation of 3 Port ER Valve for Controlling Electro-Rheological Fluids

Sung-Cheol Jang⁺, Man-oh Yum^{*}

Abstract

The structure of ER valve is simple that its designing and manufacturing are easy. The flow rate and pressure of ER fluids flowing in the ER valve are controlled only by electric field. In this study a three port ER valve is designed and manufactured. Then, the flow rate and pressure drop of ER fluids flowing in the ER valve are measured. The system proposed controls flow rate and pressure fast. So, this system can be easily substituted for the existing hydraulic and pneumatic control system.

Key Words : ER Fluids(전기점성유체, ER유체), ER Valve(ER밸브), Electric Field(전기장), Flow Rate(유량), Pressure Drop(압력강하), Hydraulic and Pneumatic Control System(유공압제어시스템)

1. 서론

前報⁽¹⁾에서는 3포트 ER 밸브를 개발하기 위한 전 단계로서, 2포트와 3포트 사각튜브를 자체 제작하고, 전극 사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화 시키면서 송출 및 부하 유량을 측정하고, CCD 카메라를 이용하여 유동가시화 실험을 수행하였다. 또한 3포트 사각 튜브의 입구유량과 부하 및 송출 유량의 차이를 정량적으로 비교·분석하여 3포트 ER 밸브를 개발하는데 기초자료를 제시하였다.

ER유체로 작동되는 밸브⁽²⁾(이하 ER밸브라 함)는 유량과

압력을 조절하기 위한 전극만을 필요로 하기 때문에 단순한 구조로 시스템을 설계할 수 있다. 아울러 ER유체의 고속 응답성과 고기능성을 이용하여 제어시간이 빠른 유압제어기를 개발할 수 있다. 설계 및 제작 측면에서 ER유체를 적용하게 되면, 압력과 유량을 조절하기 위해 필요한 전기장 공급 장치와 전극만을 첨가시킴으로서, 밸브 내부의 기계적인 부품이 필요 없이 설계의 단순화가 가능하다. 이렇게 단순한 구조에서도 전기장의 강도만으로 유체가 발생하는 힘을 조절함으로써 제어 대상 시스템을 고정도로 제어 할 수 있다.

ER 밸브에 대한 실질적인 연구는 1980년대 중반에 들어

⁺ 삼원기술(주) 기술연구소 (sccjang@31tech.com)
621-871 경남 김해시 한림면 가동리 586

^{*} 경남대학교 기계자동화공학부

와서 본격적으로 시작되어 응용사례가 국·내외에서 다수 발표되고 있다. Simmonds⁽³⁾는 평판형의 ER 밸브를 제안하여 실험적인 고찰 없이 실용가능성에 대해 고찰하였다. Brooks⁽⁴⁾는 ER 밸브를 이용한 유압회로와 여러 가지 형태의 밸브를 제시, 압력강하에 대한 실험을 수행하여 실현 가능성을 입증하고 그 응용 시스템에 관해 언급하였다. Yokota 등⁽⁵⁾은 2포트 ER 밸브를 개발하여 밸브의 입·출구에서 생기는 압력강하와 전기장 강도에 따른 정특성을 실험적으로 연구하였다.

이와 같이 ER 밸브를 응용장치에 적용하기 위해서 여러 분야에서 연구가 진행되어 왔다. 그러나 지금까지의 연구결과에 의하면 입·출구가 하나인 밸브(이하 2포트 밸브라 함)에 관한 연구는 많이 수행되어져 왔으나, 입구가 1개이고 출구가 2개인 밸브(이하 ER 밸브라 함)에 관한 연구는 수행된 경우가 없는 것으로 조사되었다. 또한 ER 밸브의 입구에서 출구와 부하 측으로 분기되는 두 지점의 복잡한 유변현상을 규명하는 것은, ER 밸브를 개발하기 위한 중요한 기술적 과제이다.

본 연구에서는 ER 밸브를 설계·제작하여 전극사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화시키면서 송출유량과 부하유량, 부하부와 송출부의 압력강하를 측정하고, 이를 유공압 시스템의 대체 가능성에 대해 검토하였다.

2. ER밸브 및 ER유체의 특성

Fig. 1과 Photo. 1은 본 연구에서 설계·제작한 ER 밸브의 전체적인 형상과 내부구조를 나타낸 것이다. 제작된 ER 밸브의 형상은 사각형의 적층으로 구성하였으며 전극판의 개수를 6개로 하여 총 5개의 유로가 형성되게 하였다. 내부 전

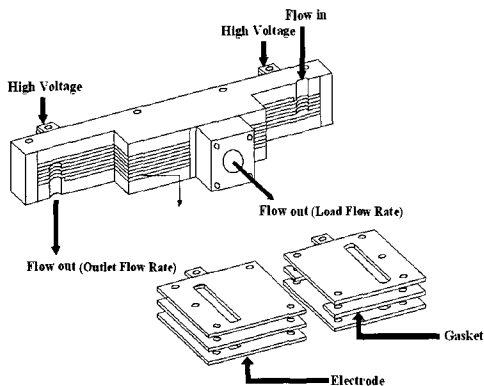
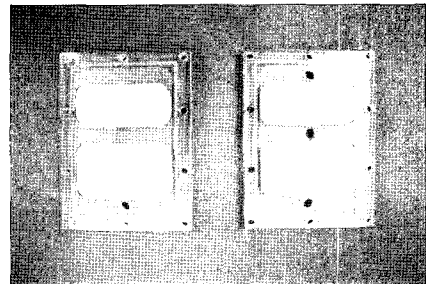


Fig. 1 Schematic diagram of ER-Valve

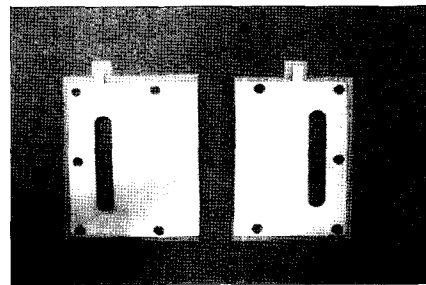
극판의 재질은 전기전도도가 좋은 구리이며, 플라스틱 재질의 덮개를 상·하면에 부착하였으며, 플라스틱 볼트를 가공하여 압착시켰다. 플라스틱 볼트의 재질은 에폭시이며 직경은 6mm이다. 그리고 ER유체의 누설을 방지하기 위해서 전극판과 전극판 사이에는 실리콘 고무를 이용하였다. 각각의 전극판은 고전압 발생장치와 연결되어 있어 (+), (-) 전극판으로 작용한다. 그리고 상판과 하판에는 오링(O'ring)으로 누유를 방지하였다.

Fig. 2는 ER 밸브의 전극 내에서 ER유체가 흐를 경우 전기장을 인가하지 않은 경우와 전기장을 인가한 경우의 유량과 압력 특성을 나타낸 것이다. Fig. 2 (a)는 전기장 유·무에 의한 유량 특성으로서, ER 밸브의 입구로 들어오는 유량(Q_i), 송출되는 유량(Q_o), 부하유량(Q_L)을 나타낸 것이다. Fig. 2 (b)는 Fig. 2 (a)와 동일하게 전기장 유·무에 의한 압력 특성으로서, ER 밸브의 입구압력(P_i), 송출압력(P_o), 부하압력(P_L)을 나타낸 것이다.

Fig. 3은 ER 밸브에서 발생하는 유량 및 압력강하의 측정 원리를 나타낸 것이다. 압력강하 ΔP_1 은 입구압력과 부하압력의 차($\Delta P_1 = P_i - P_L$)이고, 압력강하 ΔP_2 는 입구압력과 송출압력의 차($\Delta P_2 = P_i - P_o$)이다.



(a) Shape of top and bottom plates



(b) Electrodes and silicone rubber

Photo. 1 Photograph of 3port ER-Valve plates

한편, Fig. 2와 Fig. 3의 ER 밸브에 전기장을 인가하게 되면, (+), (-)전극 사이에서 클러스터의 형성으로 인해, 교축밸브에서 교축부의 개도가 변화하는 것처럼 압력강하 및 유량 변화와 같은 현상이 발생된다. (+), (-)전극의 간극은 클수록 좋지만, 필요이상으로 크면 에너지 손실이 많아 지고 ER 효과가 감소하게 되어 바람직하지 못하므로 적당

한 간극을 선택할 필요가 있다. 압력강하와 유량과의 관계는 식 (1)과 같다⁽⁵⁾.

$$Q_{ER} = C_d A \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} \quad (1)$$

여기서 C_d 는 유량계수, A 는 전극사이의 면적, ρ 는 ER유체의 밀도이다.

ER 밸브의 전극사이에서 발생하는 전체 압력강하는 전기장이 인가되는 유로와 전기장이 인가되지 않은 유로의 형태로 표현할 수 있으며, 전기장을 인가하지 않을 경우 압력강하는 ER유체의 점성에만 영향을 받으며, 전극 사이를 통과하는 유량에 비례한다. 따라서 이 경우의 유체 유동 압력강하는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다⁽⁴⁾.

$$\Delta P_\mu = \frac{12\mu LQ}{bh^3} \quad (2)$$

여기서, b 는 전극 폭, h 는 전극 사이의 간극, L 은 전극의 길이, Q 는 전기장이 인가되지 않은 경우의 통과 유량을 나타낸다.

ER유체에 전기장이 인가되면 ER유체의 항복전단응력 $\tau_y(E)$ 에 의한 압력강하 ΔP_{ER} 이 추가적으로 발생되며, $\tau_y = \alpha E^\beta$ 으로 나타낼 수 있다. 계수 α, β 는 ER유체의 절연 유 종류, 입자종류, 무계분율 등 ER유체의 조성조건에 영향을 받는 ER유체의 고유상수로서 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

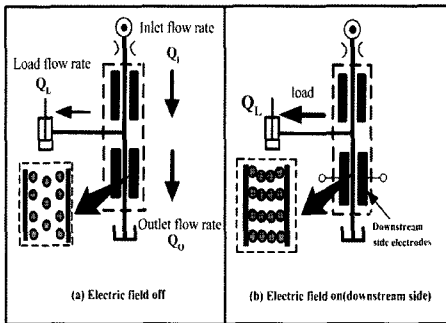
$$\Delta P_{ER} = \frac{2L\tau_y(E)}{h} = \frac{2L\alpha E^\beta}{h} \quad (3)$$

따라서 ER 밸브의 전극사이에서 발생하는 전체 압력강하 (ΔP)는 ER유체의 점성과 ER유체의 전기장에 따른 항복전단응력 변화에 의한 압력 강하의 합으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

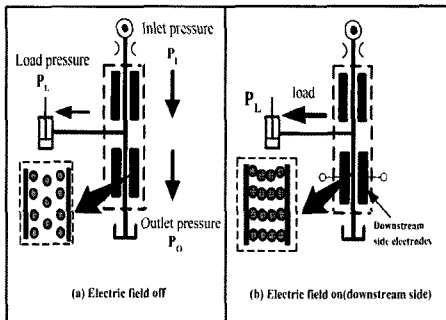
$$\Delta P = \Delta P_\mu + \Delta P_{ER} \quad (4)$$

식 (2)와 (3)을 식 (4)에 대입하면 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{12\mu LQ_{ER}}{bh^3} + \frac{2L\tau_y(E)}{h} \\ &= \frac{12\mu LQ_{ER}}{bh^3} + \frac{2L\alpha E^\beta}{h} \end{aligned} \quad (5)$$



(a) Flow rate



(b) Pressure

Fig. 2 Flow and Pressure patten of ER fluids

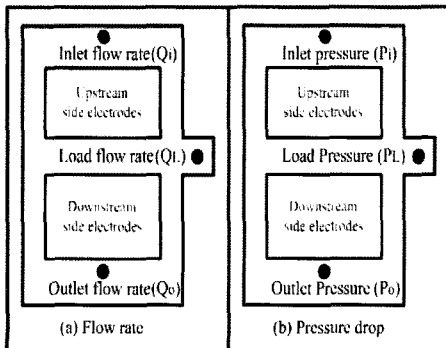


Fig. 3 Sensor position of flow rate and pressure drop

여기서, Q_{ER} 은 전기장 인가 시 ER밸브의 전극사이를 통과하는 유량을 나타낸다. 식 (5)에서 전기장을 인가하지 않았을 경우에는 항복전단응력 $\tau_y(E)$ 값이 없으므로 전체압력은 ER 밸브내의 ER유체의 점성에 의해서만 영향을 받지만, 전기장을 인가하면 항복전단응력 $\tau_y(E)$ 의 증가로 인해 유체 유동이 나타나지 않는다. 이러한 특징이 기존 밸브 시스템과는 다른 점으로 동일 부분에서 두 가지 성능을 나타낼과 동시에 ER유체의 빠른 반응시간으로 압력강하가 빠르게 나타난다⁽⁷⁾. 식에서 나타난 바와 같이 ER 밸브의 성능은 전극 길이 L , 전극사이의 간극 h , 인가되는 전기장의 강도 및 항복전단응력의 크기 등에 의해 영향을 받는다.

3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 4는 본 연구의 실험 장치를 나타낸 것이다. 펌프에서 송출된 ER유체를 ER밸브 간극 내부로 유입시키고, ER밸브에 인가되는 전기장의 강도를 변화시켜 ER효과를 발생하게 하였다. ER밸브의 작동유체는 실리콘 오일(50cSt)과 전분 입자의 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 이송시키기에 적합한 트로코이드 펌프를 사용하였고, 최대 유량은 4.5l/min 이다. 모터의 정격회전수는 1000rpm이고 3상 교류 전압 220V로 구동하였다. ER 밸브의 공급압력은 입구에 장착된 압력계로 측정하였다. 공급압력은 펌프 송출측의 유량제어밸브(flow control valve), 바

이패스밸브(by pass valve), 교축밸브 1, 2, 3을 조절하여 일정한 압력으로 유지하였다. 실험에서는 유량을 변화시켜 전기장 강도에 따른 압력강하를 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. ER밸브의 상부판의 입구부와 부하부 및 송출부에 압력 측정공을 뚫어 차압계를 연결하여 압력강하 ΔP_1 과 ΔP_2 를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5~Fig. 7은 전분입자의 무게분율을 35wt%로 조성한 ER유체에 대하여 전극사이의 간극 2mm인 상태에서 ER밸브의 전기장 강도에 따른 송출 및 부하유량의 관계를 나타낸 실험결과이다.

Fig. 5는 ER 밸브 상부 콕을 조금 열어 송출유량 $Q_0=9.92\text{cm}^3/\text{s}$, 부하유량 $Q_L=4.12\text{cm}^3/\text{s}$, 입구압력 $P_i=39.2\text{kPa}$ 의 초기유동이 시작된 상태를 나타낸 것이다. 전기장이 인가되기 전에는 송출유량이 부하유량보다 크지만, 전기장의 강도가 1kV/mm에서는 송출유량 $Q_0=6.52\text{cm}^3/\text{s}$ 이고, 부하유량 $Q_L=7.45\text{cm}^3/\text{s}$ 로 송출유량은 감소하고 부하유량이 증가한 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2 (b)에서 설명한 것과 같이 ER 밸브의 하부전극에 전기장의 강도가 커질수록 (+), (-) 전극 사이에서 클러스터의 결합력이 증가하여, 전극사이에서 흐르는 ER유체의 유동저항이 발생되어 유체의 흐름 방향이 송출부가 아닌 부하부로 바뀌었기 때문이다.

Fig. 6은 Fig. 5와 같은 조건에서 ER밸브 상부 콕을 반 정도 열어 송출유량 $Q_0=25.92\text{cm}^3/\text{s}$, 부하유량 $Q_L=2.12\text{cm}^3/\text{s}$, 입구압력 $P_i=98\text{kPa}$ 인 상태를 나타낸 것이다. Fig. 5와 비교해 볼 때 전기장이 1kV/mm로 인가되더라도 송출유량 $Q_0=15.2\text{cm}^3/\text{s}$, 부하유량 $Q_L=12.25\text{cm}^3/\text{s}$ 로 송출유량이 부하유량보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 ER 밸브의 형상이 부하부에서의 유로가 90도의 각을 가지고 있어 에너지 손실이 많아지거나, 식 (1)에서와 같이 부하부에서의 유량 감소로 인해 압력강하도 감소한다고 생각한다. 또한 전기장에 의해 형성된 ER유체의 클러스터가 송출부의 유량증가로 인해 유동을 견뎌낼 수 있을 만큼 강한 클러스터가 형성되지 못하였기 때문이다. 그러나 전기장의 강도가 2kV/mm에서는 송출유량 $Q_0=10\text{cm}^3/\text{s}$, 부하유량 $Q_L=16.27\text{cm}^3/\text{s}$ 로 송출유량보다 부하유량이 큰 것을 알 수 있다. 이것은 ER 밸브의 하부전극에 전기장의 강도가 증가할수록 직선형의 강한 클러

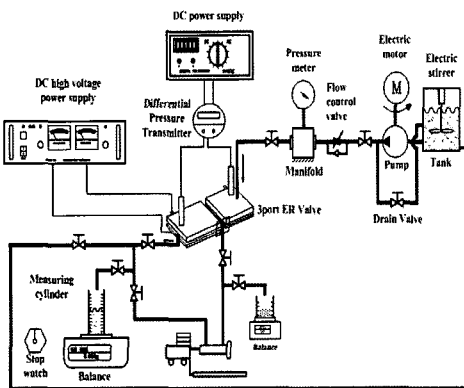


Fig. 4 Experimental apparatus

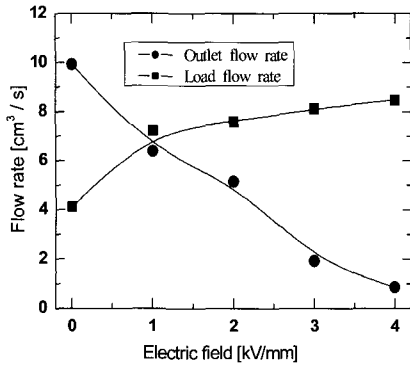


Fig. 5 Flow rate vs electric field strength of ER-Valve at $Q_0=9.92\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=39.2\text{kPa}$

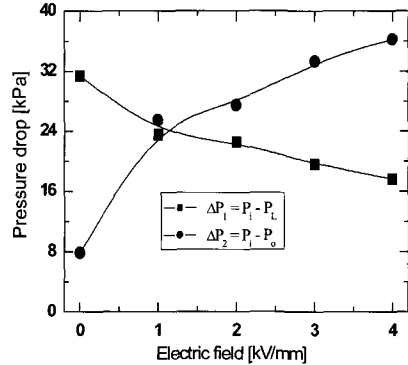


Fig. 8 Pressure drop vs electric field strength of ER-Valve at $Q_0=9.92\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=39.2\text{kPa}$

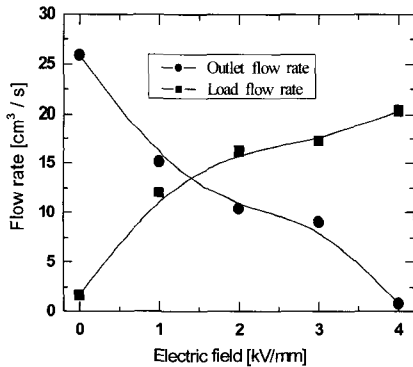


Fig. 6 Flow rate vs electric field strength of ER-Valve at $Q_0=25.92\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=98\text{kPa}$

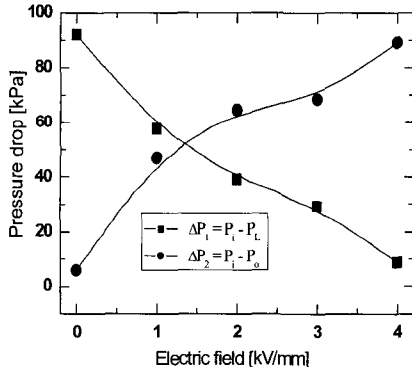


Fig. 9 Pressure drop vs electric field strength of ER-Valve at $Q_0=25.92\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=98\text{kPa}$

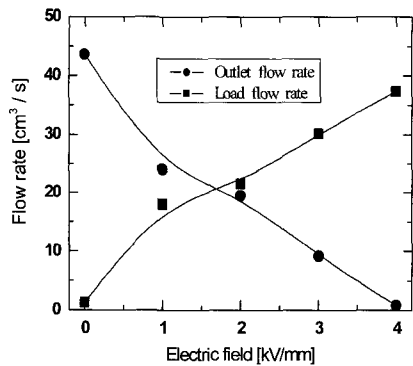


Fig. 7 Flow rate vs electric field strength of ER-Valve at $Q_0=43.55\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=176\text{kPa}$

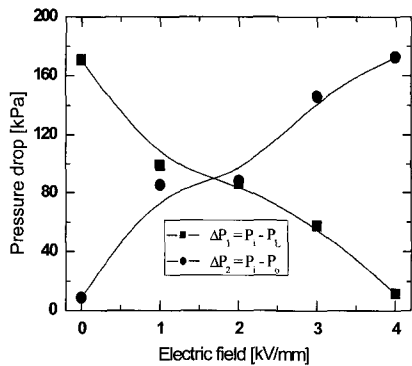


Fig. 10 Pressure drop vs electric field strength of ER-Valve at $Q_0=43.55\text{cm}^3/\text{s}$ and $P_i=176\text{kPa}$

스터가 형성되거나, (+), (-) 전극 사이에 부착하는 클러스터가 끊어지거나 길어져서 클러스터의 결합력이 더 많은 유동저항을 발생시키기 때문이다.

Fig 7은 Fig 5, Fig 6과 같은 조건에서 ER 밸브 상부의 콧을 완전히 열어 송출유량 $Q_o=43.55\text{cm}^3/\text{s}$, 부하유량 $Q_L=1.12\text{cm}^3/\text{s}$, 입구압력 $P_i=176.4\text{Pa}$ 인 상태를 나타낸 것이다. 전기장을 인가하기 전에는 Fig. 6과 유사하게 송출유량은 증가하지만 부하유량은 거의 발생되지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 전기장이 $2\text{kV}/\text{mm}$ 부터는 부하유량이 비례적으로 많이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 ER 밸브의 하부전극에 전기장이 인가됨에 따라 (+), (-) 전극사이의 유량증가로 인해 ER 입자인 전분이 상대적으로 많이 분산되어, 전극부분에 형성된 단일 클러스터들이 복합 클러스터를 형성하거나, 이미 형성된 복합 클러스터가 서로 적층되어 더 많은 유동저항이 발생되기 때문이라고 생각한다.

Fig. 8~Fig. 10은 Fig. 5~Fig. 7의 실험과 동일한 조건에서 ER 밸브에서 발생하는 전기장 강도와 압력강하의 관계를 나타낸 실험결과이다.

Fig. 8에서 전기장을 인가하기 전에는 입구압력과 송출압력의 차 ΔP_2 보다 입구압력과 부하압력의 차 ΔP_1 이 크지만, 전기장의 강도가 $1\text{kV}/\text{mm}$ 에서는 ΔP_2 가 ΔP_1 보다 큰 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5에서 설명한 것과 같이 ER 밸브의 하부전극에 전기장이 인가되면 (+), (-) 전극 사이에 형성된 클러스터에 의해 ER유체의 흐름방향이 송출부에서 부하부로 바뀌고, 부하부에서의 유량이 송출부보다 많아지기 때문이다.

Fig. 9~Fig. 10도 Fig. 8과 유사하게 전기장의 강도가 증가할수록 ER 밸브의 (+), (-) 하부 전극 사이에서 ER유체

의 클러스터 구조가 강화되면서 송출부에서의 유량은 감소하고 부하부에서의 유량이 증가하기 때문이라고 생각하며 이러한 관계를 Fig. 11에 나타내었다.

이상의 실험결과에서 알 수 있는 것과 같이 기존 밸브에서 유동 흐름을 제어하기 위하여 밸브의 개폐 작용에 의한 기계적인 방법을 이용하지만, 제안된 ER 밸브는 전기장의 강도만으로 시스템에 필요한 유량 및 압력을 순간적으로 변동시키므로 빠른 제어성과 구조의 단순성 등의 이점이 있어 기존의 유량 및 압력을 제어하는 유공압 시스템에 대체하여 사용할 수 있을 것으로 생각한다.

5. 결론

본 연구에서는 ER 밸브를 설계·제작하여 전극사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화시키면서 송출유량과 부하유량, 부하부와 송출부 압력강하를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전기장의 강도가 $1\text{kV}/\text{mm}$ 에서 송출유량은 감소하고 부하유량이 증가한 것은 ER 밸브의 하부 전극에 전기장의 강도가 커질수록 (+), (-) 전극 사이에서 클러스터의 결합력이 증가하여, 전극사이에서 흐르는 ER유체의 유동저항이 발생되어 유체의 흐름방향이 송출부가 아닌 부하부로 바뀌었기 때문이다.
- (2) 전기장의 강도가 $1\text{kV}/\text{mm}$ 로 인가되더라도 송출 유량이 부하유량보다 큰 것은 전기장에 의해 형성된 ER유체의 클러스터가 송출부의 유량증가로 인해 유동을 견뎌낼 수 있을 만큼 강한 클러스터가 형성되지 못하였기 때문이다.
- (3) 전기장의 강도가 $2\text{kV}/\text{mm}$ 에서 부하유량이 비례적으로 많이 증가하는 것은 ER 밸브의 하부전극에 전기장이 인가되면 (+), (-) 전극사이의 유량증가로 인해 ER입자인 전분이 상대적으로 많이 분산되어, 전극부분에 형성된 단일 클러스터들이 복합 클러스터를 형성하거나, 이미 형성된 복합 클러스터가 서로 적층되어 더 많은 유동저항이 발생되기 때문이다.
- (4) 전기장의 강도가 $1\text{kV}/\text{mm}$ 에서 ΔP_2 가 ΔP_1 보다 큰 것은 ER 밸브의 하부전극에 전기장이 인가됨에 따라 (+), (-) 전극 사이에 형성된 클러스터에 의해 ER유체의 흐름방향이 송출부에서 부하부로 바뀌고, 부하부에서의 유량이 송출부보다 많아지기 때문이다.

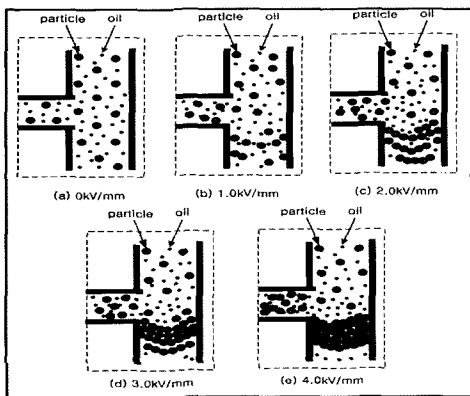


Fig. 11 Flow patten of ER fluids in ER-Valve

후 기

“본 연구는 2006학년도 경남대학교 학술논문게재 연구비 지원으로 이루어 졌음”.

참 고 문 헌

- (1) Jang, S. C., Jang, M. J. and Yum, M. O., 2006, “A Flow Visualization of ER Fluids in 3Port Rectangular Tube,” *KSMTE*, Vol. 15, No. 2, pp. 30~37.
- (2) Jang, S. C. and Yum, M. O., 2004, “Design and Performance Test of Valve Operated by ER Fluids,” *KSMTE*, Vol. 13, No. 1, pp. 29~35.
- (3) Simmonds, A. J., 1991, “Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit,” *IEE Proceeding-D*, Vol. 138, No. 4, pp. 400~404.
- (4) Brooks, D. A., 1992, “Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices,” *Journal of Modern Physics*, Vol. 6, pp. 2705~2730.
- (5) Yokota, S. and Kondoh, Y., 1996, “A Control valve by Making use of an ER Fluid,” *JSME*, Vol. 62, No. 601, pp. 93~100.
- (6) Jang, S. C. and Yum, M. O., 2003, “Design and Performance Test of Plate Type ER-Valve,” *KSMTE*, Vol. 12, No. 6, pp. 29~35.
- (7) 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.