

PLC를 이용한 ER밸브-FHA의 제어특성에 관한 연구

장성철*, 홍순남⁺

(Manuscript received: Feb, 19, 2013 / Revised: Mar, 12, 2013 / Accepted: Mar, 13, 2013)

A Study on the Control Characteristics of FHA by Using PLC

Sung-Cheol Jang*, Soon-Nam Hong⁺

Abstract

The purpose of this study is to visualize the characteristics of ER fluids as preceding step of developing 3 port ER valves. 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. Using the manufactured pressure control valve, a one-link manipulator with FHA in robot system is driven. As a result, it is experimentally confirmed that the pressure control valve using ER fluids is applicable to use in driving actuator. If it applies characteristics of the ER fluids, it will be able to apply in the control system for the ER Valve which occurs from industrial controller(PLC).

Key Words : Industrial controller(PLC, 시퀀스 컨트롤러), FHA(flexible hydraulic actuator, 액추에이터-인공근육제어용), Manipulator(매니퓰레이터), 3 port ER valve(3포트 ER 밸브), Electric field(전기장)

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 ER유체의 유동특성과 관련된 기초 연구 및 새로운 분야의 적용 가능성을 넓히는 응용연구가 중요한 과제이다. 특히 ER유체의 유동상태를 아는 것은 ER유체의 응용기기나 시스템의 성능향상을 위해서 매우 중요함에도 불구하고 이와 관련된 기초연구는 현재까지 많지 않은 실정이다.

ER유체의 유동상태와 관련된 기초연구로서 Wang 등⁽¹⁾은 실험적인 고찰 없이 수치해석 기법으로 ER유체의 유동특성을 설명하였고, Tsukiji⁽²⁾는 ER유체를 빙행유체로 가정한 기초식을 이용해서 이론계산을 수행하였다. 한편, 국내에서도

Jang 등^(3,4)은 PIV 기법을 이용하여 평행평판 전극사이에서 ER유체의 유동특성을 실험적으로 검토한 경우가 있다. ER유체의 응용연구로서 Choi^(5,6) 등은 ER 밸브를 제작하여 실린더 시스템의 위치제어와 자동하역 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 이와 같이 ER 밸브를 응용장치에 적용하기 위해서 여러 분야에서 연구가 진행되어 왔다. 그러나 자료를 조사한 결과에 의하면 입·출구가 하나인 평행평판(이하 2포트 밸브)에 관한

* 한국폴리텍특성화대학 항공캠퍼스 항공메카트로닉스과
주소: 경남 사천시 이금동 438

+ 한국폴리텍5대학 광주캠퍼스 자동화시스템과

✉ Corresponding Author E-mail: scjang@kopo.ac.kr

유동 가시화 연구는 수행된 경우가 많았으나 입구가 하나이고 출구가 2개인 평행평판(이하 3포트 밸브)에 관한 유동 가시화와 연계되어, 유변현상을 규명한 후 자동화 시스템으로 각광 받고 있는 PLC 시스템과 연계된 비교 평가는 거의 없는 상태이다.

본 연구에서는 3포트 ER 밸브를 자체 제작하고, 전극 사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화시키면서 송출 및 부하 유량을 측정하고, CCD 카메라를 이용하여 유동가시화 실험을 수행한 후, 3포트 ER 밸브에서 발생 할 수 있는 복잡한 유변현상을 규명한 후, PLC 회로를 구성하여 ER 밸브-FHA의 유용성을 입증하였다.

2. ER유체의 전기 유변학적 특성

ER유체에 전기장이 가해진 상태에서 유체가 유동을 하게 되면 ER유체는 저항을 하게 된다. 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^(7,8). 또한 유동속도 변화 및 전기장의 강도에 따라 형성되는 클러스터의 형태는 달라지며, 이에 따라 전단력의 크기도 달라지게 된다⁽⁹⁾. 이와 같이 유동속도 및 전기장 강도 변화에 따른 클러스터의 형성과정과 거동을 직접 관찰하고 이에 대한 자료를 구축한다면, 전기장 강도와 유동속도 변화에 따른 ER유체의 기초자료로 활용될 수 있을 것이라 생각한다. 기존 연구의 경우 서론에서 설명한 것과 같이 입·출구가 하나인 2포트 밸브의 경우 ER유체의 전기 유변학적 특성이 많이 규명되었으나, 복잡한 유변현상을 발생시키는 3포트 밸브의 경우 가시화와 연계된 ER밸브-FHA의 연구는 전무한 상태이며, 반드시 규명되어야 할 연구이다.

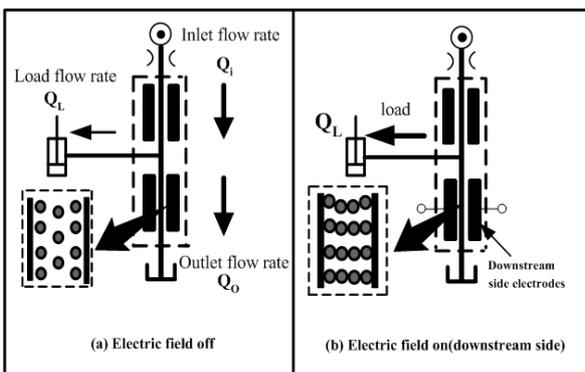


Fig. 1 Flow patten of ER fluids (3 port)

Fig. 1의 (a), (b)는 3포트 ER 밸브 전극 내에서 전기장을 가하지 않은 경우와 전기장을 가한 경우의 유동특성을 도식적으로 나타낸 것이다. Fig. 1(a)는 전기장을 가하지 않은 경우로서 3포트 ER 밸브의 입구로 들어오는 유량(입구유량, Q_i), 송출되는 유량(송출유량, Q_o), 부하되는 유량(부하유량, Q_L)이 정해진다.

Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)와 같은 조건에서 하부 전극에 전기장을 가한 경우로써, Fig. 1(b)와 같이 클러스터를 형성하며, 이러한 하부 전극에 형성된 클러스터로 인해 송출유량이 감소하고 부하유량이 증가하게 되며, 전기장의 강도가 증가할수록 부하유량도 증가하게 된다^(10,11).

Fig. 2~Fig. 3은 전분 입자의 무게분율을 3wt%로 조성한 ER유체에 대하여 전극 사이의 간극 12mm, 전기장 0~1.0kV/mm로 인가한 상태에서 3포트 ER 밸브의 유량변화에 대한 가시화 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 전기장을 가하지 않은 상태에서 3포트 ER 밸브 상부의 콕(cock)을 조금 열어 송출유량 $Q_o=2.48\text{cm}^3/\text{s}$, 부하유량 $Q_L=1.03\text{cm}^3/\text{s}$ 의 초기유동이 시작된 상태를 나타낸 것이고, (b)~(e)는 (a)의 상태에서 전기장의 강도를 증가시킨 경우이다. 전기장을 가하지 않은 경우 Fig. 1(a)에서 설명한 것과 같이 송출유량 뿐 아니라 부하유량도 많이 발생된 것을 알 수 있다. 그러나 전기장의 강도가 증가할수록 송출유량은 감소하고 부하유량이 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 하부 전극에 전기장을 인가하게 되면 클러스터의 결합력이 더욱 증가하여, 전극사이에서 흐르는 ER유체의 흐름 저항이 커지기 때문이라고 생각한다.

Fig. 3(a)는 Fig. 2와 같은 조건에서 3포트 ER 밸브 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. 2와 다르게 출구 쪽은 유량이 증가하고 부하쪽은 유량이 거의 없는 것을 알 수 있다. 이것은 유량이 증가함에 따라 출구 쪽으로 흐르는 ER유체의 유량이 증가해서 부하유량의 발생을 감소시키기 때문이라고 생각한다. 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 발생되는 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 가시화 사진에서 알 수 있는 것과 같이 하부 전극에 전기장을 인가하게 되면 유량증가로 인해 전극 사이에 단일 클러스터가 복합클러스터를 더욱 많이 형성하기 때문이라고 생각한다.

Fig. 2~Fig. 3의 가시화 결과를 사진으로 관찰해 보면 송출유량이 감소할수록 부하유량은 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 하부전극에서 형성된 ER유체의 클러스터 양에 따라 부하유량이 비례적으로 발생되기 때문이라고 생각한다. 그러나 Fig. 3의 사진에서는 Fig. 2에 비해 부하유량이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 3포트 ER밸브의 하부

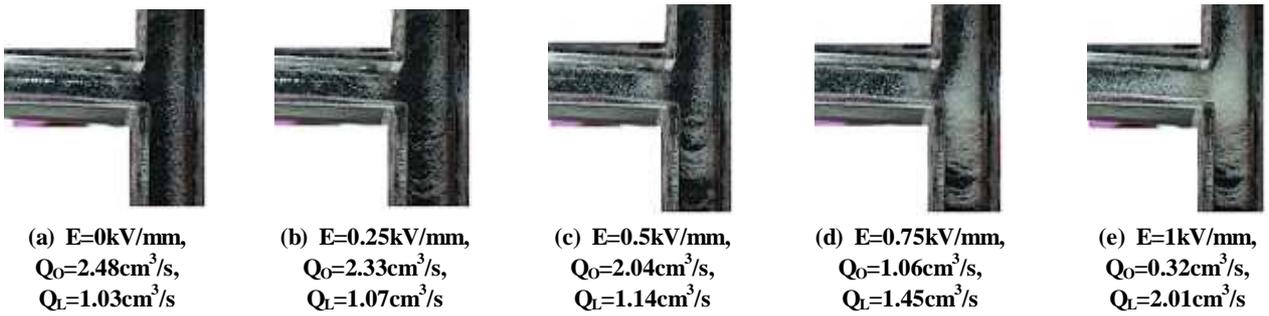


Fig. 2 Flow between 3 port ER Valve (Q_i max=3.51 cm^3/s)

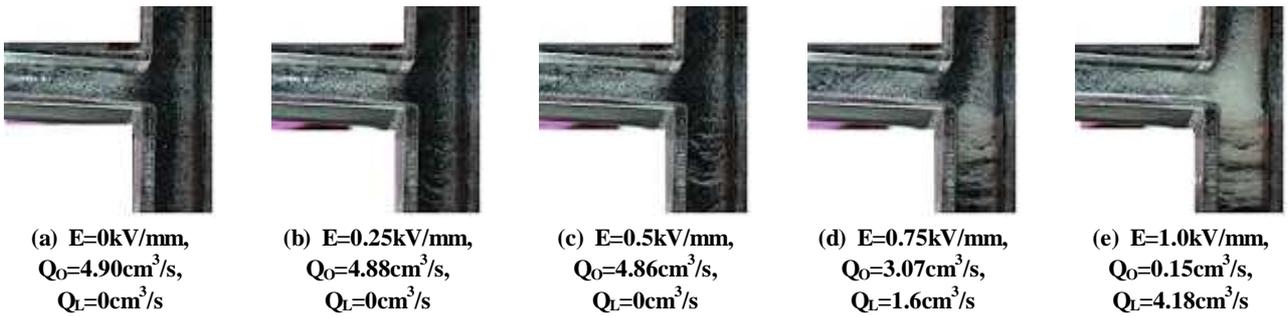


Fig. 3 Flow between 3 port ER Valve (Q_i max=4.90 cm^3/s)

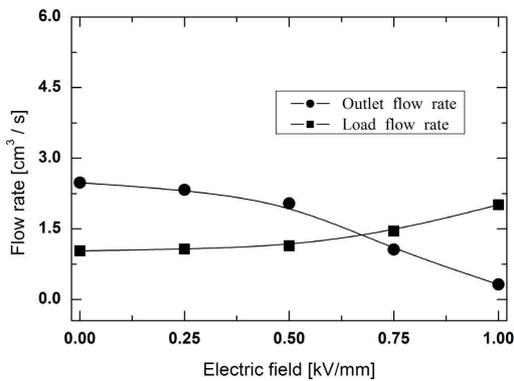


Fig. 4 Flow rate versus electric field strength of 3 port ER Valve at Q_i max=3.51 cm^3/s

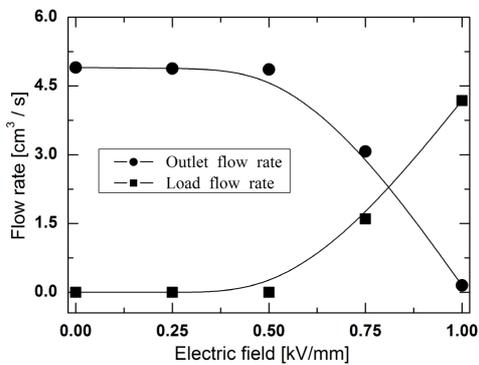


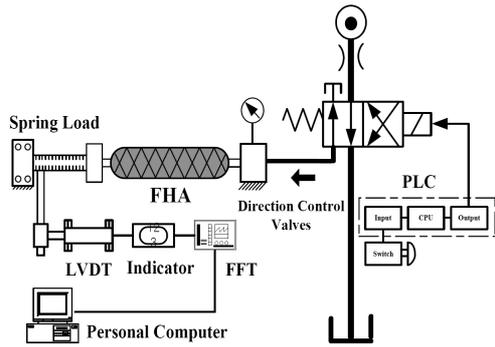
Fig. 5 Flow rate versus electric field strength of 3 port ER Valve at Q_i max=4.90 cm^3/s

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.

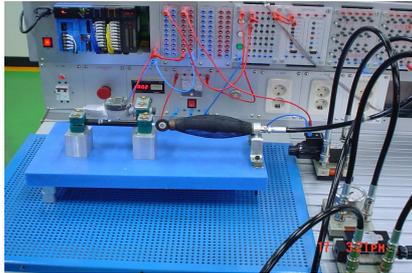
Fig. 4~ Fig. 5는 Fig. 2~Fig. 3의 유동가시화 결과를 전기장 강도에 따른 송출유량 및 부하유량의 관계로 나타낸 그래프이다. Fig. 4에 비해서 Fig. 5의 그래프가 전기장의 강도 E=1.0kV/mm에서 부하유량은 증가하고 송출유량은 급격히 감소한 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2~ Fig. 3의 가시화 결과에서 설명한 것과 같이 입구유량 Q_i max가 3.51 cm^3/s 에서 4.90 cm^3/s 으로 71.63%로 증가되어 분산되는 ER입자의 양이 많아져 클러스터의 결합력 증가 때문이라고 생각된다. 이것은 ER밸브-FHA의 실험에서 FHA의 수축과 팽창과도 관계되는 중요한 인자이다.

3. ER밸브-FHA의 구성 및 실험방법

Fig. 6(a)와 (b)는 ER 밸브-FHA의 제어특성을 비교하기 위해서 기존 밸브시스템에 PLC 회로를 구성한 실험장치이다. 본 연구에서 PLC 회로를 적용한 것은 산업현장에서 널리 사용되고 있으며, 간단한 프로그램으로 제어로직을 쉽게 변경할 수 있고, 가격이 싸고 신뢰성이 높아 확장성이 뛰어나기 때문이다. 또한 일반적인 회로에 비해서 구조가 간단하고 시간에 대한 변



(a) Directional control valve using PLC circuit



(b) Directional control valve using PLC circuits

Fig. 6 Experimental apparatus of ER Valve and directional control valves by using PLC

화량을 1/1000초까지 비교적 정확하게 계측할 수 있기 때문이다. 유량을 공급하기 위한 펌프는 트로코이트 펌프를 사용하였고, 최대 유량은 7.5ℓ/min이다. 모터의 정격 회전수는 1,800 rpm이고 3상 교류 전압 220V로 구동하였다. 압력 및 유량의 크기를 전기장의 강도에 따라 고찰하였으며, 전기장의 강도는 0~4kV/mm까지 0.5kV/mm씩 단계적으로 증가시켰다. ER 밸브의 상부판 입·출구에는 압력 측정공을 뚫어 차압계에 연결하였다. 차압계(SDT-D12K, ULFA TECH. Co. LTD)는 0~10kgf/cm²의 압력차를 측정할 수 있으며 출력전압은 1~5V이며, 펌프의 송출압력은 5kgf/cm²가 되도록 하였다. 전기장 인가시와 무인가시의 변위는 FHA의 끝단에 부착된 변위센서(LVDT)를 통해 계측하였다.

Fig. 7은 Fig. 6(a)와 (b)의 실험장치에서 ER 밸브와 FHA의 작동원리를 설명한 것이다. 본 연구에서 FHA를 사용한 것은 누설과 구동부가 없고, 실린더와 달리 ER입자를 파괴할 염려가 없기 때문이다. 또한 FHA는 내압에 의해 제어됨으로 본 연구에 사용하였다. FHA의 작동은 내압을 높이면 수축하고, 내압을 내리면 FHA 자체의 스프링성에 의해 늘어났다. 즉 ER 밸브에 전기장이 인가되지 않으면 Fig. 7(a)와 같이 ER유체 자체의 점성으로 유체가 유동하며, FHA는 늘어나게 된다. 그러나 전기장이 인가되면 Fig. 7(b)와 같이 ER 밸브를 통해 흐르던 ER유체가 클러스터를 형성하여 저항을 발생시키고, ER유체의 유동방향이 바뀌어 FHA에 많은 유량이 유입되므로 FHA

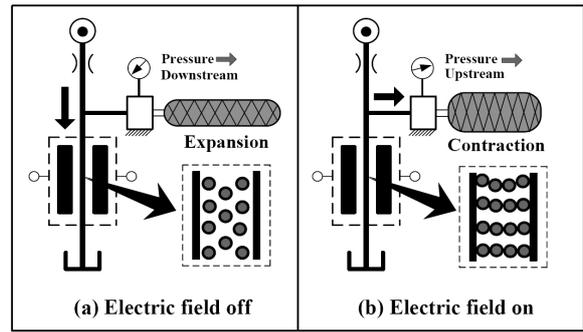
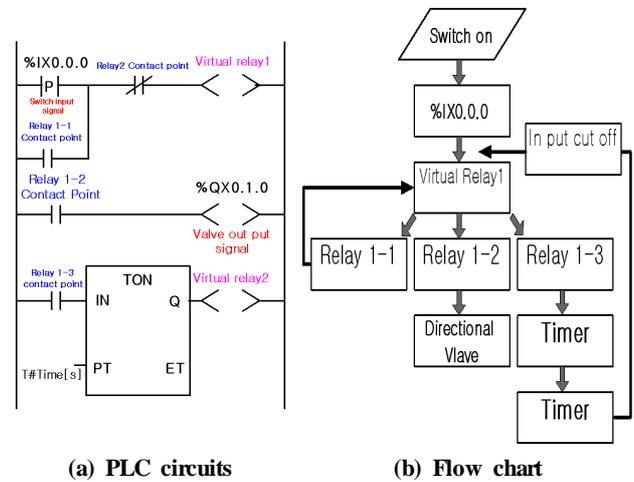


Fig. 7 Schematic of the one-link manipulator by making use of FHA



(a) PLC circuits

(b) Flow chart

Fig. 8 Industrial controller and flow char

는 수축하고 내압은 상승하게 되어 변위가 변화한다. 이러한 FHA는 매트플레이터에 해당하는 것으로 로봇에 응용이 많이 되고 있다.

Fig. 8은 Fig. 7에서 스위치를 누르면 방향제어밸브가 동작해서 작동요소(FHA)를 동작시키기까지 시간에 따른 변위량을 알아보기 위한 회로이다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 9와 Fig. 10은 ER 밸브에서 발생하는 전기장 강도와 압력강하의 관계를 나타낸 그래프이다. 전기장의 강도가 증가하고, 전기장이 인가되는 전극판의 수가 증가할수록 압력강하가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 2~3의 가시화 결과와 Fig. 7의 ER 밸브-FHA의 작동 원리에서 알 수 있는 것과 같이 전기장의 강도 및 전극판의 수가 증가할수록 ER 밸브의 (+), (-) 전극에 부착하는 클러스터의 양이 증가하여 유동저항이 많이 발생되기 때문이라고 생각한다.

Fig. 11은 전기장 인가시와 무인가시의 경우에 ER 밸브-

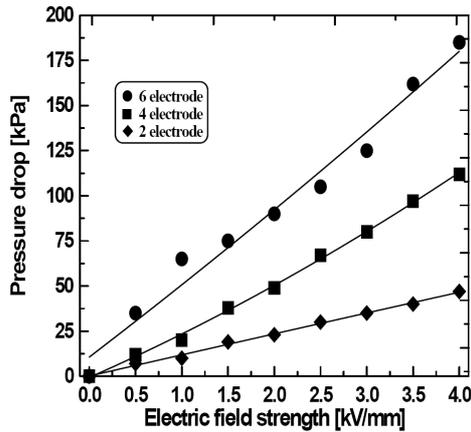


Fig. 9 Pressure drop versus electric field strength of ER Valve

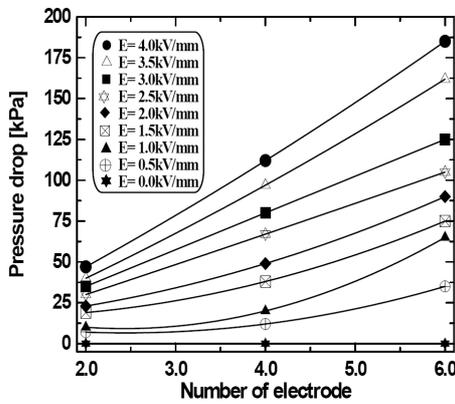


Fig. 10 Pressure drop versus number of electrode of ER Valve

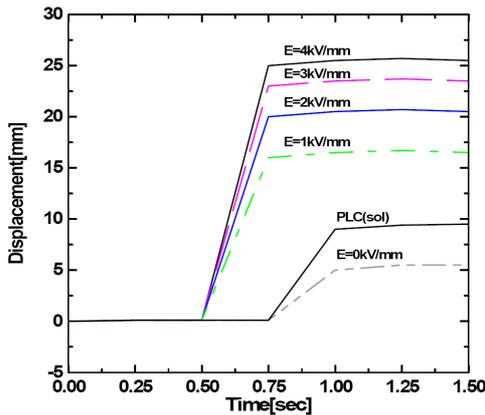


Fig. 11 Control characteristics of ER Valve-FHA

FHA의 제어특성을 파악하기 위해서 시간에 따른 변위를 나타내는 그래프이다. ER 밸브의 전극 수는 Fig. 9와 Fig. 10의 결과에서 압력강하가 제일 높은 6개인 경우이다. 그래프에서 알 수 있는 것과 같이 전기장의 강도가 증가할수록 FHA의 변위가 점차 커지고 시간에 따른 응답성이 좋은 것을 알 수 있다. 이것

은 높은 전기장에 의해 ER효과가 더욱 증가하여 FHA의 내압 증가와 더불어 FHA가 수축이 많이 되기 때문이다. PLC를 이용한 밸브에서는 변위 및 응답속도가 ER 밸브와 다르게 측정된 것을 알 수 있다. 이것은 기존 밸브 시스템의 특징인 오리피스나 스프링 등 복잡한 부품들로 구성되어 밸브를 개폐하기 때문이라고 생각한다. 이러한 실험결과에서, ER 밸브-FHA에서 요구되는 변위나 응답성을 오리피스나 스프링 등 복잡한 부품에 의존하지 않고 전기장의 강도 및 전극판의 수에 따라 제어할 수 있음을 알 수 있다. 기존의 경우 ER유체의 특성 고찰에 관한 연구가 많았으나 ER밸브-FHA를 구성한 후 PLC와 연계된 ER 밸브의 응답 특성을 실험으로 규명한 것은 찾아보기 힘든 연구이다.

5. 결론

본 연구에서는 3포트 ER 밸브를 자체 제작하고, 전극 사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화시키면서 송출 및 부하 유량을 측정하고, CCD 카메라를 이용하여 유동가시화 실험을 수행한 후, 3포트 ER 밸브에서 발생 할 수 있는 복잡한 유변현상을 규명한 후, PLC 회로를 구성하여 ER 밸브-FHA의 유용성을 입증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 3포트 ER 밸브에서 전기장의 강도가 증가할수록 송출유량은 감소하고 부하유량이 증가하는 것은 하부전극에 ER유체가 클러스터를 형성하여 전극사이에서 유동 저항을 발생시키기 때문인 것을 알 수 있다.
- (2) 송출유량이 감소할수록 부하유량이 비례적으로 증가하는 것은 하부전극에 형성된 ER유체의 클러스터 양이 증가함에 따른 것을 알 수 있다.
- (3) 전기장의 강도가 증가할수록 FHA의 변위가 점차 커지고 시간에 따른 응답성이 좋은 것은 높은 전기장에 의해 ER효과가 더욱 증가하여 FHA의 내압 증가와 더불어 수축이 많이 발생하는 것을 알 수 있었다.
- (4) PLC와 연계된 ER 밸브-FHA 연구에서 전기장 무인 가시에는 응답에 따른 변위가 거의 유사하나 전기장의 강도가 증가할수록 응답속도 및 변위가 2.5배 이상 증가하는 것을 알 수 있었다.

References

- (1) Wang, K. C., Mclay, R., and Carey, G. F., 1989, "ER Fluid Modelling", *Proceeding. of the Second International Conference on ERF*, Vol. 138, No. 4, pp. 41~52.
- (2) Tsukiji, T., Takahashi, J., and Sugimtics, N., 2001, "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) Jung, J. M., Choi, S. B., and Cheong, C. C., 1996, "Position Control of ER Valve-Cylinder System Via Neural Control Technique", *KSAE*, Vol. 4, No. 6, pp. 52~64.
- (6) Sung, K. G., Chung, D. D., and Choi, S. B., 2001, "Control of Automatic Cargo Handling System Using ER Valves(I)", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 9, pp. 53~60.
- (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, No. 5, pp. 148~157.
- (8) 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.
- (9) Yokota, S., and Kondoh, Y., 1996, "A Control valve by Making use of an ER Fluid", *JSME*, Vol. 62, No. 601, pp. 93~100.
- (10) Simmonds, A. J., 1991, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", *IEE Proceeding-D*, Vol. 138, No. 4, pp. 400~404.
- (11) Brooks, D. A., 1992, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", *Journal of Modern Physics*, Vol. 6, No. 6, pp. 2705~2730.