

ERF와 산업용 콘트롤러를 이용한 FHA의 제어특성에 관한 연구

장성철*

(논문접수일 2004. 12. 20, 심사완료일 2005. 1. 13)

A Study on the Control Characteristics of FHA by Using ERF and Industrial Controller

Sung-Cheol Jang*

Abstract

Making the best use of the features of the electro-rheological(ER) valve, a two-port pressure control valve using ER fluids is proposed and manufactured. The ER-Valve characteristics are evaluated by changing the intensity of the electric field and the number of electrode. In addition, the performance of the plate type ER-Valve is investigated by change the particle concentration of the ER fluid. As only with electrical signal change to the ER-Valve in which ER fluid flowing, ER fluid flow is controlled, so development of simple ER-Valves have been tried. The ER-Valves and pressure drop 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 : FHA(Flexible Hydraulic Actuator, 액츄에이터-인공근육제어용), Manipulator(매니플레이터), Robot System(로봇시스템), ER-Valve(ER밸브), Industrial Controller(PLC), Fluid & Pneumatic Power Control System(유공압제어시스템)

1. 서론

밸브는 각종 시스템을 구성하는데 있어 가장 기본적인데 중요한 구성요소로서 액츄에이터의 전달력을 변화시키는 기기이다. 기존 밸브 시스템은 정밀하고 복잡한 부품들로

구성되어 밸브를 개폐하기 때문에 시스템의 응답성 저하가 불가피하였다. ER유체로 작동되는 밸브(이하 ER 밸브라 함)는 유량과 압력을 조절하기 위한 전극만을 필요로 하기 때문에 스프링 및 밸브를 하나의 단일구조로 형성하여 시스템을 설계할 수 있다. 아울러 ER 밸브는 전기장의 강

* 주저자, 경남대학교 기계자동화공학부 자동화시스템전공 (secjang@hanmail.net)
주소 : 631-701 경남 마산시 월영동

도에 따라서 압력을 변화시킬 수 있으므로 액추에이터의 위치와 속도를 정밀하게 조절할 수 있으며, ER유체의 고속 응답성과 고기능성을 이용하여 제어시간이 빠른 유압제어 기기 및 로봇시스템에 적용할 수 있다⁽¹⁾.

ER 밸브를 제어 시스템에 응용한 연구는 ER유체의 특성과 연계해 볼 때 가장 적합한 응용장치로 인식되어 많은 진전이 이루어지고 있으며, 응용사례가 국·내외에서 발표되고 있다.

Yokota와 Kondoh⁽²⁾는 2포트 ER 밸브를 개발하여 전기장 강도에 따른 유량, 밸브의 입·출구에서 생기는 압력강하 특성을 실험적으로 고찰하였다. Strandrud⁽³⁾는 실린더 내부에 전극을 부착하여 피스톤의 속도를 조절하여 진동시험기에 응용하였으며, Simmonds⁽⁴⁾는 여러개의 전극을 브리지로 구성하여 다이아프램을 사용한 실린더를 제작하여 구동시켰다. Chol^(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 왔지만, 기존 밸브 시스템과 연계된 비교 평가는 거의 없는 상태이다.

본 연구에서는 평판형 ER 밸브를 제작하고 밸브의 간극 내부를 통과하는 ER유체의 미소한 압력강하를 전기장의 강도 및 전극판의 수에 따라 고찰하였으며, FHA(flexible hydraulic actuator)의 제어특성을 ER 밸브와 기존 밸브시스템에 산업용 콘트롤러 회로를 구성하여 매니플레이터의 구동결과를 고찰하였고, 이를 통하여 제안된 ER 밸브-FHA의 유용성을 입증하였다.

2. ER 밸브의 제작 및 특성

Fig. 1과 Photo. 1은 본 연구에서 설계 및 제작한 ER 밸브의 전체적인 형상과 내부구조를 나타낸다. 제작된 ER 밸브는 전극판의 개수를 12개로 하여 총 11개의 유로가 형성되게 하였으며, 간극은 1.5mm이다. 내부 전극판의 재질은 전기전도도가 좋은 구리이며, 플라스틱 재질의 덮개를 상·하면에 부착하였으며, 플라스틱 볼트를 가공하여 압착시켰다. 플라스틱 볼트의 재질은 애폭시이며 직경은 6mm이다. 그리고 ER유체의 누설을 방지하기 위해서 전극판과 전극판 사이는 실리콘 고무를 이용하였다. 각각의 전극판은 고전압 발생장치와 연결되어 있어 (+), (-) 전극판으로 작용한다. (+), (-) 전극판 사이로 ER유체를 유입시켜 유동시킨 후 전기장을 밸브에 인가하여 ER효과를 발생시켰다.

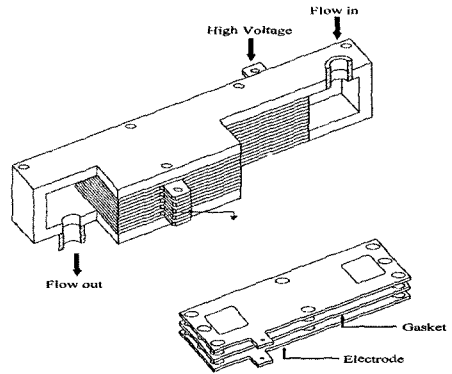
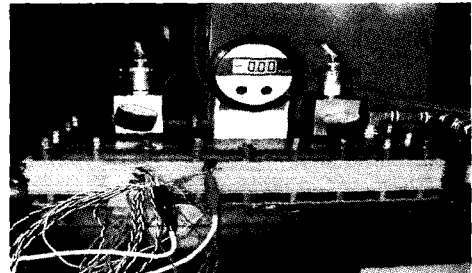
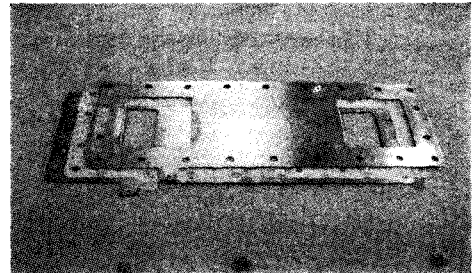


Fig. 1 Schematic diagram of ER Valve



(a) ER Valve



(b) Electrode and silicone rubber

Photo. 1 Photograph of ER Valve

Fig. 1과 같은 ER 밸브에 전기장이 인가되지 않은 경우 ER 유체는 뉴턴유체와 같이 거동하다가, 전기장이 인가되면 ER유체의 입자들이 클러스터를 형성하여 항복전단응력이 증가하는 비협유체 특성을 보인다. Fig. 1에서 보듯이 전기장이 몇 개의 전극판에 인가되므로, 전기장이 인가되는 유로와 전기장이 인가되지 않은 유로가 모두 존재하게 된다. 따라서 ER 밸브를 통과할 때 발생하는 압력강하 ΔP 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

전기장이 인가된 유로의 압력강하

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{\mu 1} + \Delta P_{ER} \\ &= \frac{12\mu L Q_1}{bh^3} + \frac{2L\tau_y(E)}{h} \end{aligned} \quad (1)$$

전기장이 인가되지 않은 유로의 압력강하

$$\Delta P = \Delta P_{\mu 2} = \frac{12\mu L Q_2}{bh^3} \quad (2)$$

여기서, Q_1 은 전기장이 인가된 유로를 통과하는 유량이며, Q_2 는 전기장이 인가되지 않은 유로를 통과하는 유량을 나타낸다. 이러한 ER 밸브 사이를 통과하는 전체 유량(Q_t)에 대하여 연속 방정식을 적용하면 다음과 같다.

$$Q_t = n_1 Q_1 + n_2 Q_2 \quad (3)$$

여기서, n_1 은 전기장이 인가된 유로의 수이며, n_2 는 전기장이 인가되지 않은 유로의 수를 나타낸다. 식 (3)은 ER 밸브에서 ER유체가 통과하는 유로의 수가 여러개일 경우, n_1 과 n_2 의 변화에 따라 Q_1 과 Q_2 가 변화되는 것을 알 수 있다. 식 (3)을 Q_2 로 정리하면 다음과 같다.

$$Q_2 = \frac{Q_t - n_1 Q_1}{n_2} \quad (4)$$

식 (4)를 식 (1)과 (2)에 대입하여 정리하면 Q_1 은 다음과 같다.

$$Q_1 = \frac{1}{n_1 + n_2} \left[Q_t - \frac{n_2 b h^3}{12\mu L} \Delta P_{ER} \right] \quad (5)$$

여기서 식 (5)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 ER 밸브의 압력강하도 다음과 같다.

$$\Delta P = \left(\frac{1}{n_1 + n_2} \right) \left[n_1 \Delta P_{ER} + Q_t \cdot \frac{12\mu L}{bh^3} \right] \quad (6)$$

식 (6)으로부터 전기장이 인가되는 유로의 수가 변화하면, 전기장이 인가되는 전극판의 수가 증가하는 것과 더불어 ER 밸브의 입·출구에서 발생하는 전체 압력강하 ΔP 도 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 전기장이 모든 유로에 인가되지 않은 경우에 n_1 은 0이 되므로 전체 압력강하는 ER 유체의 점성에 의한 압력 강하만을 발생시키게 된다. 그러나 전기장을 모든 유로에 인가했을 경우 n_2 가 0이 되므로

식 (1)과 같은 형태로 표현된다.

3. ER밸브-FHA의 구성 및 실험방법

Fig. 2(a)와 Photo. 2(a)는 본 연구에서 제안한 ER 밸브-FHA의 실험장치를 나타낸 것이다. ER유체는 실리콘 오일(50cSt)과 전분 입자의 무게분율을 35wt%로 조성하여 사용하였다⁽¹⁾. 유량을 공급하기 위한 펌프는 트로코이드 펌프를 사용하였고, 최대 유량은 7.5 l/min 이다. 모터의 정격 회전수는 1800rpm이고 3상 교류 전압 220V로 구동하였다. 압력 및 유량의 크기를 전기장의 강도 및 전극판의 수에 따라 고찰하였으며, 전기장의 강도는 0~4kV/mm까지 0.5kV/mm 씩 단계적으로 증가시켰다. ER 밸브의 상부판 입·출구에는 압력 측정공을 뚫어 차압계에 연결하였다. 차압계(SDT-D12K,

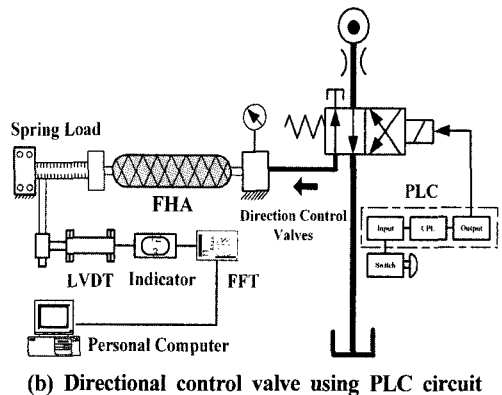
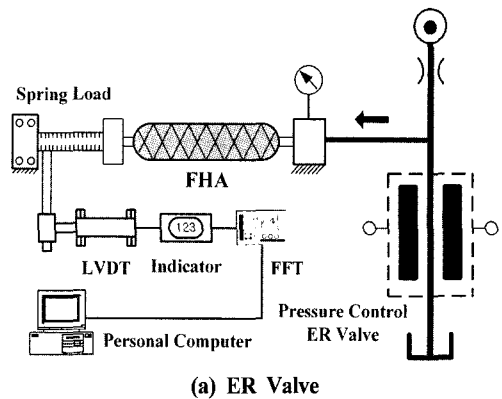
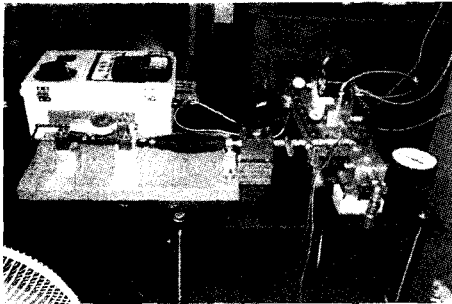
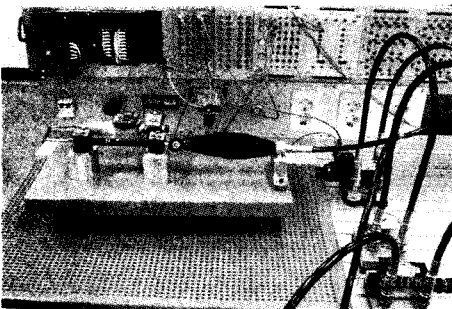


Fig. 2 Experimental apparatus of ER Valve and directional control valves by using PLC



(a) ER Valve



(b) Directional control valve using PLC circuits

Photo. 2 Experimental apparatus of ER-Valve and directional control valves

ULFA TECH. Co. LTD)는 0~10kgf/cm²의 압력차를 측정할 수 있으며 출력전압은 1~5V이며, 펌프의 송출압력은 5kgf/cm²이 되도록 하였다.

전기장 인가시와 무인가시의 변위는 FHA의 끝단에 부착된 변위센서(LVDT)를 통해 계속하였다.

Fig. 2(b)와 Photo. 2(b)는 ER 밸브-FHA의 제어특성을 비교하기 위해서 기존 밸브시스템에 산업용 콘트롤러(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 변화량을 1/1000초까지 비교적 정확하게 측정할 수 있기 때문이다.

Fig. 3은 Fig. 2(a)와 Photo. 2(a)의 실험장치에서 ER 밸브와 FHA의 작동원리를 설명한 것이다. 본 연구에서 FHA를 사용한 것은 누설과 구동부가 없고, 실린더와 달리 ER 입자를 파괴할 염려가 없기 때문이다. 또한 FHA는 내압에 의해 제어됨으로 본 연구에 사용하였다. FHA의 작동은 내압을 높이면 수축하고, 내압을 내리면 FHA 자체의 스프링

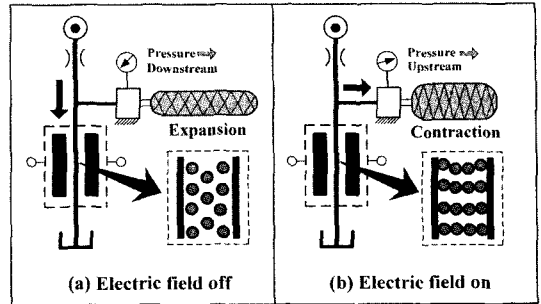
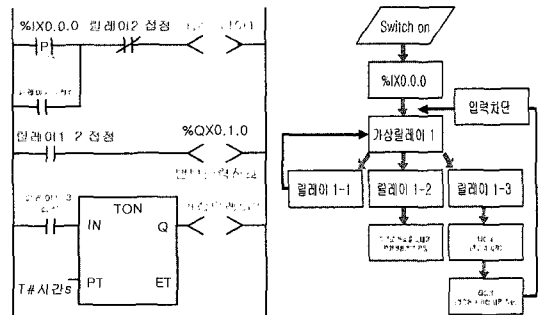


Fig. 3 Schematic of the one-link manipulator by making use of FHA



(a) PLC circuits

(b) Flow chart

Fig. 4 Industrial controller and flow chart

성에 의해 늘어났다. 즉 ER 밸브에 전기장이 인가되지 않으면 Fig. 3(a)와 같이 ER유체 자체의 점성으로 유체가 유동하며, FHA는 늘어나게 된다. 그러나 전기장이 인가되면 Fig. 3(b)와 같이 ER 밸브를 통해 흐르던 ER유체가 클러스터를 형성하여 저항을 발생시키고, ER유체의 유동방향이 바뀌어 FHA에 많은 유량이 유입되므로 FHA는 수축하고 내압은 상승하게 되어 변위가 변화한다.

Fig. 4는 Fig. 2(b)와 Photo. 2(b)에서 산업용 콘트롤러에 스위치를 누르면 방향제어밸브가 동작해서 작동요소(FHA)를 동작시키기까지 시간에 따른 변위량을 알아보기 위한 회로이다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 5와 Fig. 6은 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. 3의 ER 밸

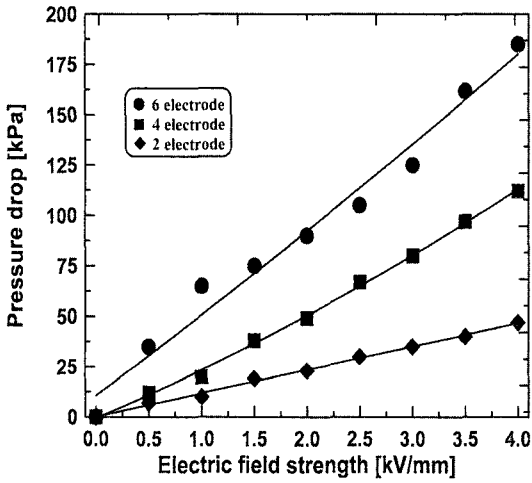


Fig. 5 Pressure drop versus electric field strength of ER Valve

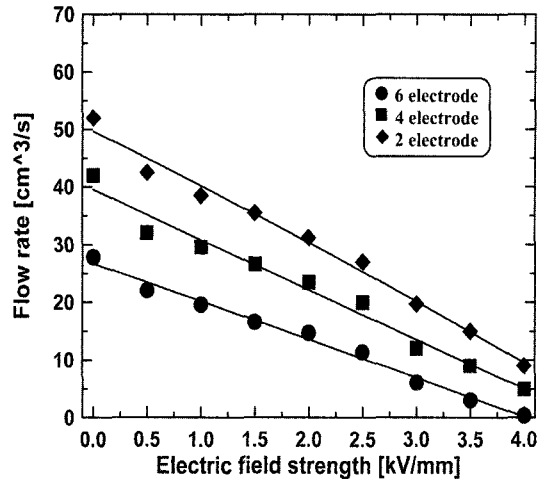


Fig. 7 Flow rate versus electric field strength of ER Valve

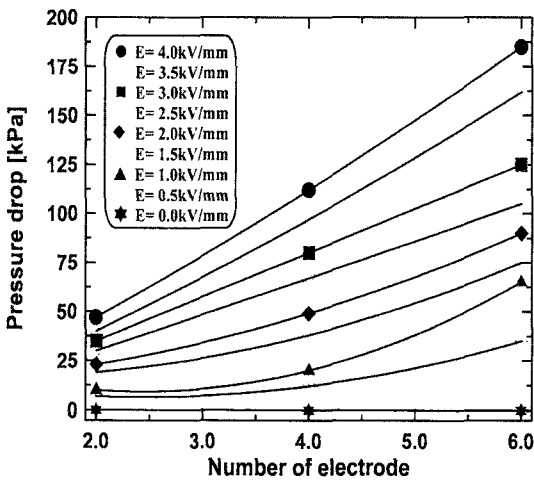


Fig. 6 Pressure drop versus number of electrode of ER Valve

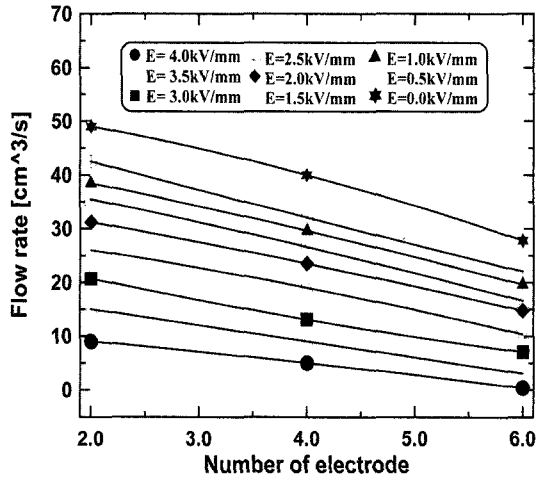


Fig. 8 Flow rate versus number of electrode of ER Valve

브-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. 7과 Fig. 8은 ER 밸브에서 발생하는 전기장 강도와 유량의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 5와 Fig. 6의 경우처럼 전기장의 강도 및 전극판의 수가 증가할수록 유량이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 3에서 설명한 것과 같이 전기장의 강도 및 전극판의 수가 증가할수록 (+), (-)

전극에 부착하는 클러스터가 많이 발생하고, 이 클러스터의 저항으로 유량이 작아지기 때문인 것으로 생각한다.

Fig. 9는 전기장 인가시와 무인가시의 경우에 ER 밸브-FHA의 제어특성을 파악하기 위해서 시간에 따른 변위를 나타내는 그래프이다. ER 밸브의 전극 수는 Fig. 5와 Fig. 6의 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. 이것은 높은 전기장에 의해 ER효과가 더욱 증가하여 FHA의 내압 증가와 더불어 FHA가 수축이 많이

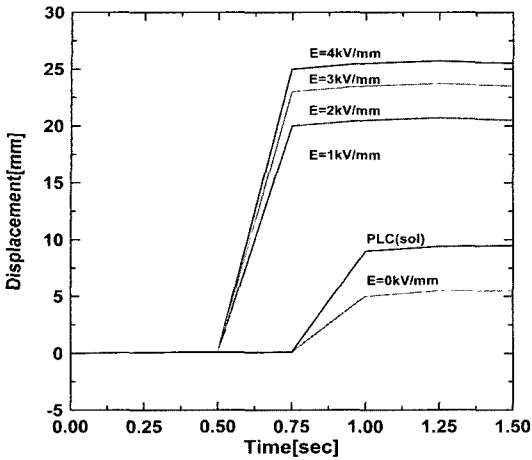


Fig. 9 Control characteristics of ER Valve-FHA

되기 때문이다. 산업용 콘트롤러를 이용한 밸브에서는 변위 및 응답속도가 ER 밸브와 다르게 측정된 것을 알 수 있다. 이것은 기존 밸브 시스템의 특징인 오리피스나 스톱 등 복잡한 부품들로 구성되어 밸브를 개폐하기 때문이라고 생각한다.

이러한 실험결과에서, ER 밸브-FHA에서 요구되는 변위나 응답성을 오리피스나 스톱 등 복잡한 부품에 의존하지 않고 전기장의 강도 및 전극판의 수에 따라 제어할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 평판형 ER 밸브를 제작하고 밸브의 간극 내부를 통과하는 ER유체의 미소한 압력강하를 전기장의 강도 및 전극판의 수에 따라 고찰하였으며, FHA의 제어특성을 ER 밸브와 기존 밸브시스템에 산업용 콘트롤러 회로를 구성한 후 결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전기장의 강도 및 전극판의 수가 증가할수록 ER 밸브의 (+), (-) 전극에 부착하는 클러스터의 양이 증가하여, 유동저항이 많이 발생하기 때문에 압력강하가 증가하고 유량은 감소하는 것을 알 수 있었다.
- (2) 전기장의 강도가 증가할수록 FHA의 변위가 점차 커지고 시간에 따른 응답성이 좋은 것은 높은 전기장에 의

해 ER효과가 더욱 증가하여 FHA의 내압 증가와 더불어 수축이 많이 발생하는 것을 알 수 있었다.

- (3) 산업용 콘트롤러를 이용한 밸브에서 변위 및 응답성이 ER 밸브와 다르게 측정된 것은 기존 밸브 시스템의 특징인 오리피스나 스톱 등 복잡한 부품들로 구성되어 밸브를 개폐하기 때문인 것을 알 수 있었다.
- (4) FHA의 제어특성에서 기존의 밸브 대신 ER 밸브에서 발생하는 ER효과에 의해 매니플레이터의 변위를 정밀하게 조절할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Jang, S. C., and Yum, M. O., 2004, "Design and Performance Test of Valve Operated by ER Fluids," *KSMTE*, Vol. 13, No. 1, pp. 63~68,
- (2) Yokota, S., and Kondoh, Y., 1996, "A Control valve by Making use of an ER Fluid," *JSME*, Vol. 62, No. 601, pp. 93~100.
- (3) Strandrud, H. T., 1966, "Electric-field valves inside cylinder control vibrator," *Hydraulics and Pneumatics*, pp. 139~143.
- (4) Simmonds, A. J., 1991, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit," *IEE Proceeding-D*, Vol. 138, No. 4, pp. 400~404.
- (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) 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.