

ER유체로 작동되는 밸브의 제작 및 성능시험

장성철*, 염만오⁺

(논문접수일 2003. 6. 25, 심사완료일 2003. 9. 19)

Design and Performance Test of Valve Operated by ER Fluids

Sung-Cheol Jang*, Man-Oh Yum⁺

Abstract

Recently ER fluids are put to practical use in fluid power industry field. As only with electrical signal change to the valve in which ER fluid flowing, ER fluid flow is controlled, so development of simple ER valves have been tried. In this case a technical problem is to check the pressure drop caused from flow rate change in valves because the pressure drop is very small. In this study ER valves are designed and manufactured, and small pressure drop induced from flow rate change is checked by pressure transducer which is made with applying strain gage. The ER valves and pressure drop check method are considered to be applied to the fluid power industry.

Key Words : Electro-Rheological(ER) Fluid(전기점성유체), Pressure Control Valve(압력제어밸브), Flow Rate(유량), Differential Pressure Gauge(차압계), Electric Field(전기장), Pressure Drop(압력강하)

1. 서론

밸브는 유체의 유량과 압력을 조절하여 유압시스템의 전달력을 변화시키는 장치이다. 기존 밸브 시스템은 정밀하고 복잡한 부품들로 구성되어 밸브를 개폐하기 때문에 시스템의 응답성 저하가 불가피하였다. ER유체로 작동되는 밸브(이하 ER-Valve라 함)는 유량과 압력을 조절하기 위한 전극만을 필요로 하기 때문에 단순한 구조로 시스템을

설계할 수 있다. 아울러 ER유체의 고속 응답성과 고기능성을 이용하여 제어시간이 빠른 유압제어기기를 개발할 수 있다. ER-Valve에 대한 연구는 ER유체의 특성과 연계해 볼 때 가장 적합한 응용장치로 인식되어 응용사례가 국·내외에서 다수 발표되고 있다. Simmonds⁽¹⁾는 평판형의 ER-Valve를 제안하여 실험적인 고찰없이 실용가능성에 대해 고찰하였다. Brooks⁽²⁾는 ER-Valve를 이용한 유압회로를 구성하여 성능시험을 수행하였으며, Yokota와

* 주저자. 경남대학교 대학원 기계공학과 (scejang@hanmail.net)

주소: 631-701 경남 마산시 월영동

+ 경남대학교 기계자동화공학부

Kondoh⁽³⁾는 2포트 ER-Valve를 개발하여 유량, 밸브의 입·출구에서 생기는 압력강하, 전기장 강도에 따른 정특성을 실험적으로 구하였다. 한편, 국내에서도 실린더형 ER-Valve의 성능연구⁽⁴⁾와 평행평판 간극에서 전기장 강도 변화에 따른 분산계 ER유체의 유량·압력강하 특성에 관한 연구가 수행되었다⁽⁵⁾. 그러나 지금까지의 연구결과에 의하면 ER-Valve의 간극내부를 통과하는 ER유체의 유량변화에 따라 발생하는 압력강하는 매우 미소하기 때문에 이를 측정하는 것은 중요한 기술적과제이다. 이러한 미소압력을 측정하기 위하여 스트레인 게이지를 이용한 차압계를 제작하여 ER-Valve에서 발생하는 압력강하를 측정하였다.

본 연구에서는 ER유체 자체에 대한 연구를 먼저 수행한 후, ER-Valve에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 자체 조성한 ER유체의 빙행특성을 전기점도계를 이용하여 측정하였으며, ER-Valve의 성능실험을 위해 전기장의 강도와 유량을 변화시켜 실험결과를 고찰하였다. 본 연구에서 제작된 ER-Valve는 압력제어밸브 및 유량제어밸브에 적합한 특성을 가지고 있는 점에 착안하여, 유압제어밸브의 응용가능성을 제시하였다.

2. ER유체의 빙행특성 및 ER-Valve의 제작

ER유체는 전기장이 인가되지 않은 경우 뉴턴유체와 같이 거동하다가, 전기장이 인가되면 ER유체의 입자들이 클러스터를 형성하여 항복전단응력이 증가하는 빙행특성을 보인다. ER유체를 빙행모델로 가정하였을 경우 전단응력과 전단속도비의 관계를 다음 식과 같이 나타낼 수 있다⁽⁶⁾.

$$\tau = \tau_y(E) + \mu \frac{du}{dy} = \alpha E^\beta + \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

여기서, τ 는 ER유체의 전단응력, μ 는 ER유체의 점성계수이며, du/dy 는 전단속도비이다. $\tau_y(E)$ 는 ER유체의 항복전단응력을 나타내며, 전기장 E 의 증가와 더불어 증가하며, αE^β 의 함수관계를 갖는다. 여기서, 비례상수 α 와 β 값은 ER유체의 고유특성이며 실험을 통하여 구할 수 있다. 본 연구에 사용된 ER유체는 실리콘오일(점성 20cSt, ShinEtsu Silicone Korea Co.)과 800℃까지 가열하여 수분을 제거한 제올라이트(Sigma Chemical Co.)를 사용하였으며, 무계분율은 25wt%와 35wt%가 되도록 조성하였다. ER입자의 무계분율을 25wt%와 35wt%로 조성하여 빙행특성 실험을 수행한 것은 유압시스템에서 많이 사용하고 있는 작동유의 점도(46cSt)와 밸브내에서 마찰저항이 비슷하기 때문이다. 그

리고 동일조건에서 전기장을 인가할 경우 무계분율이 35wt%인 ER유체가 무계분율이 25wt%인 ER유체보다 항복전단응력이 뛰어나기 때문이다. 그러나 무계분율을 35wt%보다 증가시킬 경우, 밸브내의 마찰저항이 너무 커지게 되어 작동유체로서 적당하지 않을 것이라고 생각한다. 그러므로 본 연구에서는 무계분율이 35wt%인 ER유체를 밸브 간극 속을 흐르는 작동유체로 사용하였다.

ER유체의 절연유인 실리콘 오일은 온도나 주파수 변화에 따른 전기 절연성이 우수하고, 온도변화에 따른 점도변화가 작으며, 전단에 대한 저항성이 크고, 화학적 안정성과 열산화 안정성이 우수한 특징을 가지고 있기 때문에 ER유체의 절연유로서 적절하다고 생각된다. 제올라이트는 결정성 알루미늄 규산염으로, SiO_2 4면체와 AlO_2 4면체가 3차원 망목상으로 결합된 광물로서, AlO_2 의 음전하를 중화하기 위해 금속 양이온이 필요하다. 따라서 절연유중에 분산된 제올라이트 입자들은 외부에서 전기장이 인가되면, 제올라이트 결정 구조상 분자크기에 상당하는 균일세공지름을 갖는 비교적 큰 공간내에 존재하는 금속 양이온이 입자의 한쪽 끝으로 이동하게 되어 강한 유전성을 가지게 되어 ER효과를 나타내게 된다⁽⁶⁾.

전기점도계(독일 Haake社, VT-500)를 이용하여 ER유체의 온도를 20℃로 유지하면서 전기장 강도변화에 따른 전단응력을 측정 후 항복전단응력을 도출하였다.

Fig. 1은 항복전단응력과 전기장 강도의 실험결과이다. 항복전단응력은 전기장 강도가 증가함에 따라 비례적으로

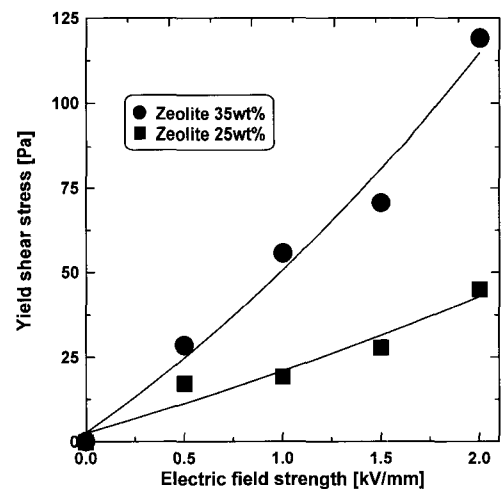


Fig. 1 Bingham characteristics of ER fluids

증가하는 경향을 나타낸다. 실험결과에서 고찰한 바와 같이 항복전단응력에 영향을 미치는 인자는 전기장의 강도와 분산된 제올라이트의 무게분율이 중요하다는 것을 알 수가 있다. 제올라이트의 무게분율이 35wt%인 경우 도출된 항복전단응력을 식 (1)의 방행모델로 표현하면 $56.02E^{1.29}$ Pa과 같다.

Fig. 2는 본 연구에서 설계·제작한 ER-Valve의 구조를 나타낸다. 제작된 ER-Valve는 원형의 적층으로 구성하였으며, FRP 재질의 덮개를 상·하 양측면에 부착하여 볼트로 압착시켰다. 각각의 밸브판은 고전압 발생장치와 연결되어 있어 (+), (-) 전극판으로 작용하며, 밸브판의 개수가 10개이므로 총 9개의 간극이 형성된다. 이러한 간극사이로 ER유체의 유입이 이루어지며 (+), (-) 전극에 전기장을 인가하면 ER유체의 유동이 제한되어 ER효과를 발생하게 된다.

Photo. 1은 ER-Valve의 전극형상을 나타낸 것이다. 전극판의 재질은 전기전도도가 우수한 구리를 사용하였으며, 직경 100mm, 두께 6mm이다. 전기장 인가시 전극판의 방전 현상을 줄이기 위하여 전극 표면을 연삭기로 정밀하게 가공하였다. 각 밸브 사이의 간극을 유지하고, 전극판과의 절연 및 누설을 방지하기 위해 Gasket과 오링(O-ring)을 사용하였다. ER유체의 유입과 유출은 각각의 밸브판에 U자모양의 유로를 수가공 하였으며, 전기장 인가시 ER효과가 최대가 되도록 제작하였다.

ER-Valve의 전극사이에서 발생하는 전체 압력강하는 전기장이 인가되는 유로와 전기장이 인가되지 않은 유로의 형태로 표현할 수 있으며, 전기장이 인가된 유로의 압력강하는 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽³⁾.

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

여기서 b 는 평판으로 환산한 넓이, h 는 전극사이의 간극, L 은 밸브 전극의 길이, Q_{ER} 은 전기장 인가시 ER-Valve의 전극사이를 통과하는 유량을 나타낸다. 전기장이 인가되지 않은 유로의 압력강하는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, Q 는 전기장 무인가시 ER-Valve의 전극사이를 통과하는 유량을 나타낸다.

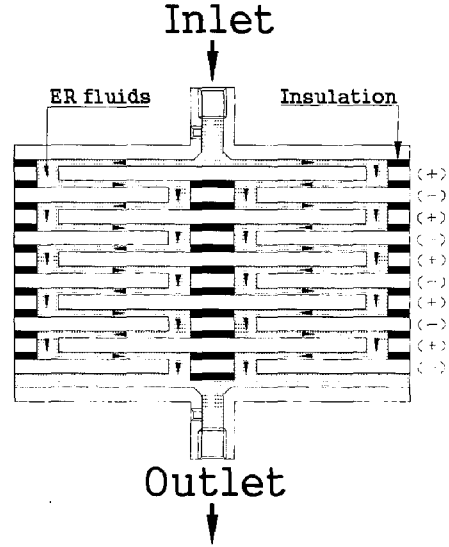


Fig. 2 Schematic diagram of the ER-Valve

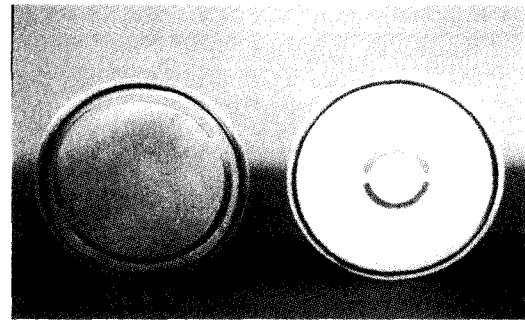


Photo. 1 Shape of the ER-Valve

3. 실험 및 결과

3.1 실험장치 및 방법

Fig. 3은 본 연구에서 제안한 ER-Valve의 실험장치를 나타낸 것이다. 펌프에서 송출된 ER유체를 ER-Valve 간극내부로 유입시키고, ER-Valve에 인가되는 전기장의 강도를 변화시켜 ER효과를 발생하게 하였다. ER유체에 혼합되어 있는 제올라이트 입자의 침전을 방지하고, 입자분포를 균일하게 하기 위하여 탱크 안에 전동식 교반기를 장착하여 ER유체를 교반하였다. 유량을 공급하기 위한 펌프는 ER유체와 같이 유체내의 작은 입자들이 포함되어있는 특수한 형태의 유체를 이송시키기에 적합한 트로코이드 펌프를 사용하

였고, 최대유량은 4.5 l/min 이다. 모터의 정격 회전수는 1000 rpm이고 3상 교류 전압 220V로 구동하였다. ER-Valve의 공급압력은 입구 매니폴드(manifold)에 장착된 압력계로 측정하였다. 공급압력은 펌프 송출측의 유량제어밸브(flow control valve), 바이패스 밸브(by pass valve), 교축밸브를 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 0~2kV/mm까지 0.5kV/mm씩 증가시켰다. ER-Valve의 상부판 입·출구에 압력 측정공을 뚫어 차압계를 연결하여 압력강하를 측정하였다. 차압계의 변형량을 디지털 멀티미터로 전압을 읽어 ER-Valve내의 압력강하를 계측하였다.

3.2 실험결과 및 고찰

Fig. 4는 ER-Valve 내의 ER유체의 유량과 압력강하의 관계를 나타내는 실험결과이다. Fig. 4에서 전기장을 인가하지 않은 경우(★)에 비하여 전기장을 인가한 경우(▲~●)가 같은 유량에 대해 압력강하가 큰 것을 알 수 있으며, 전기장의 강도가 클수록 압력강하가 크게 되는 것을 알 수 있다. 이것은 전기장을 인가하면 ER유체 속에 혼합되어 있는 ER입자가 클러스터 형태가 되어 유체의 유동저항을 증가시키고, 전기장의 강도가 클수록 ER-Valve의 (+), (-) 전극에 부착하는 클러스터는 굵어지고 길어져서 클러스터의 결합력이 유동저항이 되기 때문이며, ER효과에 의한 저항이 점성에 의한 저항보다 더 크기 때문에 유량이 변화하

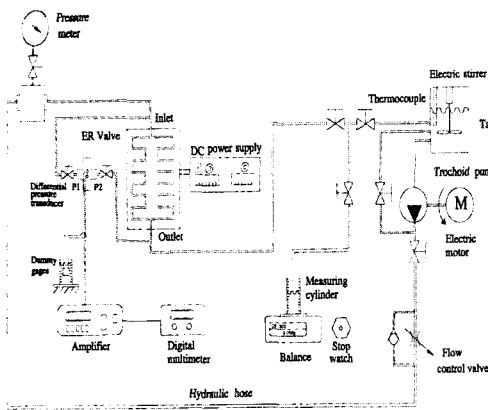


Fig. 3 Experimental apparatus for ER-Valve

더라도 일정한 압력강하가 생기는 것으로 생각한다.

Fig. 5는 ER-Valve의 전기장 강도에 따른 전류의 변화를 나타낸 것이다. 전기장 강도가 증가함에 따라 전류가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 전기장의 강도가 대단히 큰 경우에도 ER-Valve를 흐르는 전류는 매우 작아 이에 따른 소비전력이 낮은 것을 알 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 전기장의 강도가 압력강하와 유량에 미치는 영향을 나타낸 실험결과이다. Fig. 6에서 ER-Valve에 전기장이 인가되면 압력강하가 선형적으로 증가하고, 전기장의 크기가 증가할수록 압력강하가 더욱더 많이 증가하

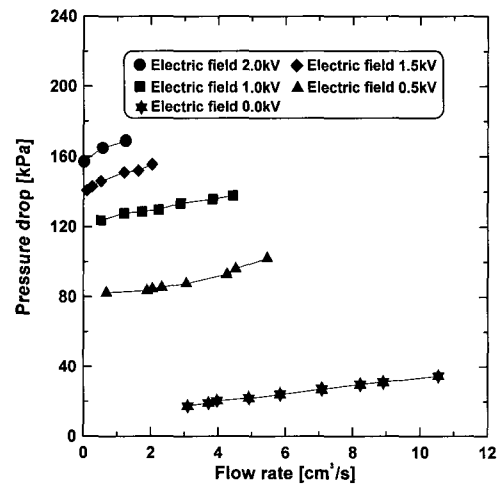


Fig. 4 Pressure drop versus flow rate of ER-Valve

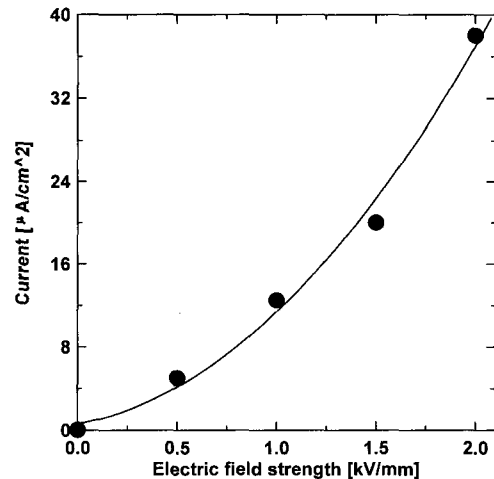


Fig. 5 Current characteristics of ER-Valve

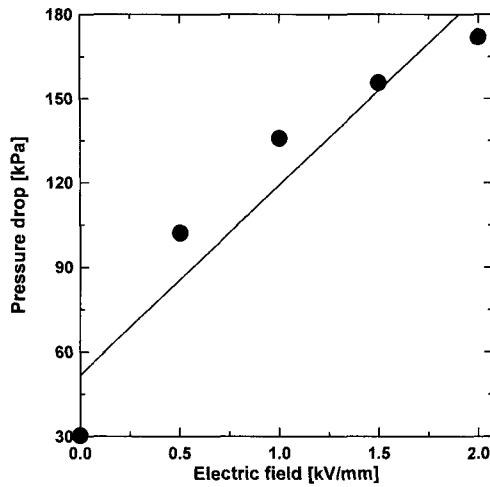


Fig. 6 Pressure drop characteristics of ER-Valve

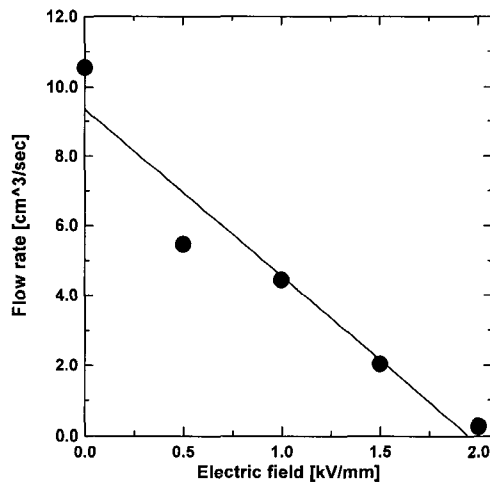


Fig. 7 Flow rate characteristics of ER-Valve

는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서 ER-Valve를 흐르는 유량은 전기장의 강도가 클수록 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 4에서 설명한 것과 같이 ER효과에 의한 저항이 점성에 의한 저항보다 더 크기 때문에 유량이 변화하더라도 일정한 압력강하가 생기는 것으로 생각한다.

이러한 실험결과에서, 기존 밸브 시스템은 정밀하고 복잡한 부품들로 구성되어 밸브를 개폐하지만, 자체 제작한 ER-Valve는 유압시스템에서 요구되는 압력 및 유량의 크기를 전기장의 크기만으로 제어할 수 있어, 기존의 밸브 시스템보다 비교적 빠른 제어성과 구조의 단순성 등에서 상당

한 이점을 찾아 볼 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 ER유체 자체에 대한 연구를 먼저 수행한 후, ER-Valve에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 자체 조성한 ER유체의 빙헴특성을 전기점도계를 이용하여 측정하였으며, ER-Valve의 성능실험을 위해 전기장의 강도와 유량을 변화시켜 실험결과를 고찰한 후 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) ER유체의 항복전단응력은 전기장 강도가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 경향이 나타났으며, 항복전단응력에 영향을 미치는 인자는 전기장의 강도와 분산된 제올라이트의 무게분율인 것을 알 수 있었다.
- (2) 전기장의 강도가 대단히 큰 경우에도 ER-Valve를 흐르는 전류는 매우 작아 이에 따른 소비전력이 낮은 것을 알 수 있었다.
- (3) ER-Valve에 전기장이 인가되면 압력강하가 비례적으로 증가하고, 전기장의 크기가 증가할수록 압력강하가 더욱더 많이 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (4) ER-Valve를 흐르는 유량은 전기장의 강도가 클수록 작아지는 것을 알 수 있었다. 이것은 ER 효과에 의한 저항이 점성에 의한 저항보다 더 크기 때문이다.
- (5) 자체 제작한 ER-Valve는 기존 밸브의 작동원리와는 다르게, 전기장의 크기만으로 압력 및 유량을 제어할 수 있으므로 유압제어밸브의 응용가능성을 제시하였다.

후 기

본 연구는 2003학년도 경남대학교 학술논문게재 연구비 지원으로 이루어졌음.

참 고 문 헌

- (1) Simmonds, A. J., 1991, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit," *IEE Proceeding-D*, Vol. 138, No. 4, pp. 400~404.
- (2) Brooks, D. A., 1992, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices," *Journal of Modern Physics*, Vol. 6, pp. 2705~2730.
- (3) Yokota, S., and Kondoh, Y., 1996, "A Control valve

- by Making use of an ER Fluid," *JSME*, Vol. 62, No. 601, pp. 93~100.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (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) Hartnett, J. P., and Hu, R. Y. Z., 1989, "The Yield Stress An Engineering Reality," *J. of Rheology*, Vol. 33, pp. 671~679.