

평판형 ER-Valve의 제작 및 성능실험

장성철*, 염만오⁺

(논문접수일 2003. 4. 2, 심사완료일 2003. 8. 19)

Design and Performance Test of Plate Type ER-Valve

Sung-Cheol Jang*, Man-Oh Yum⁺

Abstract

In this research 4 plate type ER-Valves which have same surface but different width and length are designed and an experimental apparatus is constructed. With this experimental apparatus, flow rate and pressure drop of ER fluid flowing in ER-valves are measured with varying electric field strength of ER-valve, and relation between valve types and pressure drop is also experimented. ER fluid is made silicon oil mixed with 40wt% starch having hydrous particles. If we allow the same electric field in the ER-Valve, we came to know that the pressure drop is effected by the electrode length and electrode width. When the strength of the electric field increased, the pressure drop happened big and the flow rate decreased.

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

1. 서론

ER유체(electro-rheological fluid:전기점성유체)는 비전도성의 절연성 오일 속에 강한 전도성의 고체미립자를 분산시킨 콜로이드 용액이며, 전기장의 강도에 따라 유변학적 특성이 변화하는 기능성 유체이다. 전기적 신호만으로 ER유체의 유동을 제어할 수 있기 때문에 단순한 구조로 빠른 응답성과 고기능을 가진 유압제어기기 개발에 이용되고

있다. ER유체의 제어용으로 사용되는 밸브(이하 ER-Valve라 함)의 성능은 전극사이의 간극, 넓이, 길이 등과 같은 설계변수와 전기장의 강도에 따른 항복전단응력의 크기에 영향을 받으며, 이에 대한 응용사례가 국·내외에서 다수 발표되고 있다.

Simmonds⁽¹⁾는 평판형의 ER-Valve를 제안하여 실험적인 고찰없이 실용가능성에 대해 언급하였다. Jeon⁽²⁾은 전극길이 변화에 따른 3종류 형태의 실린더형 ER-Valve

* 주저자, 경남대학교 대학원 기계공학과 (sccjang@hanmail.net)
주소: 631-701 경남 마산시 월영동

+ 경남대학교 기계자동화공학부

에 대한 성능연구를 수행하였다. Brooks⁽³⁾는 4종류 형태의 ER-Valve(cylinder, zig-zag, perforated plate, pin type)를 제안하여 성능시험을 수행하였다. Brooks가 제안한 4종류의 ER-Valve는 전기장의 강도($E = 2.0kV/mm$)만으로 높은 압력강하(2~9bar)는 얻을 수 있으나, 유압시스템에 적용할 경우 전극 사이의 구조가 복잡하여 ER유체의 침전으로 인해 전도특성이 변화될 뿐 아니라, 전극판 사이에서 전기단락현상이 발생되어 실용화에 많은 문제점이 뒤따를 것으로 생각된다. 이에 비해 평판형 ER-Valve는 구조가 단순화 될 뿐 아니라 전극판의 정밀도가 높다. 따라서 본 연구에서는 Brooks의 연구에서 언급하지 않은 평판형 ER-Valve의 전극형상이 압력강하에 미치는 영향을 규명하고자 한다.

이를 위해 전극 표면적은 동일하나 폭과 길이를 변화시킨 4종류의 평판형 ER-Valve를 설계·제작하고, 전극사이를 흐르는 ER유체에 전기장의 강도를 변화시키면서 유량과 압력강하 특성을 측정한다. ER유체는 자체(실리콘 오일에 전분입자가 분산된 분산계 ER유체)조성하고 항복전단응력은 회전식 점도계를 이용하여 측정하였다⁽⁴⁾. ER-Valve의 입·출구에서 발생하는 미소한 압력강하는 스트레이젠이 지 형식의 차압계를 구성하여 측정하였다.

2. ER-Valve 전극사이에서 ER유체의 유동

ER유체는 전기장이 인가되지 않은 경우 뉴턴유체와 같이 거동하다가, 전기장이 인가되면 ER유체의 입자들이 클러스터를 형성하여 항복전단응력이 증가하는 비뉴턴특성을 보인다. ER유체를 비뉴턴유체로 취급하는 경우 전단응력과 전단속도비의 관계를 다음식과 같이 나타낼 수 있다⁽⁵⁾.

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

여기서, $\tau_y(E)$ 는 전기장 인가시 항복전단응력, μ 는 점성, du/dy 는 전단속도비, E 는 전기장의 강도, α , β 는 실험으로 구하는 값이며 ER입자의 무게분율, 절연성오일의 점성 등에 영향을 받는다. 본 연구에 사용된 ER유체로서, 용매는 전기절연성이 우수한 실리콘 오일(ShinEtsu Silicone Korea Co, 50cSt)이, 분산된 미세입자로는 전분이 사용되었다.

회전식 점도계를 이용하여 본 연구에서 사용한 ER유체의 항복전단응력을 측정하였으며 그 값은 $220.01E^{0.82}$ Pa 이었다.

Fig. 1은 평판형 ER-Valve의 형상을 나타낸 것이다. 상부 전극에는 고전압발생장치의 (+)전원, 하부 전극에는 (-)전원이 연결되어 전극판으로 작용한다. 이러한 (+), (-) 전극 사이로 ER유체가 유동할 때 전기장을 전극판에 인가하면 ER효과에 의한 압력강하가 생긴다. 또한 ER-Valve의 전극사이에 흐르는 유동은 Fig. 2와 같이 평행평판 사이를 흐르는 유동으로 나타낼 수 있다. 전기장을 인가하지 않을 경우 압력강하는 ER유체의 점성에만 영향을 받으며, 평행평판 사이를 통과하는 유량에 비례한다. 따라서 이 경우의 유체유동 압력강하는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다⁽⁶⁾.

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

여기서, b 는 평판 폭, h 는 평판사이의 간극, L 은 전극의 길이, Q 는 전기장이 인가되지 않은 경우의 통과유량을 나타낸다.

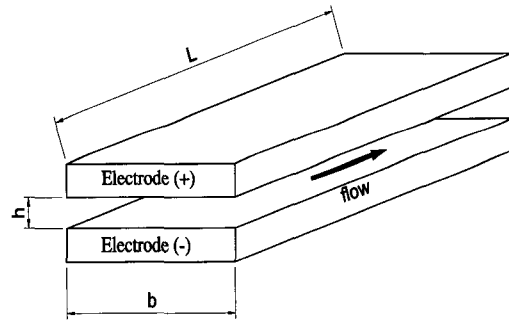


Fig. 1 Schematic diagram of plate type ER-Valve

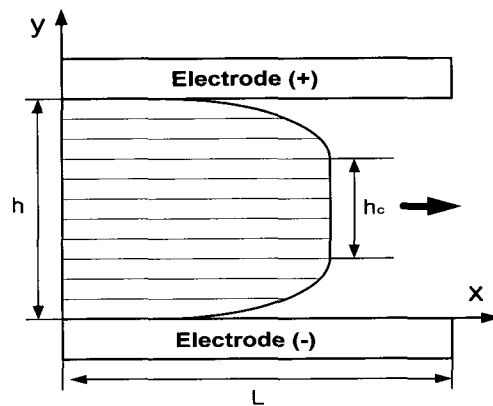


Fig. 2 Flow of ER fluid in electrode gap

ER유체에 전기장이 인가되면 ER유체의 항복전단응력 $\tau_y(E)$ 로 인해 압력강하가 커지며, Fig. 2와 같이 전극사이의 간극이 h_c 인 플러그(plug) 유동으로 생각 할수 있다. $\tau_y(E)$ 에 의한 압력강하 ΔP_{ER} 이 추가적으로 발생되며 다음식으로 나타낼 수 있다.

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

따라서 ER-Valve의 전극사이에서 발생하는 전체 압력강하(ΔP)는 ER유체의 점성과 ER유체의 전기장에 따른 항복전단응력 변화에 의한 압력강하의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{\mu} + \Delta P_{ER} \\ &= \frac{12\mu L Q_{ER}}{b h^3} + \frac{2L \tau_y(E)}{h} \\ &= \frac{12\mu L Q_{ER}}{b h^3} + \frac{2L \alpha E^{\beta}}{h} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 Q_{ER} 은 전기장 인가시 ER-Valve의 전극사이를 통과하는 유량을 나타낸다. 식에서 나타난 바와 같이 전극길이 L 이 클수록, 전극사이의 간극 h 가 작을수록 ER-Valve에서 발생하는 전체 압력강하는 증가하게 된다.

3. 평판형 ER-Valve의 제작

Table 1과 Fig. 3은 제작된 ER-Valve의 전극형상을 나타낸다. 설계·제작한 ER-Valve의 전극형상은 사각형, 사다리꼴형, 마름모형, 원형의 4종류(8매)이고 모두 평판형으로 재질은 동이며 두께는 2mm이다. 제작 가능한 ER-Valve의 전극형상은 cylinder, zig-zag, pin type 등으로 분류할 수 있는데 동일 실험조건에서 cylinder type의 ER-Valve가 성능이 우수하다고 보고되고 있다⁽³⁾. 이것은 같은 단면상에서 원형전극이 다른 전극의 형상보다 단면적이 크기 때문이다. 본 연구에서 평판형을 선택한 이유는 전극의 편평도가 쉽게 유지되고 가공이 수월하며, 전극표면의 정밀도가 높기 때문이다. 또한 실린더형보다 설계 및 구조가 단순화되어 재료비 절감과 함께 이에 따른 경제성이 보장되기 때문이다.

ER-Valve의 전극은 고전압을 인가한 상태로 전기단락현상 없이 전기장이 일정하게 유지되도록 전극표면을 연삭기





로 정밀하게 가공하였다. ER유체의 누설을 방지하기 위해 Fig. 3의 A부분과 같이 직경 2mm의 홈을 가공하여 오링(O-ring)을 삽입하였다.

4. 실험 및 결과

4.1 실험장치 및 방법

Fig. 4는 본 연구에서 제안한 ER-Valve의 실험장치를 나타낸 것이다. 펌프에서 송출된 ER유체를 ER-Valve 간극내

Table 1 Electrode shape of ER-Valve

ER-Valve	Electrode			
	Shape	Valve gap [mm]	Length [mm]	Area [mm ²]
ER-Valve 1		1.5	189	18145
ER-Valve 2		1.5	187	18145
ER-Valve 3		1.5	186	18145
ER-Valve 4		1.5	152	18145

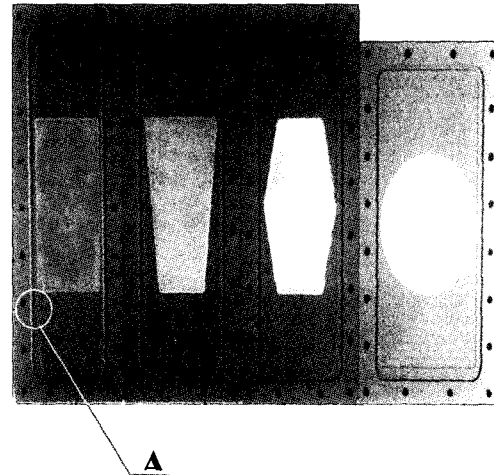


Fig. 3 Photograph of the plate type ER-Valve

부로 유입시키고, ER-Valve에 인가되는 전기장의 강도를 변화시켜 ER효과를 발생하게 하였다. 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 포함되어있는 특수한 형태의 유체를 이송시키기에 적합한 트로코이드 펌프를 사용하였고, 최대 유량은 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. 공급압력(0.5kgf/cm²)은 펌프 송출측의 유량제어밸브(flow control valve), 바이패스 밸브(by pass valve), 교축밸브 1, 2, 3을 조절하여 일정한 압력으로 유지하였다. 실험에서는 유량을 변화시켜 전기장 강도에 따른 압력강하를 측정하였다. 유량은 단위 시간당 발생된 ER유체의 중량 유량을 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. ER-Valve 1의 실험이 끝난 후 ER-Valve 2, 3, 4의 실험을 위와 같은 방법으로 3회씩 반복측정하였으며, 압력강하의 측정 데이터는 평균값을 이용하였다. 실험데이터를 Table 2에 나타냈으며, 전기장의 강도가 증가할수록 압력강하는 증가하고 유량은 감소하는 것을 알 수 있다.

4.2 실험결과 및 고찰

Fig. 5~Fig. 8은 ER-Valve 내의 ER유체의 유량과 압력강하의 관계를 나타내는 실험결과이다. Fig. 5에서 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 때문이다. 특징적인 것은 유량이 변화하더라도 거의 일정한 압력강하가 생기는 것을 알 수 있다. 이것은 균일계 ER유체에는 없는 분산계 ER유체의 특징이기도 하다. 분산계 ER유체는 병행유체로

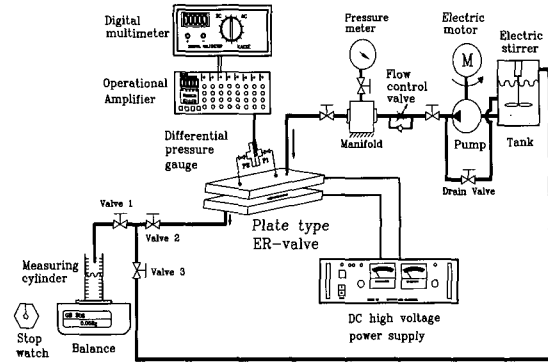


Fig. 4 Experimental apparatus

Table 2 Data of pressure drop and flow rate

ER-Valve	Field [kV/mm]	Flow rate [cm ³ /s]	Pressure drop[kPa]
ER-Valve 1	0.0	28.5	32.5
	0.5	23.7	45.0
	1.0	22.1	50.0
	1.5	17.9	55.0
	2.0	15.7	59.0
ER-Valve 2	0.0	30.0	30.0
	0.5	21.7	39.5
	1.0	20.0	46.0
	1.5	18.7	50.0
	2.0	17.7	53.2
ER-Valve 3	0.0	31.0	27.2
	0.5	20.2	33.0
	1.0	20.5	37.0
	1.5	19.7	42.5
	2.0	19.1	49.9
ER-Valve 4	0.0	31.3	18.0
	0.5	27.0	22.5
	1.0	26.0	28.0
	1.5	24.7	35.0
	2.0	24.5	46.2

해석되므로, ER효과에 의한 저항이 점성에 의한 저항보다 더 크기 때문에 일정한 압력강하가 발생하는 것이다⁽⁵⁾. Fig. 6과 Fig. 7의 경우에도 Fig. 5와 유사한 특성을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 8은 같은 전기장의 강도에서 유량에 대한 압력강하가 Fig. 5~Fig. 7의 경우에 비해 작은 것

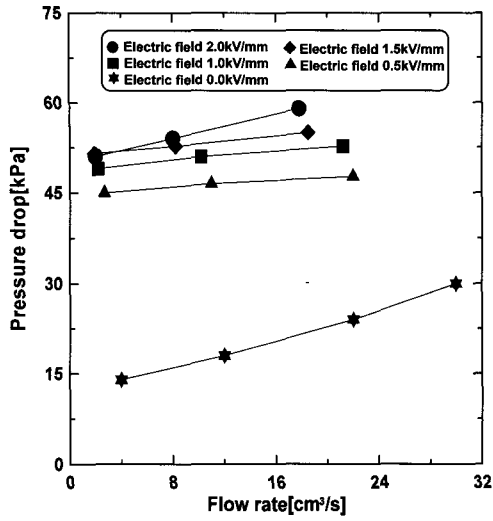


Fig. 5 Pressure drop versus flow rate of ER-Valve 1

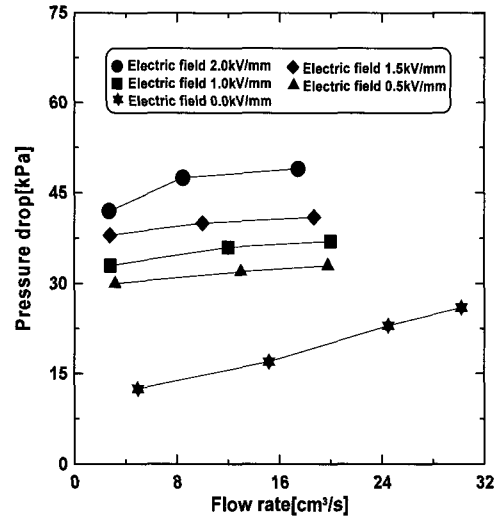


Fig. 7 Pressure drop versus flow rate of ER-Valve 3

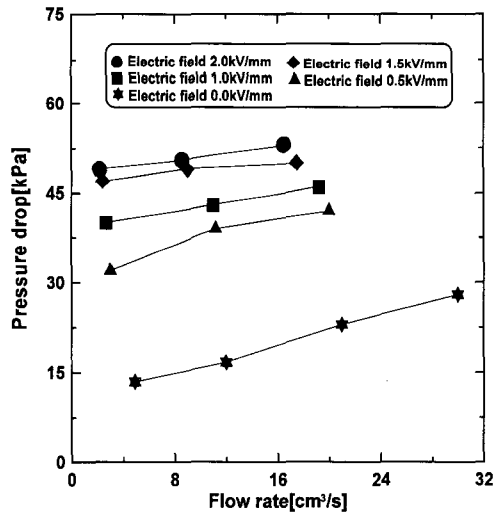


Fig. 6 Pressure drop versus flow rate of ER-Valve 2

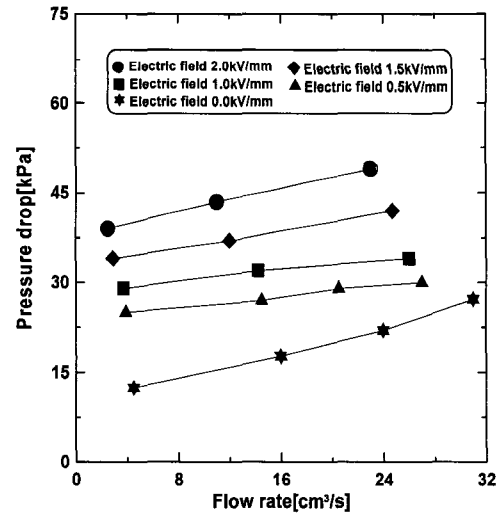


Fig. 8 Pressure drop versus flow rate of ER-Valve 4

을 알 수 있다. 이것은 식 (4)로부터 알 수 있는 바와 같이 ER-Valve 4가 ER-Valve 1, 2, 3에 비해서 전극 길이 L 이 짧고, 전극 폭 b 가 넓어 유동저항이 작아지기 때문인 것으로 생각한다.

Fig. 9와 Fig. 10은 전기장의 강도가 압력강하와 유량에 미치는 영향을 나타낸 실험결과이다. Fig. 9에서 전기장의 강도에 따라서 압력강하는 거의 비례적으로 증가하고 각 밸브 모두 전기장의 강도가 클수록 압력강하가 커지는 것을

알 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 요구되는 압력의 크기를 전기장을 조절함으로써 얻을 수 있는 유압장치를 개발하는데 응용할 수 있을 것으로 생각한다. 같은 크기의 전기장 강도에 대한 압력강하의 크기는 ER-Valve 1, 2, 3, 4 순으로 되는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에서 ER-Valve를 흐르는 유량은 전기장의 강도가 클수록 작아지는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5에서 설명한 것과 같이 전기장의 강도가 클수록 (+), (-)전극에

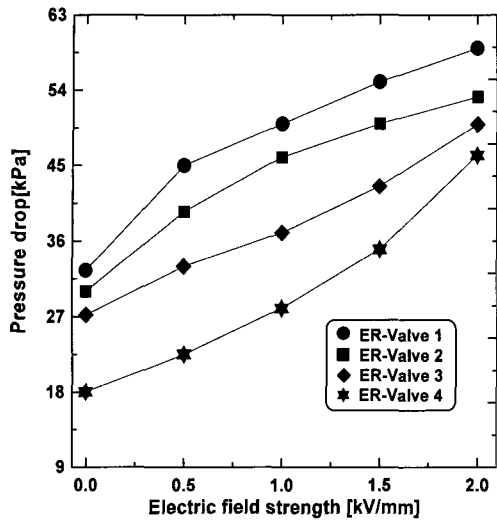


Fig. 9 Pressure drop characteristics of ER-Valve 1, 2, 3, 4

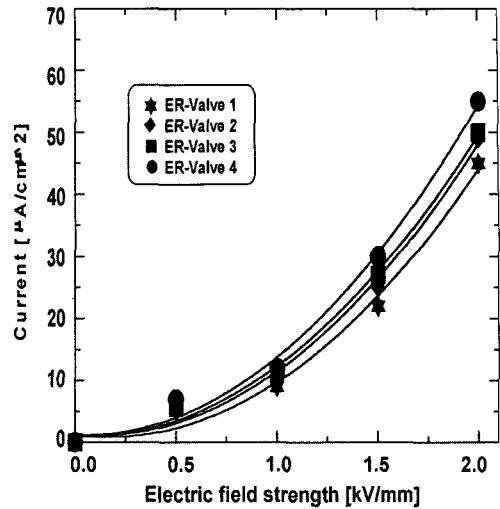


Fig. 11 Current characteristics of ER-Valve 1, 2, 3, 4

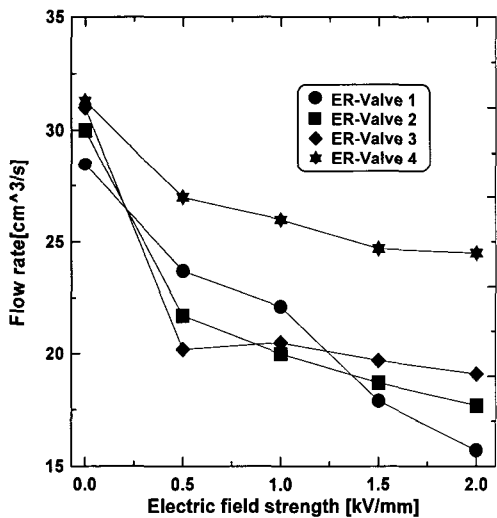


Fig. 10 Flow rate characteristics of ER-Valve 1, 2, 3, 4

부착하는 클러스터가 많이 발생하고 이 클러스터의 저항으로 유량이 작아지기 때문인 것으로 생각한다. 같은 크기의 전기장 강도에 대해 유량은 ER-Valve 4, 3, 2, 1 순으로 작아지는 것을 알 수 있다. 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 구조

의 단순성 등에서 상당한 이점을 찾아 볼 수 있었다.

Fig. 11은 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. 또한 주파수 60Hz의 전기장에서 1.2mA~1.8mA 정도가 인체에 고통을 주는 것으로 알려져 있으나 그림에서 최대 전기장이 2kV/mm에서 전류는 60 μA 정도 밖에 되지 않아 인체에 미치는 영향은 없을 것으로 생각된다⁽⁷⁾.

5. 결론

본 연구에서는 전극 표면적은 동일하나 폭과 길이를 변화시킨 4종류의 평판형 ER-Valve를 설계·제작하고, 전기장의 강도가 전극사이를 흐르는 ER유체의 유량·압력강하 특성에 미치는 영향을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) ER-Valve에 동일 전기장을 인가한 경우, 압력 강하는 전극길이(L), 전극 폭(b)의 영향에 지배되는 것을 알 수 있었다.
- (2) ER-Valve에 전기장을 인가한 경우, 전기장의 강도가 클수록 압력강하가 크게 발생하는 것을 알 수 있었다. 또한 같은 크기의 전기장 강도에 대한 압력강하의 크기

- 는 ER-Valve 1, 2, 3, 4 순으로 되는 것을 알 수 있었다.
- (3) ER-Valve에 전기장을 인가한 경우, 전기장의 강도가 클수록 ER-Valve를 흐르는 유량이 감소하는 것을 알 수 있었다. 같은 크기의 전기장 강도에 대해 유량은 ER-Valve 4, 3, 2, 1순으로 작아지는 것을 알 수 있었다.
- (4) ER-Valve를 흐르는 유량이 변화하더라도 거의 일정한 압력강하가 생기는 것은 ER효과에 의한 저항이 점성에 의한 저항보다 더 크기 때문인 것을 알 수 있었다.
- (5) ER-Valve에 고 강도의 전기장을 인가하여도 흐르는 전류는 매우 낮은 것을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 2002학년도 경남대학교 학술논문게재 연구비 지원으로 이루어 졌음.

참 고 문 헌

- (1) Simmonds, A. J., 1991, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", *Proceeding of Trans. of IEEE Series D*, Vol. 138, No. 4, pp. 400~404.
- (2) Jeon, Y. S., 1998, "Performance Investigation of Cylindrical-Type ER Valves With Different Electrode Length", *Trans. of KSMTE*, Vol. 7, No. 6, pp. 1~11.
- (3) Brooks, D. A., 1992, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", *J. of Modern Physics*, Vol. 6, pp. 2705~2730.
- (4) Jang, S. C., Yum, M. O. and Kim, D. T., 2001, "The Flow Characteristics of ER Fluids According to the Electrode Shape of Two Parallel-Plate", *Proceeding of KSME 2001 Spring Annual Meeting E*, pp. 207~212.
- (5) Yokota, S. and Kondoh, Y., 1996, "A Control Valve by Making Use of an ER Fluid", *J. of JSME*, Vol. 62, No. 601, pp. 93~100.
- (6) Choi, S. B., Choi, W. Y. and Sung, K. G., 1999, "Position Control of a Double-Rod Cylinder System Using ER Valves", *Trans. of KSME*, Vol. 23, No. 5, pp.853~860, 1999.
- (7) Hong, J. W., 1995, *Concepts of Electric and Electronic Engineering*, Dongmyung Press.
- (8) Hartnett, J. P. and Hu, R. Y. Z., 1989, "The Yield Stress An Engineering Reality", *J. of Rheology*, Vol. 33, pp. 671~679.
- (9) Lou, Z., Ervin, R. D. and Filisko, F. E., 1991, "Behaviors of Ectorrheological Valves and Bridges", *Proceeding of Int. Conference*, Vol. 15~16. pp. 398~423.
- (10) 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", *Trans. of KSMTE*, Vol. 12, No. 1, pp. 78~83.