

평판형 ER-Valve의 성능실험에 관한 연구

장성철* · 염만오** · 김도태*** · 박재범****

Study on Performance Test of Plate Type ER-Valves

S.C.Jang* · M.O.Yum** · D.T.Kim*** · J.B.Park****

Key Words : *Electro-Rheological fluid*(전기점성유체, ER유체), *Flow rate*(유량), *Pressure drop*(압력강하), *ER-Valve*(ER밸브), *Electric field*(전기장)

Abstract

Hydraulic valve control the pressure and the flow of fluid by the hydraulic oil transfered from pump but the ER fluid consists of solid particles of micrometer in size and insulating oil so in the general hydraulic valve. We invented ER-Valve using ER fluid as working fluid. The ER fluid, working fluid of ER-Valve is a functional fluid to represent the feature of fluid according to strength of electric field. In this research we made our own 4 types of plate type ER-Valve which has same surface but different width and length and then we conducted performance test. We measured flow rate and pressure drop of fluid which is flowing in the ER-Valve according to the electric field strength to conduct this test. We modeling ER-Valve relating to ER-Valve system and yield shear stress according to the strength of electric field. We used the pressure drop according to the strength of electric field by differential pressure gauge in the our own made ER-Valve. This test reviewed experimental the special changes of ER-Fluid in the steady flow condition.

1. 서론

전기장의 강도에 의해 영향을 받는 ER유체의 발견은 1880년 독일에서 처음으로 보고되었다^[1]. 1947년 Winslow^[2]가 전기점성 유체(electrorheological fluid, 이하 ER유체라 함)의 제조에 관한 특허와 그 응용면에 관한 보고를 한 후부터 다방면에 응용되고 있다. ER유체를 이용한 Valve(이하 ER-Valve라 함)에 대한 연구는 ER유체의 고유 특성과 연계해 볼 때 가장 적합한 응용장치로 인식되어 많은 진전이 이루어지고 있다. Brooks^[3]는 ER-Valve를 이용한 유압회로를 구성하여 성능시험을 수행하였으며 이를 응용한 연구 분야에 대하여 언급하였다. Nakano^[4]등은 평판형 ER-Valve를 통과하는 ER유체를 하젠-포아젤 흐름으로 해석하고 전기장 인가시의 압력강하에 대한 과도응답과 ER유체의 압축성 효과를 고찰하였다. 그러나 지금까지의 연구는 자체의 모델링과 전기장 강도에 따른 성능시험 연구가 대부분이다. ER-Valve의 전극형상이나 크기에 대한 연구는 수행된 바가 거의 없는 것으로 조사되었다. 전기장 강도에 따른 ER-Valve의 전극형상이 압력강하에 미치는 영향은 꼭 고찰되어야 할 분야이다.

따라서 본 연구에서는 전극 표면적은 같으나 전극 폭과 길이를 변화시킨 4종류의 평판형 ER-Valve를 설계·제작하고 이에 대한 성능실험을 수행하였다. ER-Valve의 성능실험을 위하여 실리콘 오일에 전분 입자가 분산된 입자 분산계 ER유체를 자체 조성하였다. ER유체의 항복전단응력은 회전식 점도계를 이용하여 측정하고, 이에 따른 병행특성을 조사하였다. ER유체를 작동 유체로 하여 Valve에 응용하기 위해서는 (+)전극과 (-)전극의

간극내를 통과하는 유량에 의해 발생된 미소한 압력강하를 계측하였다. 압력강하는 스트레이니게이지 형식의 미소 차압계를 제작하여 계측하였다. 실험은 정상유동상태에서, 전기장 유·무에 따른 ER유체의 유량과 압력강하 특성을 실험적으로 검토하였다.

2. ER-Valve의 모델링 및 제작

Fig. 1은 ER-Valve의 개략적인 형상을 모델링한 것이다. 제안된 ER-Valve는 평판형으로 평판의 윗부분에는 고전압 발생장치의 (+)전원이 아랫부분은 (-)전원에 연결되어 있어 전극으로 작용한다. 이러한 (+), (-) 전극사이로, ER유체가 유입될 때 전기장을 전극에 인가하여 압력강하를 얻을 수 있다.

평판형 ER-Valve 유로내의 관계식을 도출하기 위해 전기장을 인가하지 않은 경우를 살펴보면 압력강하는 전적으로 유체의 점성에 기인하며 ER-Valve 간극 사이를 통과하는 유량에 비례한다. 그러므로 전기장 무인가시 간극사이의 압력강하 ΔP_μ 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta P_\mu = \frac{12\mu L Q}{b h^3} \quad (1)$$

ER유체에 전기장이 인가되면 ER유체의 항복전단응력 $\tau_y(E)$ 로 인해 압력이 강해진다. 따라서 ER-Valve에 발생하는 전체 압력강하는 점성과 ER유체의 전기장에 따른 전단응력 변화에 의한 압력강하의 항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다^[5].

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

* 경남대학교 대학원, sccjang@hanmail.net

** 경남대학교 기계자동화공학부, moyum@kyungnam.ac.kr

*** 경일대학교 기계공학부, dtkim@kyungnam.ac.kr

**** 부산산업인력개발원 산업기계과, pjb971@hanmail.net

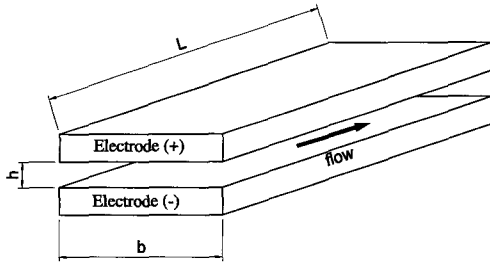






Fig. 1 Geometry of an ER-Valve

Table 1 Electrode shape of ER-Valve

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

여기서 b 는 전극의 폭이고, h 는 전극의 간극, L 은 전극의 길이, μ 는 ER유체의 점성, Q 는 유량, τ_y 는 항복전단응력을 나타낸다.

Table 1은 제작된 ER-Valve의 전극 형상을 나타낸다. 본 연구에서 4가지 형상의 평판형을 선택한 이유는 전극의 편평도를 유지하기 쉽고, Pin type, Zig-Zag type, Cylinder type보다 가공이 수월하기 때문이다. 제작된 ER-Valve의 전극 형상은 사각형, 사다리꼴형, 마름모형, 원형으로서 모두 평판형이다. 전극의 재질은 두께 2 mm의 구리판이다. 실제 실험시 Pin type, Zig-Zag type, Cylinder type의 경우 ER-Valve의 복잡한 유로 때문에 ER입자가 엉겨붙어 전기단락현상을 일으킬수도 있다고 생각한다. ER-Valve의 성능을 향상시키기 위해서는 전극의 제작과정에서 가공상의 높은 정밀도가 선행되어야 한다. 본 연구에서 ER-Valve의 전극은 고전압을 인가한 상태로 전기단락현상 없이 전기장이 일정하게 유지되도록 전극 표면을 연삭기로 정밀하게 가공하였다. 그리고 ER유체의 누설을 방지하기 위해서 지름 2 mm의 오링(O-ring)을 사용하였다.

3. 실험

3.1 실험장치 및 방법

Fig. 2는 본 연구에서 제안한 ER-Valve의 실험장치이다. 펌프에서 송출된 ER유체를 ER-Valve 간극 내부로 유입시키고, 전기장의 강도를 변화시켜 ER효과를 발생하게 하였다. 실험에 사용한 입자의 크기는 회로 내의 원활한 유동을 고려하여 50 μ m

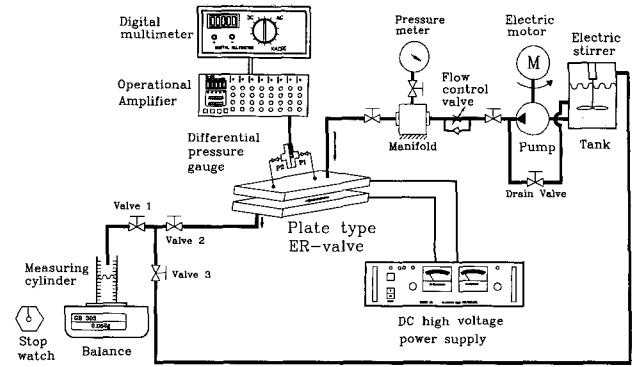


Fig. 2 Experimental apparatus for ER-Valve

정도의 전분 입자를 사용하였다. 탱크내에 저장된 전분 입자의 침전을 방지하고, 입자분포를 균일하게 하기 위해서 전동식 교반기로 교반하였다. 유량을 공급하기 위한 펌프는 ER유체와 같이 유체내의 작은 입자들이 포함되어있는 특수한 형태의 유체를 이송시키기에 적합한 트로코이드 펌프를 사용하였고, 최대 유량은 4.5l/min이다. 모터의 정격 회전수는 1000rpm이고 3상 교류 220V가 사용하였다.

ER-Valve의 입·출구에는 차압계가 설치되어 펌프에서 송출된 ER유체가 ER-Valve에 유입되어 전기장을 인가 하기전의 압력강하와 전기장을 인가한 후 ER효과에 의해 발생한 압력강하를 측정하였다. 실험절차는 평판형 ER-Valve 앞의 매니폴드(manifold)에 장착되어 있는 압력계를 보고 일정 압력을 유지하였다. 회로 내에서 트로코이드 펌프 송출측의 유량제어밸브(flow control valve), 드레인 밸브(drain valve), 밸브 1, 2, 3에 의해서 유량이 조절되므로 일정 압력을 유지하였다. 한 가지 유량에 대한 실험이 끝난 후 계속 유량을 변화시켜 가면서 전기장 강도에 따른 압력강하를 측정하였다. 유량은 단위 시간당 발생된 ER유체의 중량으로 측정하였으며, 실리콘오일의 점성 및 전분 입자의 무게분율을 고려하여 계산하였다. 전기장의 강도는 0~2kV/mm까지 0.5kV/mm 씩 증가시켰다. ER-Valve의 (+), (-) 전극에 전기장이 인가되면 압력강하가 증가하게 된다. 압력강하의 측정은 평판형 ER-Valve 위에 설치된 차압계를 이용하였다. ER-Valve 내부로 ER유체가 유입되면 차압계 내부의 스트레인게이지는 변형을 받게 된다. 이러한 변형량이 연산증폭기로 전달되면 디지털 전압계에서 전압을 읽어 압력강하를 계속하였다. ER-Valve 1의 성능실험이 끝나면 나머지 ER-Valve 2, 3, 4를 반복하여 유량 및 압력강하 특성을 측정하였다.

3.2 실험결과 고찰

Fig. 3~Fig. 6은 ER-Valve 1, 2, 3, 4에서 발생하는 ER유체의 유량과 압력강하의 관계를 나타낸 그래프이다. 전기장의 강도는 0~2kV/mm 까지 0.5kV/mm씩 증가시켰다. 그래프에 나타난 바와 같이 전기장의 강도가 증가할수록 유량은 감소하지만 압력강하는 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 1의 ER-Valve 작동원리에서 설명한 것과 같이, 전기장을 인가하지 않은 경우 압력강하는 ER유체의 점성에 의해서만 영향을 받는다. 전기장을 인가하게 되면 (+), (-)전극 사이에 흐르는 ER유체는 순간적으로 클러스터가 형성된다. 이러한 클러스터가 실리콘 오일의 유동저항이 되어 유량은 감소하고 압력강하가 증가하는 것이다. ER-Valve의 전극형상이 바뀌더라도 유량 및 압력강하는 전기장의 강도에 따라 선형적으로 증가하는 양상을 보인다.

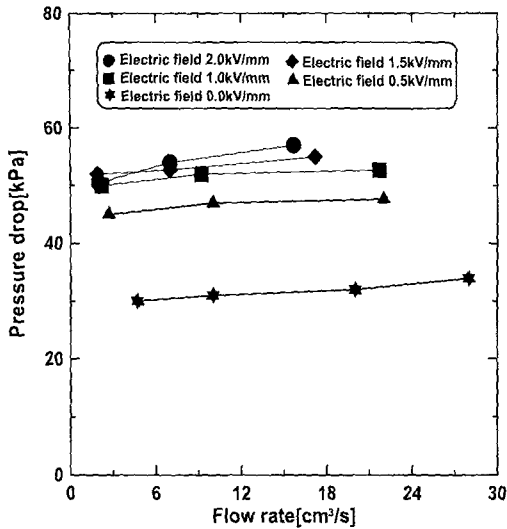


Fig. 3 Pressure drop versus flow rate for ER-Valve 1

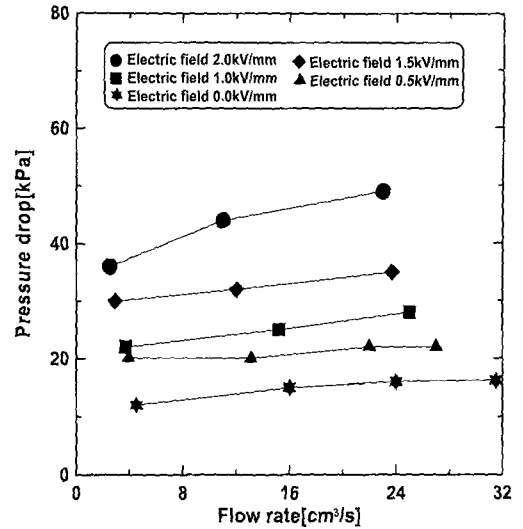


Fig. 6 Pressure drop versus flow rate for ER-Valve 4

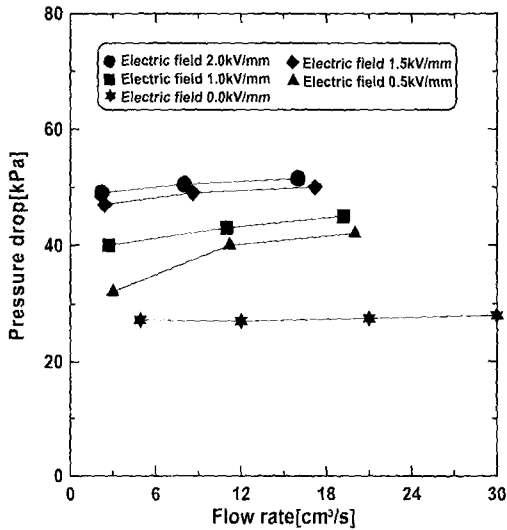


Fig. 4 Pressure drop versus flow rate for ER-Valve 2

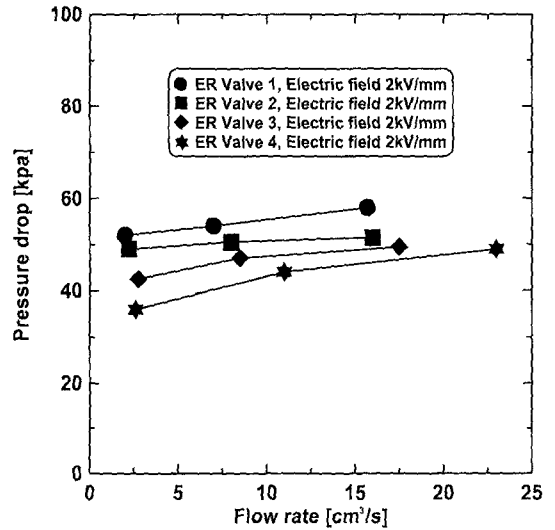


Fig. 7 Pressure drop versus flow rate of 4 type ER-Valves

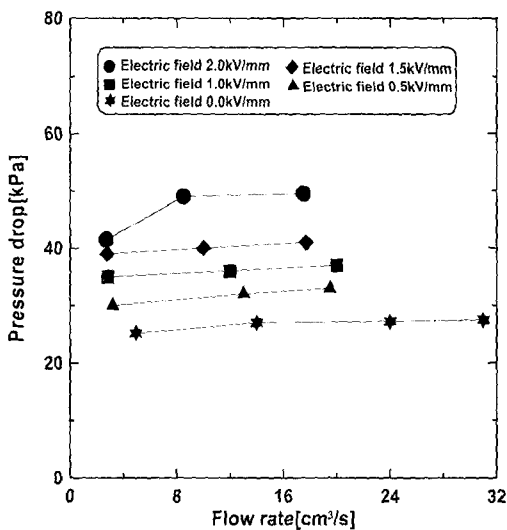


Fig. 5 Pressure drop versus flow rate for ER-Valve 3

Fig. 3~Fig. 6에서 전기장을 인가하지 않을 경우, 포인트(★)는 ER유체가 ER-Valve 간극 사이를 통과하는 점성에 의해서만 영향을 받기 때문이다. 전기장을 인가하지 않을 경우, ER-Valve 1, 2, 3은 압력강하가 거의 비슷하지만 ER-Valve 4의 경우 압력강하가 많이 감소한 것을 알 수 있다. 이것은 ER-Valve 4가 원형이라서 전극 폭은 넓고 길이가 짧기 때문이라고 생각한다. 전기장을 인가할 경우, 포인트(▲~●)는 ER-Valve의 (+), (-)전극에서 컬러스터가 형성되어 유동저항이 발생하기 때문이다.

Fig. 7은 전기장의 강도를 2kV/mm로 일정하게 한 상태에서 ER-Valve의 유량과 압력강하 특성을 나타낸 것이다. ER-Valve 2, 3, 4가 ER-Valve 1에 비해 압력강하가 낮은 것을 알 수 있다. 이는 식 (2)의 수식에서 알 수 있듯이 ER-Valve 2, 3, 4가 ER-Valve 1에 비해서 전극길이 L 이 짧고 전극 폭 b 가 넓어 유체저항이 작아지기 때문인 것으로 생각한다. 전기장의 강도에 따른 유량의 관계를 살펴보면, 전기장의 강도가 증가할수록 ER-Valve 4, 3, 2, 1 순서대로 유량은 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 3~Fig. 6에서 설명한 것과 같이 ER-Valve의 전극 형상에 의한 영향이라고 생각한다.

4. 결론

본 연구에서는 전극 표면적은 같으나 전극 폭과 길이를 변화시킨 4종류의 평판형 ER-Valve를 설계·제작하고 이에 대한 성능실험을 수행하였다. ER-Valve의 성능실험을 위하여 실리콘 오일에 전분 입자가 분산된 입자 분산계 ER유체를 자체 조성하였다. ER유체의 항복전단응력은 회전식 점도계를 이용하여 측정하고, 이에 따른 빙햄특성을 조사하였다. ER유체를 작동유체로 하여 Valve에 응용하기 위해서는 (+)전극과 (-)전극의 간극내를 통과하는 유량에 의해 발생된 미소한 압력강하를 계측하였다. 압력강하는 스트레인게이지 형식의 미소 차압계를 제작하여 계측하였다. 실험은 정상유동상태에서, 전기장 유·무에 따른 ER유체의 유량과 압력강하 특성을 실험적으로 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평판형 ER-Valve에서 전기장 강도가 증가할수록 큰 압력강하가 발생하는 것을 알 수 있었다.
2. 전극 형상에 따른 ER유체의 유동특성에서 ER-Valve 1, ER-Valve 2, ER-Valve 3, ER-Valve 4 순서로 큰 압력강하가 발생되었다.
3. 전기장의 강도가 증가할수록 ER-Valve 1, 2, 3, 4 순서대로 유량은 감소하는 것을 알 수 있었다

참고문헌

- [1] W. Konig, "Bestimmung einiger Reibungscoefficienten und Versuche über den Einfluss der Magnetisierung und Electrisirung auf die Reibung der Flüssigkeiten," *Annals of Physics*, Vol. 25(1885), pp. 618-624.
- [2] W. M. Winslow, "Induced Fibrillation Suspensions", *J. Applied Physics*, Vol. 20(1949), pp. 1137-1140.
- [3] D. A. Brooks, "Design and Development of Flow Based ER Devices", *Journal of Modern Physics*, Vol.6(1992), pp. 2705-2730.
- [4] M. Nakano and T. Yonekawa, "Pressure Response of ER Fluid in a Piston Cylinder ER Valve System", *Proc. of the 4th Int. Conf. on Electrorheological Fluid*(1994), pp. 477-489.
- [5] Zheng Lou, Robert D. Ervin, and Frank E. Filisko, "Behaviors of Electrorheological Valves and Bridges", *Proceedings of the International Conference*. Vol. 15-16(1991) pp. 398-423.
- [6] 장성철, 염만오, 김도태, 김태형, "평행평판의 전극형상에 따른 ER유체의 유동특성 I", *대한기계학회 춘계학술대회 논문집*(2001), pp. 207~212.
- [7] 장성철, 염만오, 김도태, "ER유체를 이용한 유압제어밸브의 개발", *한국유체공학 학술대회 논문집*(2000), pp. 495-498.