

ER유체의 유동특성에 관한 실험적 연구 Ⅲ (평행평판 간극내의 유량-압력강하 특성)

Experimental Investigation on the Flow Characteristics of ER Fluids Ⅲ (3rd Report, Flow-Pressure Drop Characteristics Clearance between Two Parallel Plate)

김도태(경일대 기계공학부), 장성철*(경일대 대학원)
D. T. Kim (Kyungil Univ.), S. C. Jang (Graduate School, Kyungil Univ.)

Abstract

Electro-rheological(ER) fluids are suspensions which show an abrupt increase in rheological properties under electric fields. The rheological response is very rapid and reversible when the electric field is imposed and/or removed. Therefore, there are many practical applications using the ER fluids. The purpose of the present study is to examine the flow characteristics of electro-rheological fluids. The field-dependent yield stress are obtained from experimental investigation on the Bingham property of the ER fluid. Then the steady relationship between pressure drop and flow rate of the ERF was two fixed parallel-plates was measured under application of an electric fields. The electrical and rheological properties of zeolite based electro-rheological fluids were reported.

Key words : Electro-rheological fluid(전기유변유체) Electric field(전기장) Yield stress(항복응력)
Pressure drop(압력강하) Flow rate(유량) Parallel-plate(평행평판)

1. 서론

ER유체(electrorheological fluid, 電氣誘變流體 또는 電氣粘性流體라 함)는 인가되는 전기장의 세기에 비례하여 액체의 Rheology 특성이 변하는 현상을 나타내는 기능성 유체(機能性流體)이고, 비전도성의 용매에 전도성의 입자를 분산시킨 현탁액이다. ER유체는 입자 분산계(粒子分散系)와 균일계(均一系)로 대별할 수 있다. 입자 분산계 ER유체는 전기장의 세기에 따라 분극되었던 입자가 전극방향으로 사슬구조를 형성하여 유체의 점성을 증가시켜 Newton유체에서 Bingham유체의 유동특성으로 변화한다. 균일계 ER유체는 전기장을 인가하면 유체의 점도가 변화하는 특성을 가지고 있다. ER유체는 전기장의 세기만을 변화시켜 연속적인 제어가 가능하며, 이러한 ER유체의 특성을 이용한 응용장치는 설계가 단순화되는 장점을 가지게 된다.

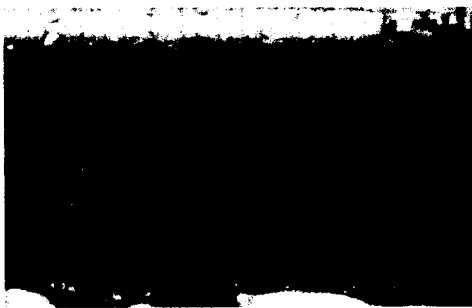
본 연구에서는 분산계 ER유체를 응용한 제어 밸브를 개발하기 위한 전 단계로서, 평행평판 간극내의 ER유체의 유동특성을 실험적으로 검토하였다. 평행평판은 $250 \times 150 \times 1$ (mm)로 설계·제작하였으며, 평행평판의 상하부분은 전극으로 사용된다. ER유체는 실리콘오일에 제올라이트를 첨가한 분산계 ER유체(무계분율 35wt%)를 사용하였다. ER밸브로 응용하기 위해서는 평행평판 간극내를 통과하는 유량과 압력강하특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히 평행평판을 통과하는 유량에 의해 발생하는 미소한 압력강하를 계측하는 것이 중요한 기술적 과제이다. 본 연구에서는 스트레인게이지를 이용한 미소 차압계를 개발하여 압력강하를 계측하였다.

실험은 정상유동상태에서, 전기장의 유무에 따른 ER유체의 유량과 압력강하 특성을 검토하였다.

2. ER유체의 특성

2.1 ER유체의 일반적 거동

Fig. 1은 전기장 인가에 의하여 입자분말이 사슬구조를 형성함을 시각적으로 보이기 위한 사진이다. 사진에서 알 수 있듯이 실리콘오일에 평균직경이 55 μm 정도인 Glass beads 입자가 전기장 무인가시에는 전극사이에서 자유로이 분포하고 있지만 전기장을 1kV/mm를 인가하면 입자들이 전극 사이에서 사슬구조를 형성하는 알 수가 있다.



(a) Electric field 0 kV/mm



(b) Electric field 2 kV/mm

Fig. 1 Photo. Effect DC electric field on the structure formation of an ER fluid.

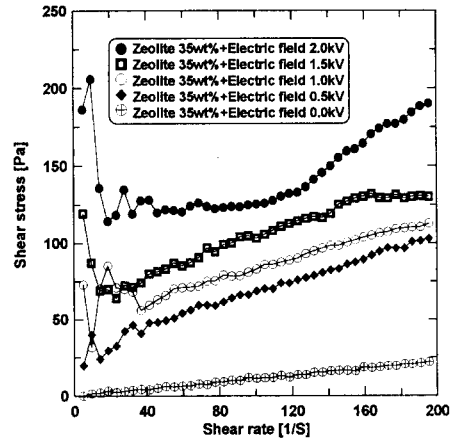
이와 같이 ER유체의 두드러진 특징은 전기장이 인가됨에 따라 유체의 점성이 변화하는 것인데 전기장 무인가시에는 분극성 입자가 양 전극 사이에서 자유로이 운동하는 뉴턴유체상태에서 전기장 인가시에는 유체중에 분산된 입자가 사슬구조를 형성하여 항복응력을 갖게되는 빙헴유체상태로 변하게 되며 이를 수식으로 표현하면

다음과 같다.

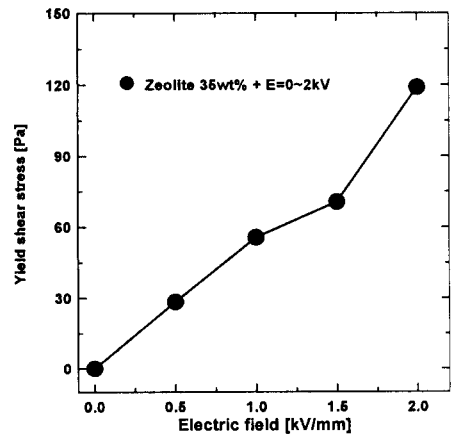
$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma} = \alpha E^\beta + \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (1)$$

τ 는 유체의 전단응력, $\tau_y(E)$ 는 전기장 E의 함수인 항복전단응력, η 는 전단속도비에 영향을 받는 용매의 점도, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비이다. 여기서 α 와 β 는 ER유체의 용매의 종류와 점도, 입자의 종류와 중량비, 입자의 수분함량 등 ER유체의 조성조건에 의해 달라지는 고유치이며 실험을 통하여 구할 수 있다.

2.2 빙헴 특성



(a) Shear stress vs Shear rate



(b) Yield Shear stress vs Electric field

Fig. 2 Bingham characteristics of an ER Fluid

빙햄특성실험에서는 ER유체를 자체조성하여 ER유체의 고유특성치인 항복전단응력값을 회전식점도계(Haake社, VT-500)를 이용하여 측정하여 전기장 인가에 대한 빙햄특성실험을 수행하였다. 본 연구에서 조성된 ER유체의 용매는 실리콘 오일(점성:20cs)을 사용하였으며, 전도성의 입자는 zeolite 입자를 사용하여 무게분율을 35wt%로 조성하였다. 실험에서는 전단 속도비를 0[1/s]부터 200[1/s]까지를 2분 동안에 증가하도록 설정하여 수행하였다.

Fig. 2는 실험에서 얻은 빙햄특성결과를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 전기장 증가에 따른 ER유체의 전단속도비와 전단응력의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 ER유체는 전기장이 증가할수록 동일한 전단속도비에 대한 전단응력의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 일정한 전기장의 크기에 대해서 유동이 시작된 후에는 전단응이 전단속도비에 대해서 전기장 무부하시의 경우와 유사한 비율로 증가함을 알 수 있다. Fig. 2(b)는 전기장 증가에 따른 ER유체의 항복전단응력의 변화를 나타내는 것으로 항복전단응력의 변화를 식(1)의 표현과 같이 전기장에 의한 항복응력전단응력 $\tau_y(E)$ 로 표현하면 전기장 E 에 대하여 $56.02E^{1.36}$ 의 관계가 된다. 실험에서 고찰한 바와 같이 ER유체의 특성변화에 영향을 미치는 인자로는 전기장의 크기가 매우 중요하다는 사실을 알 수 있다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 미소차압계 제작 및 설계

평행평판(250×150×1)을 통과하는 ER유체의 유량에 의해 발생하는 미소한 압력강하를 계측하는 것은 중요한 기술적 과제이다. 본 연구에서는 스트레인게이지를 이용한 미소차압계를 개발하여 압력강하를 계측하였다. Fig. 3은 미소차압계의 전체적인 형상과 내부구조를 나타낸다. 차압계의 재질은 황동이며, 스트레인게이지가 부착된 격막에 평행평판의 유입부와 유출부 두 부분에서 유체 유입시 누설을 고려하여 O링('O' ring)으로 누유를 방지하였다.

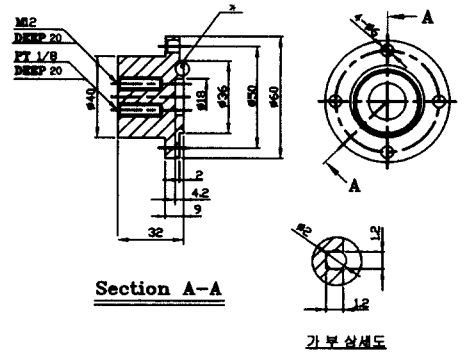


Fig. 3 Schematic diagram of the differential pressure transducer

본 연구에서 사용한 스트레인게이지는 CAS社 제품의 AE-11-S30N-120-EL제품이다. 스트레인게이지는 온도에 아주 민감하기 때문에 24시간동안 큐어링(열처리)하여 접착제(Epoxy610)의 영향을 최소화하여 격막에 붙은 스트레인게이지의 성분과 조화시켰다. 또한 차압계 내부에 유체 유입시 90℃ 이하의 온도변화에서 온도성분을 최대한 억제시켰으며, 스트레인게이지와 유체의 접촉면에는 접착 코팅제인 3140-RTV ADHESIVE(한국다우코닝社)로 도포하였다.

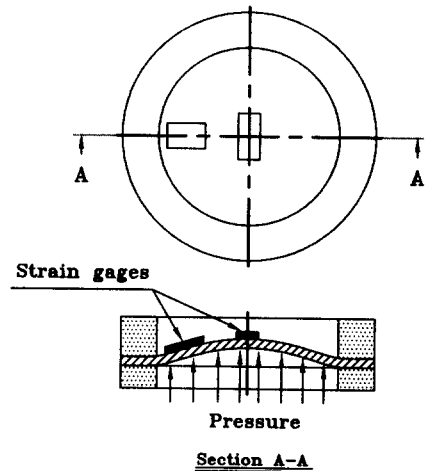


Fig. 4 Location of strain gages on flat diaphragm

Fig. 4는 본 연구에서 스트레인게이지를 직접 격막표면에 부착시키고 측정된 변형을 압력으로

교정하는 방법의 그림이다. 압력이 게이지의 반대면에 작용하면, 중앙에 부착된 게이지는 인장을 받게 되고 반면에 외측의 게이지는 압축을 감지하게 된다. 이 두 게이지는 각각의 출력이 더해지고 동시에 온도보상을 해준다.

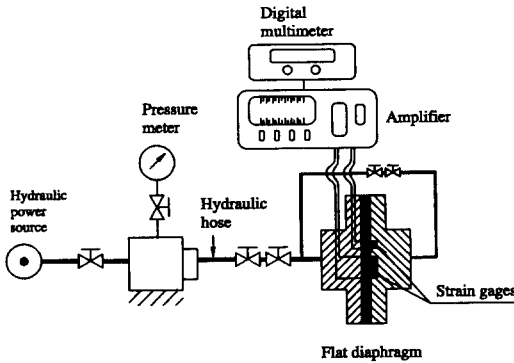


Fig. 5 Experimental strain gages calibration

Fig. 5는 차압-유량간의 정특성을 측정하기 위한 실험장치의 개략도이다. 유압원에서 차압계의 앞부분에는 압력을 일정하게 가했으며, 뒷부분의 차압계는 대기에 방출시켜 스트레인게이지의 캘리브레이션을 수행하였다. 격막에 부착된 스트레인게이지에 압력이 미소하게 작용하면 변형량이 연산증폭기로 전달되어 디지털 전압계에서 전압을 읽어서 압력강하를 획득하였다.

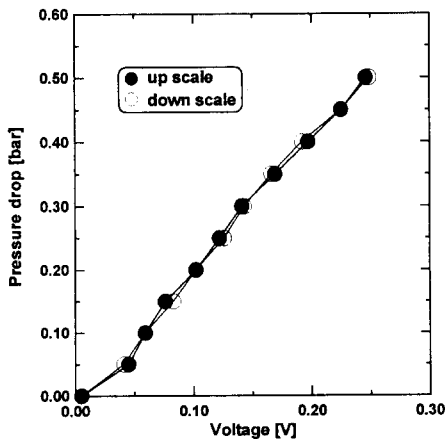


Fig. 6 Relationship between pressure drop and output voltage of strain gage

Fig. 6은 Fig. 5의 실험에서 얻은 차압 및 전압의 관계를 나타내는 그래프이다. 차압 및 전압에는 기울기가 일정하여 히스테리시스가 거의 없는 것을 알 수가 있다. 이 차압계의 이득은 0.467 v/p 이다.

3.2 평행평판 간극내의 유량-압력강하 특성

Fig. 7은 본 연구에서 제안된 평행평판(250×150×1mm) 간극내의 유량-압력강하 특성의 전체적인 개략도이다. 평행평판의 상하부분은 고전압발생장치(DC power supply)에 연결되어 있어 전극판으로 작용한다. ER유체는 실리콘오일에 제올라이트를 첨가한 분산제 ER유체(무게분율 35wt%)를 사용하였다. 이때 사용된 입자의 크기는 유압회로내의 원활한 유동을 고려하여 10 μm 로 제한하였다. 탱크내에 저장된 제올라이트 입자의 침전을 방지하고, 입자분포를 균일하게 하기 위해서 전동식 교반기로 교반하였다.

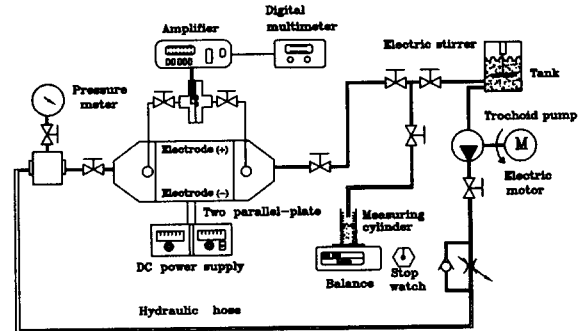


Fig. 7 Experimental apparatus

유량을 공급하기 위해 유압펌프는 ER유체와 같이 유체내의 작은 입자들이 포함되어 있는 특수한 형태의 유체를 이송시키기에 적합한 트로코이드펌프가 사용되었다. 그러나 이 펌프는 ER유체 이송시 제올라이트입자의 마찰에 의해서 온도가 상승하게 된다. 이 온도의 상승은 펌프의 내구성에 문제를 일으킬 뿐 아니라 작동유체인 ER유체의 특성을 변화시키게 한다.

ER유체를 작동유체로 하여 유압시스템에 적용할 경우에 있어서 유압시스템내의 기계요소

상대운동을 할 때 ER유체의 전도성입자로 사용한 입자들에 의해서 마이크로 연삭과 마멸이 발생한다. 또한 마멸입자(wear debris)는 ER유체의 전도특성을 변화시킬 뿐만 아니라, 전극사이의 전압부하를 방해하고, ER유체의 본래의 특성을 변화시키는 특성이 있다.

평행평판의 제작시 가장 중요한 것은 압력이 가해졌을 때 누유(leakage)를 막는 것과 전극부에 고전압이 가한상태로 단락현상없이 전기장이 유지되도록 하는 것이다. 누유를 방지하기 위해서는 실링(sealing)이 중요하고, 전극전체에 일정 전기장이 유지되기 위해선 전극부의 조도가 고와야 한다. 따라서 본 연구에서는 평행평판의 전극부분을 두께 2.0mm의 조도가 뛰어나고, 전기전도도가 좋은 구리를 사용하였다.

모터의 정격회전수는 1000rpm이고 3상 교류 220V가 사용되었으며, 펌프의 최대 유량은 4.5 l/min이다. 평행평판 입·출구쪽에는 차압계가 장착되어 펌프에서 구동된 ER유체가 평행평판에 입력되기전의 압력과 전기장을 가한 후 ER효과에 의해 발생한 압력, 즉 강하된 압력을 측정하였다. 실험조건은 첫째, 압력을 0.2bar로 일정하게하여 유량을 변화시켜 직접 제조한 실리콘오일에 분산계 ER유체의 무게분율 35wt%인 상태로 측정하였다. 둘째, 전기장을 1~5kV/mm 까지 1kV/mm 씩 증가시켜 공급하여 유량을 변화시켜가면서 전기장 크기 변화에 따른 압력변화를 측정하였다.

평행평판내의 관계식을 도출하기 위해 먼저 전기장을 가하지 않은 경우를 살펴보면 압력강하는 전적으로 유체의 점성에 기인하며 평행평판내의 간극사이를 통과하는 유량에 비례한다. 그러므로 전기장 무인가시 간극사이의 압력강하 ΔP_0 는 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta P_0 = \frac{12\eta L Q}{b \delta^3} \dots\dots\dots (2)$$

ER유체에 전기장이 가해지면 ER유체의 항복전단응력 τ_y 는 유체의 유속과 무관하게 일정한 크기까지 압력을 발생시킨다. 따라서 전기장 인가시 ER유체의 전단력증가에 의한 압력강하는

다음식으로 표현된다.

$$\Delta P_{ER} = \frac{2L\tau_y}{\delta} \dots\dots\dots (3)$$

평행평판에 발생하는 전체 압력강하는 점성과 ER유체의 전기장에 따른 전단응력 변화에 의한 압력강하의 합으로 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{ER} + \Delta P_0 \dots\dots\dots (4) \\ &= \frac{2L\tau_y}{\delta} + \frac{12\eta L Q}{b\delta^3} \end{aligned}$$

식(4)에서 전기장을 인가하지 않은 경우에는 전기장에 의한 전단응력 τ_y 값이 없어지므로 전체압력은 전극내의 ER유체의 점성에 의해서만 영향을 받는다. 그러나 전기장을 가했을 경우에는 전체압력 ΔP 가 ΔP_{ER} 을 초과하지 않을 경우에는 유체의 흐름이 나타나지 않다가, 전기장의 크기만큼 발생한 저항력을 초과하는 순간부터 유체의 흐름이 다시 시작되는 것이다.

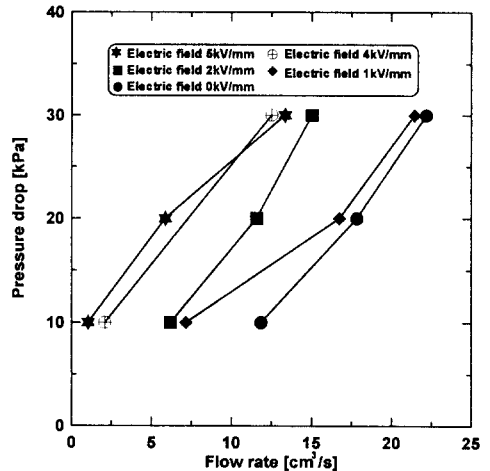


Fig. 8 Pressure drop variation with flow rate

Fig. 8은 유량이 증가함에 따라 발생된 압력강하도 대체적으로 증가함을 나타낸다. 전기장 인가에 따른 압력강하는 전기장 무인가시의 경우와 비슷한 기울기로 변화하였다.

이는 자체 제작한 미소차압계가 압력계이므로서의 정도(精度)가 있다고 실험적으로 검토되었다.

4. 결론

본 연구에서는 분산계 ER유체를 응용한 제어 밸브를 개발하기 위한 전 단계로써, 평행평판 간극내의 ER유체의 유동특성을 실험적으로 검토하였다. 평행평판은 $250 \times 150 \times 1$ (mm)로 설계·제작하였으며, 평행평판의 상하부분은 전극으로 사용되었다. ER밸브로 응용하기 위해서는 평행평판 간극내를 통과하는 유량과 압력강하특성을 파악하였으며, 특히 평행평판을 통과하는 유량에 의해 발생하는 미소한 압력강하를 스트레인게이지를 이용한 미소 차압계를 개발하여 압력강하를 측정하였다. 실험은 정상유동상태에서, 전기장의 유무에 따른 ER유체의 유량과 압력강하 특성을 검토하였다. 향후 본 연구에서는 평행평판내의 압력강하 및 유량특성을 분석한 후 유압제어밸브에 응용할 예정이다.

참고문헌

1. Shinichi Yokota, Yutaka Kondoh, "A Control valve by Making use of an Electro-rheological Fluid", 日本機械學會論文集. 第 62卷 601號 1996年 9月
2. W. M. Winslow, "Induced Fibration of Suspension", J. of Applied Physis, 20, 1137~

1140, 1949

3. Klass, D. L. and Matinek, T. W., 1967, "Electroviscous Fluids II, Electrical Properties," J. Appl. Physics, Vol. 38, No. 1, pp. 75~80.
4. pp.148-157, 1994.4. Kim, K. S., Jung, D. D., Lee, H. J., Choi, S. B. and Cheong, C. C., "Performance Investigation of a Cylindrical Valve Featuring Electro-Rheological Fluids". Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 11, No.4
5. Tetsuhiro Tsukiji, Jun Takahashi, Noboru Sugimoto, Hiroyasu Ikeda., "Flow Characteristics of ERF between Two Parallel-Plate Electrodes", 日本油壓と空氣壓學會志, 第 25卷 4號 1996年 7月
6. Jeon, Y. S., "Performance Investigation of Cylindrical-Type ER Valves with Different Electrode Length", Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers Vol. 11, No.6, pp.1-11, 1998.
7. Kim, S. G., Jung, D. W., Choi, Y. D., "Construction and Evaluation of an Experimental Type Torque Converter by Adapting an Electrorheological Fluid as an Operating Medium" Journal of the Korean Society of mechanical Engineering, 第 18卷 10號, pp.2706-2711, 1994.