

평행평판 간극에서 전기장의 강도변화에 따른 분산계 ER유체의 유량-압력강하 특성

장성철*, 염만오⁺, 김도태⁺⁺
(논문접수일 2002. 7. 18, 심사완료일 2002. 12. 24)

Flow Rate-Pressure Drop Characteristics of Dispersive ER Fluid According to Change
of Electric Field Strength in Clearance between Parallel Plates

Sung-Cheol Jang*, Man-Oh Yum⁺, Do-Tae Kim⁺⁺

Abstract

Electro-rheological(ER) fluids are suspensions in which rheological properties show an abrupt change with variation of electric fields. We modeled the parallel-plates relating to ER-Valve system and yielded shear stress according to the strength of electric field. The purpose of the present study is to examine the flow characteristics of ER fluids according to the strength of electric field between parallel-plates. Then the steady relationship between pressure drop and flow rate of the ER fluids between parallel-plates under application of an electric fields was measured. The pressure drop and flow rates of ER fluids under the application of electric fields for steady flow were measured. For the experiment, we used the ER fluids, 35w% zeolite having hydrous particles and differential pressure gauge. This test reviewed experiment for the special changes of ER fluids in the steady flow condition.

Key Words : Electro-Rheological(ER) Fluid(전기점성유체), Parallel-Plates(평행평판), Electric Field(전기장), Pressure Drop(압력강하), Flow Rate(유량), Flow Characteristics(유동특성)

1. 서론

전기점성유체(electro-rheological fluid: ER유체)는 인가

되는 전기장의 강도에 비례하여 현탁액의 유변학적 특성이 변화하는 기능성 유체이다⁽¹⁾. ER유체는 전기 전도성의 고체 미립자, 전기 절연성의 오일 그리고 ER 효과를 증대시키기 위한

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

첨가제 등으로 구성된다. ER유체는 입자분산계와 균일계로 대별할 수 있다. 입자분산계 ER유체는 전기장의 강도에 따라 분극된 입자가 전극방향으로 사슬구조(cluster)를 형성하여 겔보기 점성(apparent viscosity)을 증가시키며, 뉴턴유체(Newtonian fluid)에서 빙햄유체(Bingham fluid)의 유동특성으로 변한다. 균일계 ER유체는 전기장을 인가하면 유체의 점도가 변화하는 특성을 가지고 있다. ER유체는 전기장의 강도만을 변화시켜 연속적인 제어가 가능하며, 이러한 특징을 이용한 응용장치는 설계가 단순화되는 장점이 있다.

특히 유공압 시스템에서 ER유체를 응용하면 전기 신호만으로 ER유체의 유동을 제어할 수 있기 때문에 가동부가 없는 단순한 구조로 고속 응답성과 고기능을 가진 ER밸브와 같은 유공압 제어기기를 개발할 수 있다. ER밸브에 대한 연구는 유공압시스템에 적합한 응용장치로 인식되어, 응용사례가 다수 발표되고 있다.

Simmonds⁽²⁾는 평판형의 ER밸브를 제안하여 전기장에 따른 압력강하를 고찰하였다. Brooks⁽³⁾는 ER밸브를 이용한 유압회로를 구성하여 성능시험을 수행하였으며, Yokota와 Kondoh⁽⁴⁾는 2포트 ER밸브를 개발하여 유량, 밸브의 입·출구에서 생기는 압력강하, 전기장 강도에 따른 정특성을 실험적으로 연구하였다. 그러나 ER밸브에 적용하기 위해서는 평행평판 간극 속을 통과하는 유량과 압력강하 특성을 파악하는 것이 중요하다. 특히 평행평판을 통과하는 유량에 의해 발생하는 미소한 압력강하를 계측하는 것이 중요한 기술적 과제이다.

본 연구에서는 분산계 ER유체를 응용한 ER밸브를 개발하기 위한 전 단계로서, 평행평판 간극에서 전기장의 강도 변화에 따른 분산계 ER유체의 유량 및 압력강하 특성을 실험적으로 검토하였다. 평행평판의 입·출구에서 발생하는 미소한 압력강하는 스트레인지지를 이용한 미소 차압계를 개발하여 계측하였다. 실험은 정상유동상태에서, 전기장의 유·무에 따른 ER유체의 유량과 압력강하를 측정하여 검토하였다.

2. ER유체의 성질

2.1 ER유체의 빙햄거동

뉴턴유체는 전단속도비 증가에 따라 전단응력도 증가한다. 이때 비례상수가 유체의 점도이다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서 τ 는 전단응력, μ 는 절연유의 점도를 나타내며, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비이다. 분산계 ER유체와 같은 빙햄유체는 전단응력-전단속도비 특성에서 어떤 특정한 항복전단응력(yield shear stress)을 가지며, 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \tau_y(E) + \mu \dot{\gamma} \quad (2)$$

식 (2)에서, $\tau_y(E)$ 는 ER유체의 항복전단응력이며, 전기장 강도(E)와 더불어 증가한다. 식 (2)를 전기장 함수로 표현하면 다음과 같다⁽⁵⁾.

$$\tau = \alpha E^\beta + \mu \dot{\gamma} \quad (3)$$

여기서 α , β 는 분산입자의 무게분율, 절연유 자체의 점도 등에 영향을 받는 상수이다. 식 (3)에서 전기장의 증가와 외부에서 가해지는 전단속도비의 증가에 따른 ER유체의 전단응력 및 항복전단응력의 증가를 예상할 수가 있다.

먼저 평행평판의 유동특성 실험에 앞서 회전식 점도계를 사용하여 ER 유체의 항복전단응력을 측정하여 시스템에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 1은 회전식 점도계로 측정된 제올라이트 입자가 실리콘 오일(20cSt)에 분산된 ER유체의 전단응력과 전단속도비 관계를 실험한 결과이다. 그림에서 보듯이 전기장 강도가 증가함에 따라 항복전단응력도 증가함을 알 수 있다. 그러나 전기장 강도가 0.5~2.0 kV/mm인 경우, 전단속도비가 20[s^{-1}] 까지 증가해도 전단응력은 감소하나, 그 이상에서는 일정한 기울기를 가지고 전단응력이 증가함을 알 수 있다. 식 (3)에서, ER유체의 항복전단응력은 ER 유체가 변형을 일으키기 시작하는 순간의 전단응력이며, 매우 짧은 시간에 비정상적으로 발생하고, 불규칙적으로 거동하기 때문에 정확하게 계측하는 것은 어렵다. 특히 항복전후의 초기거동은 현재까지 이론해석이 미흡한 상태이다. Hartnett⁽⁶⁾와 Bonnacaze⁽⁷⁾등에 의해 물리적으로 검증된 이후 정확한 측정방법 및 이론적 예측에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서 전단응력과 전단속도비 실험결과를 곡선적합(curve fitting)하여 전단속도비가 영(zero)일 때의 전단응력으로 항복전단응력 값을 정하였다.

Fig. 2는 항복전단응력과 전기장 강도의 실험결과이다.

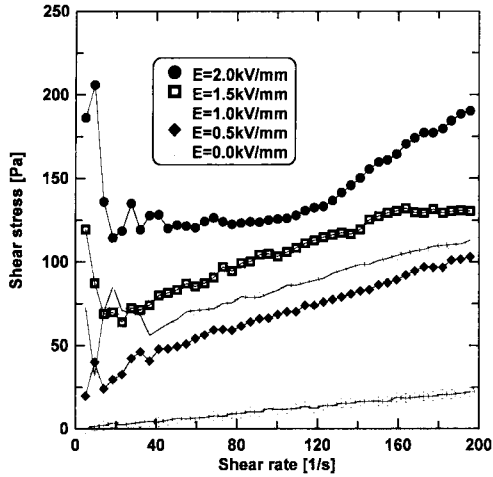


Fig. 1 Relationship between shear stress and shear rate of ER fluids

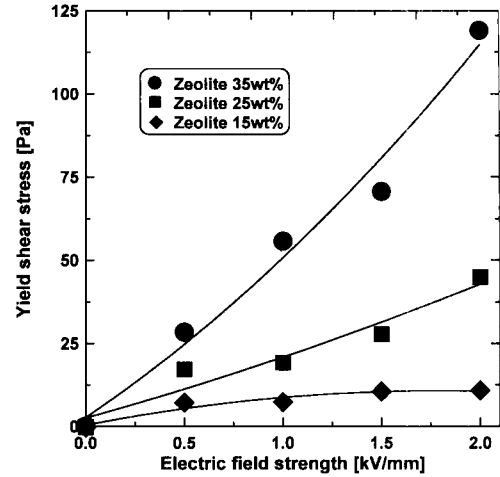


Fig. 2 Bingham characteristics of ER fluids

항복전단응력은 전기장 강도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 실험에서 고찰한 바와 같이 항복전단응력에 영향을 미치는 인자는 전기장 강도와 분산된 제올라이트의 무게분율이 중요하다는 것을 알 수가 있다. 제올라이트의 무게분율이 경우, 식 (3)에서 항복전단응력은 20.11E1.62와 56.02E1.29로 나타낼 수 있다.

실험결과에서 보듯이 같은 실리콘 오일에서도 제올라이트의 무게분율이 클수록 큰 전단응력을 가진다. 본 연구에서는 항복전단응력이 가장 큰 무게분율이 35w%인 ER유체를 평행평판 간극 속을 흐르는 작동유체로 사용하였다.

2.2 평행평판사이에서 ER유체의 유동

Fig. 3은 평행평판의 개략적인 형상을 모델링한 것이다. 평행평판은 250×150×1(mm)로 설계·제작하였다. 상부 평판에는 고전압발생장치의 (+)전원, 하부 평판은 (-)전원에 연결되어, 전극으로 사용한다. ER유체는 실리콘 오일에 제올라이트 입자를 첨가한 분산계 ER유체(무게분율 35w%)를 제조하여 사용하였다. ER유체가 (+), (-) 전극 사이로 유입될 때 전기장을 인가하면 ER효과를 얻을 수 있다.

평행평판 유로내의 유량-압력강하 관계식을 유도하기 위해 전기장을 인가하지 않은 경우를 살펴보면, 압력강하는 ER유체의 점성에 기인하며 평행평판 간극 사이를 통과하는 유량에 비례한다. 그러므로 전기장을 인가하지 않았을 때, 유량과 압력강하 ΔP_μ 는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta P_\mu = \frac{12\mu LQ}{b h^3} \quad (4)$$

여기서 b 는 전극 폭이고, h 는 전극 간극, L 은 전극 길이, μ 는 ER유체의 점성, Q 는 통과유량을 나타낸다.

ER유체에 전기장이 인가하면 ER유체의 항복전단응력 $\tau_y(E)$ 로 인해 압력강하가 커진다. 따라서 평행평판에서 발생하는 전체 압력강하는 ER유체의 점성과 ER유체의 전기장에 따른 항복전단응력 변화에 의한 압력강하의 항으로 다음과 같이 나타낼 수 있다⁽⁸⁾.

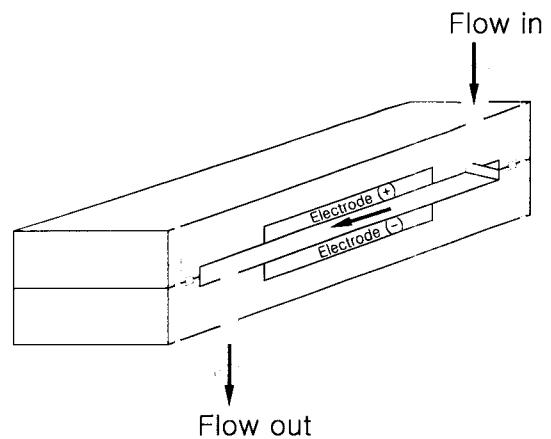


Fig. 3 Geometry of parallel plate

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_{ER} + \Delta P_{\mu} \\ &= \frac{2L\tau_y}{h} + \frac{12\mu LQ}{bh^3} \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서, 전기장을 인가하지 않을 경우, 항복전단응력 $\tau_y(E)$ 값이 없어지므로 전체 압력강하는 평행평판 간극내의 ER유체의 점성에 의해서만 영향을 받는다. 전기장을 인가한 경우 전체 압력강하 ΔP 가 ΔP_{ER} 보다 적을 경우 유체의 유동은 발생되지 않는다. 그러나 전기장의 크기보다 전체압력강하 ΔP 가 클러스터의 저항력보다 클 경우, 유체의 유동은 다시 발생하게 된다.

3. 실험장치 및 방법

Fig. 4는 본 연구에서 제안한 평행평판의 유동특성 실험장치이다. 펌프에서 송출된 ER유체는 평행평판 간극 내부로 유입되고, 전기장 강도를 변화시켜 ER효과를 발생하게 하였다. ER입자는 회로 내의 원활한 유동을 고려하여 10 μm 정도의 제올라이트 입자를 사용하였다. 탱크내에 저장된 제올라이트 입자의 침전을 방지하고, 입자분포를 균일하게 하기 위해서 전동식 교반기로 교반하였다. 유량 공급용 펌프는 ER유체와 같이 유체내의 작은 입자들이 포함되어 있는 특수한 형태의 유체를 이송시키기에 적합한 트로코이드 펌프를 사용하였고, 최대 유량은 4.5 l/min이다. 모터의 정격 회전수는 1000 rpm이고 3상 교류 220 V를 사용하였다. 평행평판의 입·출구에는 차압계가 설치되어 펌프에서

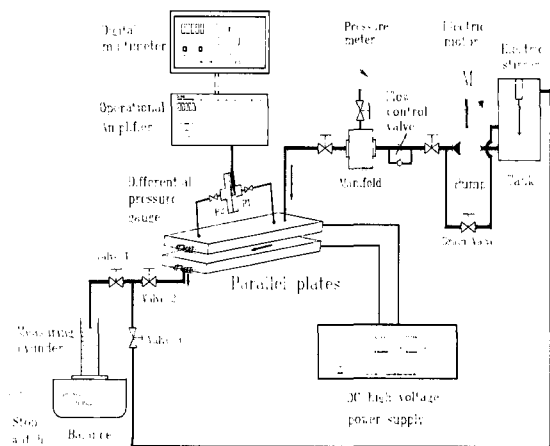


Fig. 4 Experimental apparatus

송출된 ER유체가 평행평판에 유입되어 전기장을 인가하기전의 압력강하와 전기장을 인가한 후 ER효과에 의해 발생한 압력강하를 측정하였다. 평행평판에 공급압력은 입구 매니폴드(manifold)에 장착된 압력계로 측정하였다. 공급압력은 트로코이드 펌프 송출측의 유량제어밸브(flow control valve), 바이패스 밸브(by pass valve), 고측밸브 1, 2 그리고 3을 조절하여 일정한 압력으로 유지하였다. 실험에서는 유량을 변화시켜 전기장 강도에 따른 압력강하를 측정하였다. 유량은 단위 시간당 발생된 ER유체의 중량유량을 측정하였으며, 실리콘오일의 점성 및 제올라이트 입자의 무게분율을 고려하여 체적유량으로 환산하였다. 전기장의 강도는 0~5 kV/mm까지 1 kV/mm 씩 증가시켰다. 평행평판의 (+), (-) 전극에 전기장이 인가되면 압력강하가 증가하게 된다. 평행평판 상부판의 입·출구에 압력 측정공을 뚫어 차압계로 연결하여 압력강하를 측정하였다. 평행평판 내부로 ER유체가 유입되면 입·출구의 압력차 때문에 차압계 내부의 스트레인게이지가 변형하게 된다. 이 변형량을 디지털 멀티미터로 전압을 읽어 압력강하를 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 평행평판에서 발생하는 ER유체의 유량과 압력강하에 대한 실험결과이다. 전기장 강도는 0~5kV/mm 까지 1kV/mm씩 증가시켰다. 실험결과에서 보듯이 전기장 강도가 증가할수록 유량은 감소하지만 압력강하는 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 평행평판의 유동특성에서 언급한 것과 같이, 전기장을 인가하지 않을 경우 압력강하는 ER유체의 점성에 의해서만 영향을 받는다. 전기장을 인가하게 되면 (+), (-)전극 사이에 흐르는 ER입자는 순간적으로 사슬구조(cluster)가 형성된다. 이러한 클러스터가 실리콘 오일의 유동저항이 되어 유량은 감소하고 압력강하가 증가하는 것이다. Fig. 5에서 전기장을 인가하지 않을 경우, 기호(★)는 평행평판 간극 사이를 통과하는 ER유체가 점성에 의해서만 영향을 받기 때문이다. 전기장을 인가할 경우, 기호(○~◆)는 평행평판의 (+), (-)전극에서 클러스터가 형성되어 유동저항이 발생하기 때문이다. 전기장의 강도가 증가할수록 유동저항이 많아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 평행평판에 인가한 전기장 강도에 따른 전류의 변화를 나타낸 것이다. 전기장 강도가 증가함에 따라 전류가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 전기장의 강도가 대단히 큰 경우에도 흐르는 전류는 매우 작아 이에 따른 소비전력이 낮은것을 알 수 있다. 또한 주파수 60 Hz의 전기에서

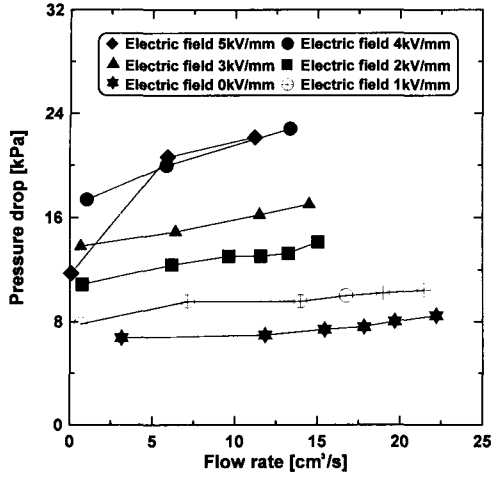


Fig. 5 Pressure drop variation with flow rate

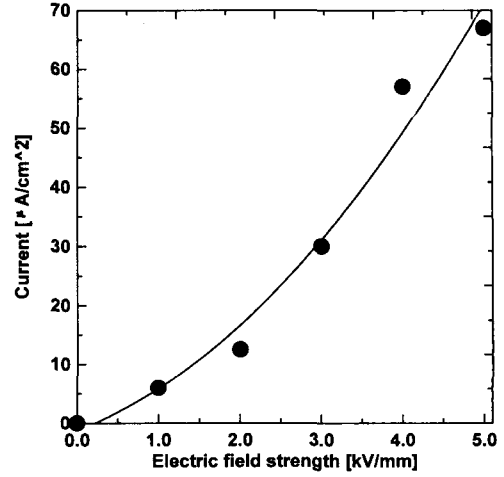


Fig. 6 Current versus electric field strength

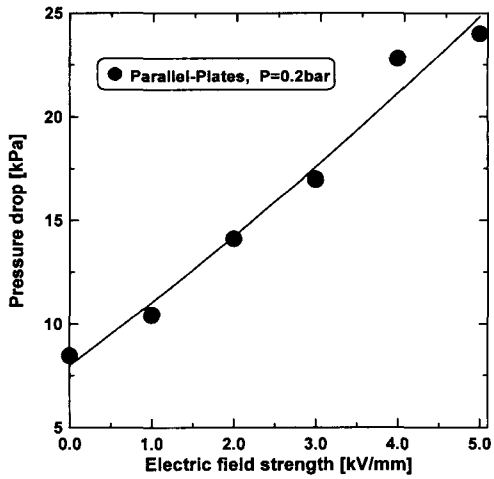


Fig. 7 Pressure drop versus electric field strength

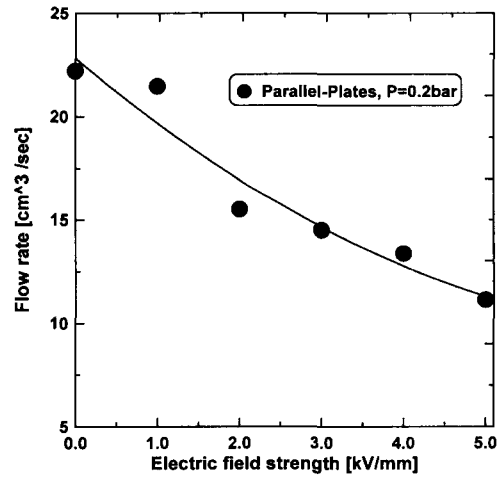


Fig. 8 Flow rate versus electric field strength

1.2~1.8 mA 정도에서 인체에 고통을 주는 충격을 주지만, 그림에서 보듯이 최대전압 5 kV/mm에서 전류는 67 μ A 정도 밖에 흐르지 않으므로 인체에 아무런 해를 입히지 않고 안전할 것이라 생각된다.

Fig. 7은 전기장 강도와 압력강하의 관계를 나타낸 것이다. 전기장 강도에 따라서 압력강하가 선형적으로 비례하는 형태를 보인다. 이러한 특성을 이용하여, 전기장 강도와 압력강하 관계로부터 대상 시스템의 요구압력을 전기장의 강도에 따라서 임의적으로 발생시킬 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 전기장 강도에 따른 유량 특성을 나타낸 것이다. 전기장 강도가 증가할수록 유량은 감소하는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 분산계 ER유체를 응용한 제어밸브를 개발하기 위한 전 단계로써, 평행평판 간극에서 전기장의 강도변화에 따른 분산계 ER유체의 유량 및 압력강하 특성을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전기장 강도가 크고, 제올라이트 입자의 무게분율이 35w %인 경우가 항복전단응력이 높게 나타났다.
- (2) 평행평판의 유량 및 압력강하 특성에서 전기장의 강도가 클수록 큰 압력강하가 발생하였으며, 유량은 감소되었다.
- (3) 평행평판에 고전압의 전기장을 인가하여도 흐르는 전류는 매우 낮아 소비전력이 낮은 것을 알 수 있었다.

기 호 설 명

τ : shear stress [N/m^2]

τ_y : yield shear stress [N/m^2]

ΔP : pressure drop [Pa]

Q : flow rate [m^3/s]

후 기

본 연구는 2002학년도 경남대학교 학술논문게재 연구비 지원으로 이루어 졌음.

참 고 문 헌

(1) W.M. Winslow, "Induced Fibration of Suspension", J. of Applied Physis, Vol. 20, pp. 1137~1140, 1949.

(2) A.J. Simmonds, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", IEEE Proceeding-D, Vol. 138, No. 4, pp. 400~404, 1991.

(3) D.A. Brooks, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", Journal of Modern Physics, Vol. 6, pp. 2705~2730, 1992.

(4) S. Yokota and Y. Kondoh, "A Control Valve by Making Use of an ER Fluid", 日本機械學會論文集, Vol. 62, No. 601, pp. 3471~3478, 1996.

(5) J.P. Coulter and T.G. Duclos, "Applications of Electrorheological Materials in Vibration Control", J. of Rheology, pp. 300~325, 1989.

(6) J.P. Hartnett and R.Y.Z. Hu, "The Yield Stress An Engineering Reality", J. of Rheology. Vol. 33, pp. 671~679, 1989.

(7) R.T. Bonnecaze and J.F. Brady, "Yield stress in ER Fluids", J. of Rheology, Vol. 36, pp. 73~115, 1992.

(8) Z. Lou, R.D. Ervin and F.E. Filisko, "Behaviors of Electrorheological Valves and Bridges", Proceedings of the International Conference, Vol. 15-16, pp. 398~423, 1991.

(9) 김도태, 장성철, "평행평판 간극내의 유량-압력강하 특성", 한국공작기계학회 추계학술대회논문집, pp. 399~404, 1999.