

유압제어시스템 적용을 위한 ER 밸브의 내구성 평가

김도태*, 장성철⁺

(논문접수일 2007. 1. 8, 심사완료일 2007. 2. 12)

Durability Evaluation of ER Fluids in Hydraulic Control Systems

Do-Tae Kim*, Sung-Cheol Jang⁺

Abstract

Electro-rheological(ER) fluid and valve are fabricated and evaluated experimentally in its durability to utilize the hydraulic control systems for long term operation. The two-ports ER valve used in the experiment consist of twelve parallel multi-layer electrodes and provide a restriction to the passage of ER fluid because of the viscous pressure drop and a component induced by the electric field. The durability test of ER valve are performed by measuring the surface roughness of electrodes with variation of an electric field strength and test time(1000 or 1800min.). Also, the shear stress and shear rate are measured to evaluate the durability of ER fluid as function of time. After durability test, ER shear stress increases approximately proportional to the shear rate with applied electric field intensity. In the ER valve, the center line average height roughness(Ra) of copper electrode increases about 1.56 times and ten-point median height roughness(Rz) increases about 2.2 times after the durability test. An understanding of these durability is essential to predicting the service life of ER fluid and valves.

Key Words : Electro-Rheological fluid(ER 유체), ER Valve(ER 밸브), Electric Field(전기장), Durability Test(내구성 시험), Center Line Average Height Roughness(중심선 평균 거칠기), Chemical Change(화학적 변화), Gelatinization(젤라틴화)

1. 서론

ER유체(electro-rheological fluid)는 비전도성 기름에 전도성 입자(ER입자)를 분산시킨 현탁액이며, 전기장 강도에 따라 현탁액의 유변학적 특성이 변하는 기능성 유체이다. ER유체에

전기장을 인가하지 않으면 뉴턴유체(Newtonian fluid)의 특성을 가지지만, 전기장을 인가하면 초기 항복전단응력을 가지는 빙햄유체(Bingham fluid) 특성으로 변한다. ER유체의 이러한 특성을 응용하면, 부품이나 시스템 설계가 단순화 되고, 경우에 따라서는 진동과 소음의 저감, 빠른 응답성, 제어의

* 경일대학교 기계자동차학부 (dtkim@kiu.ac.kr)
주소: 712-701 경북 경산시 하양읍 부호리 33번지
⁺ 삼원기술(주) 기술연구소

용이성 및 전류 소모량이 작은 장점이 있기 때문에 유압제어 시스템, 자동차 부품, 구조물 등에 활용하고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

실제 시스템에 ER유체를 활용할 경우, ER입자의 영향, ER유체의 점도 변화와 전극 마멸(wear) 등과 관련된 내구성 평가 관련 연구가 필요하다. 또한 유압제어 시스템에 ER유체를 사용하면 ER유체의 전도성 입자에 의해 전극 표면과 유압부품 등은 마이크로 연삭과 마멸이 발생할 수 있으며, 마멸된 ER입자는 ER유체의 유변학적 특성을 변화시킬 뿐만 아니라 ER밸브의 양극(+)과 음극(-) 사이에서 전기장 형성을 방해하고, ER유체 자체의 특성을 변화시킬 수도 있다.

Lingard⁽⁵⁾와 Choi 등⁽⁶⁾은 실린더 형태의 핀·디스크 장치를 제작하여 ER유체의 마멸 및 조성변화에 관한 기초 연구를 수행하였다. 그러나 ER유체를 유압제어 시스템에 적용하여 전기장 강도에 따른 점도와 항복응력의 변화, 전극 표면 거칠기 변화에 관한 연구는 아직까지 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 ER유체를 유압제어 시스템에 적용하여 오랜 시간 사용할 경우를 고려하여, ER유체와 ER밸브를 자체 제작하여 ER입자의 모양과 크기 변형에 따른 전기 전도성의 변화, ER밸브 전극의 표면 거칠기 변화 및 마멸 등과 관련된 내구성 평가방안을 제안한다.

2. ER 밸브의 제작 및 특성

Fig. 1과 Fig. 2는 ER유체를 유압제어 시스템에 적용하기 위해, 자체 제작한 ER밸브의 전체적인 형상과 내부 구조를 나타낸 것이다. ER밸브는 전극판 수를 12개로 하여 총 11개의 유로가 형성되도록 제작하였으며, 전극판의 간극은 1.5mm이다. 내부 전극판의 재질은 전기 전도성이 좋은 구리로 하였으며, 플라스틱 덮개를 상·하면에 부착하여, 플라스틱 볼

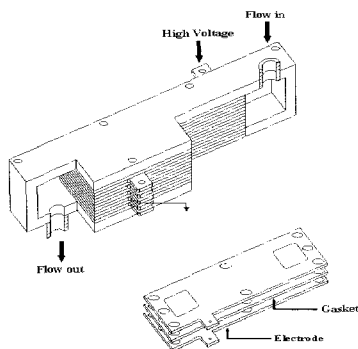


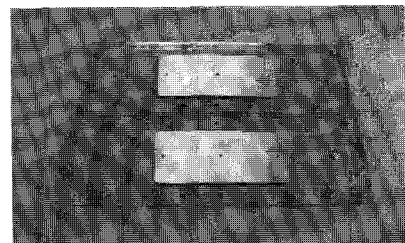
Fig. 1 Schematic diagram of ER Valve

트로 압착시켰다. 플라스틱 볼트의 재질은 에폭시이며 지름은 6mm이다. 밸브에서 ER유체의 누설을 방지하기 위해 전극판 사이에는 실리콘 고무로 밀봉하였다. 각각의 전극판은 고전압 발생장치와 연결하여 양극(+)과 음극(-)으로 작용한다. (+), (-) 전극판 간극 사이에 ER유체가 흐르고, 전극판에 전기장을 인가하여 ER효과를 발생시켰다.

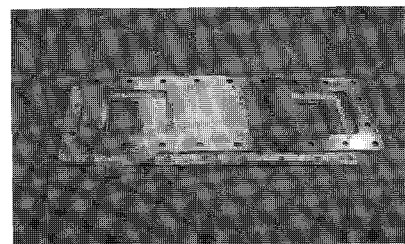
Fig. 1의 ER밸브에서 전기장을 인가하지 않으면 ER유체는 뉴턴유체와 같이 거동하지만, 전기장을 인가하면 ER유체의 입자들이 클러스터(cluster)를 형성하여 초기 항복전단 응력이 발생하는 빙햄유체 특성을 보인다. 따라서 ER밸브를 통과할 때 발생하는 압력강하 ΔP 는 전기장을 인가하지 않았을 때의 압력강하 ΔP_{μ} 와 전기장을 인가하였을 때의 압력강하 ΔP_{ER} 의 합으로 표시되며, 식 (1)과 같다.

$$\Delta P = \Delta P_{\mu} + \Delta P_{ER} = \frac{12\mu LQ}{bh^3} + \frac{2L\tau_y(E)}{h} \quad (1)$$

식에서, b 는 전극 폭, h 는 전극판 간극, L 은 전극 길이, Q 는 전극판 사이의 간극을 통과하는 유량, μ 는 점도, $\tau_y(E)$ 는 ER유체의 항복전단응력이다.



(a) Cover of Plate type ER-Valve



(b) Electrode and Gasket

Fig. 2 Photograph of ER Valve

3. 내구성 실험장치 및 방법

3.1 ER밸브 내구성 실험장치

ER유체를 유압제어 시스템과 같은 실제 시스템에 응용하기 위해서는 점도특성과 전극마멸 등의 내구성에 대한 평가가 필요하다. ER유체를 오랜 시간 사용할 경우, ER입자가 ER밸브의 전극을 마멸시키는 문제를 일으킬 수 있다. 전극의 내구성 실험은 ER밸브에서 전극판을 분리하여 마멸이 가장 심한 부분을 선택하여, 표면거칠기를 조사하였다. 전극 표면의 거칠기는 광학현미경(Conoscopic Hologram Microscope, CHM-250)을 사용하여 중심선 평균 거칠기(R_a)와 십점 평균 거칠기(R_z)를 측정하였다. 또한 실제 응용장치에서 마멸 등으로 ER입자들의 모양과 크기도 변할 것이며, 절연유의 오염으로 점도와 ER입자의 극성도 변할 것으로 생각된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 본 연구에서 제안한 ER밸브의 내구성 실험장치를 나타낸 것이다. 펌프에서 송출된 ER유체는 ER밸브 간극 틈새 내부로 유입되고, ER밸브에 인가된 전기장은 ER효과를 발생시키며, 전기장의 강도를 변화시켜가면서 실험하였다. ER유체에 사용한 기름은 실리콘유(50cSt), ER

입자는 전분입자를 사용하였다. 실험에서는 실리콘유와 전분입자의 무게분율이 35wt%인 분산계 ER유체를 직접 조성하여 사용하였다. ER유체에 혼합된 전분입자의 침전을 방지하고, 입자분포가 균일하도록 탱크 안에 전동식 교반기를 장착하여 ER유체를 교반하였다. 유량 공급용 펌프는 트로코이드 펌프를 사용하였고, 최대 공급유량은 4.5 l/min이다. 펌프 구동용 전동기의 정격 회전수는 1000rpm이고 3상 교류 전압 220V로 구동하였다. ER밸브에 공급압력은 압력계로 측정하였다.

공급압력(0.5bar)은 펌프 송출측의 유량조정밸브, 바이패스 밸브와 3개의 교축밸브를 조절하여 일정한 압력으로 유지한 후 ER유체와 전극 마멸 등의 내구성 실험을 수행하였다.

3.2 ER유체 내구성 실험장치(점도측정장치)

Fig. 5와 Fig. 6은 ER유체의 빙헴특성을 조사하기 위해 사용한 회전식 점도계(Haake사, VT-500)의 개략도이다. 이것은 같은 중심축 위에 있는 고정된 외부 원통(cup)과 회전하는 내부 원통(bob), 내부원통 구동부, 온도제어가 가능한

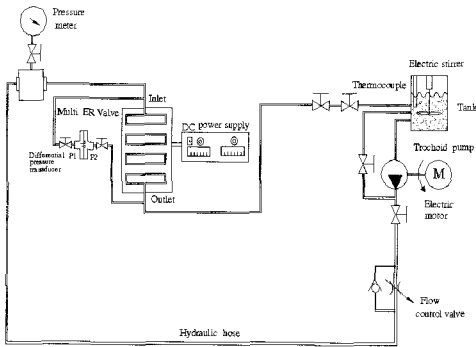


Fig. 3 Experimental Set-up of ER Valve

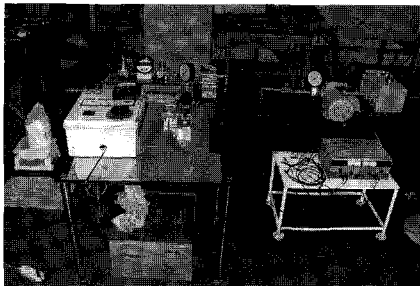


Fig. 4 Photograph of Experimental Set-up

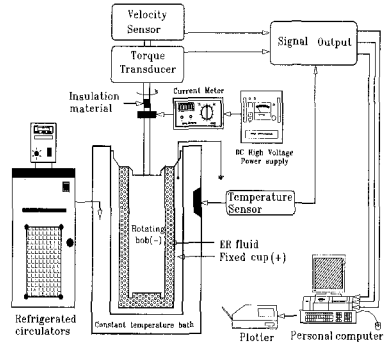


Fig. 5 Schematic of Viscometer

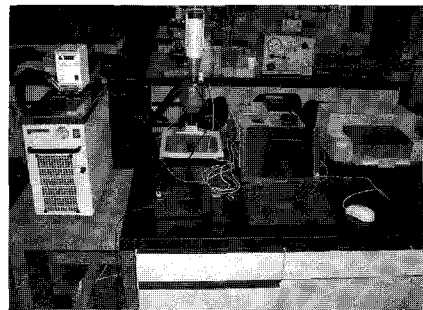


Fig. 6 Photograph of Viscometer

항온조, 토크와 회전수 계측신호 처리부로 구성되어 있다.

점도 측정원리는 점도계의 내부와 외부 원통 사이의 간극에 ER유체를 주입하고, 전단속도비를 변화시켜 내부원통을 회전시키는데 필요한 토크를 계속하여 점도를 측정한다. 또한 내부원통과 외부원통을 전극으로 사용하여 전기장 강도에 따른 ER효과의 영향도 측정할 수 있다. 점도계는 PC와 연결하여, 전단속도비 변화에 따른 ER유체의 점도와 전단응력을 측정하여 데이터를 처리할 수 있도록 구성되어 있다.

ER유체에 인가한 전기장은 $E=0.0\sim 2.0\text{kV/mm}$ 범위에서 0.5kV/mm 씩 단계적으로 변화시켰으며, 전단속도비는 2분 동안에 $0.0\sim 200\text{ [s}^{-1}\text{]}$ 까지 증가하도록 실험조건을 설정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 7은 ER유체의 내구성 실험을 하기 이전의 초기상태이며, Fig. 8은 ER유체에 전기장 강도를 $E=0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0\text{kV/mm}$ 로 각각 인가한 상태에서 1000분 후의 상태, Fig. 9는 Fig. 8과 같은 조건에서 1800분 후의 전단속도비 변화에 대한 전단응력을 측정된 결과이다. Fig. 7 ~ Fig. 9에서, 전기장을 인가하지 않으면($E=0\text{kV/mm}$), ER유체는 뉴톤유체와 같이 거동함을 볼 수 있다. 또 Fig. 7의 초기상태와 비교해 볼 때, Fig. 8과 Fig. 9의 결과는 전기장의 강도에 따라 초기 항복전단응력도 거의 일정하게 증가하는 경향을 나타낸다. 이것은 트로코이드 펌프의 구동기어와 피동기어가 서로 맞물려 회전하면서 전분입자들이 분쇄되어 입자 크기가 미세하게 되며, 또한 전분입자가 펌프 내부에서 분쇄되는 과정에서 입자 표면이 거친 타원형에서 지름이 거의 일정한 원형으로 변하기 때문에 전기장을 인가하였을 때 (+)와 (-) 전극 사이에서 클러스터의 결합력이 일정해지기 때문이다. 또한 실험결과에서 나타나는 약간의 불균일성은 실험장치에서 ER입자가 침전되거나, ER유체가 일정한 무게분율의 조성비를 유지하지 못하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

Fig. 10은 ER벨브 전극 표면의 내구성 실험을 수행하기 이전의 초기상태, Fig. 11과 Fig. 12는 1000분과 1800분 동안 ER유체를 유동시킨 후의 표면 거칠기 측정 결과이다. Fig. 10에서 중심선 평균 거칠기가 $0.86\mu\text{m}$, 십점 평균 거칠기는 $5.98\mu\text{m}$ 이며, Fig. 12에서 중심선 평균 거칠기가 $1.35\mu\text{m}$, 십점 평균 거칠기는 $13.15\mu\text{m}$ 이다. 내구성 실험을 수행한 후의 중심선 평균 거칠기가 이전의 중심선 평균 거칠기보다 1.56배 정도, 십점 평균 거칠기는 2.2배정도 증가한 것을 알

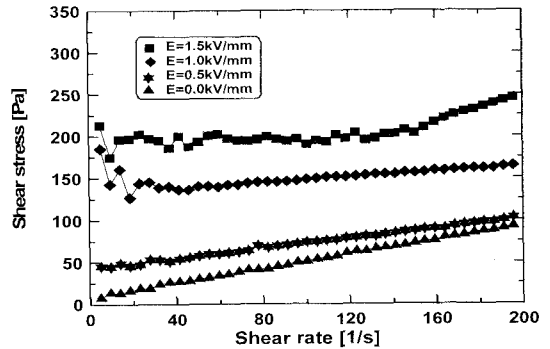


Fig. 7 Measured shear stress of ER fluid at initial state condition

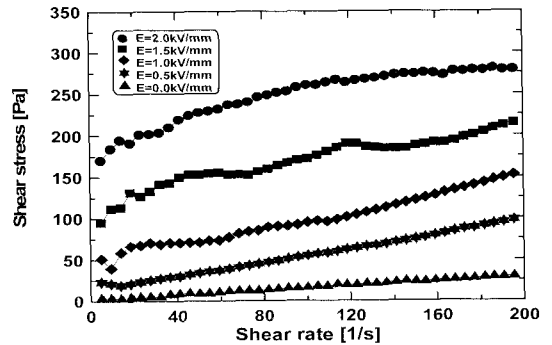


Fig. 8 Measured shear stress of ER fluid after 1000 minutes

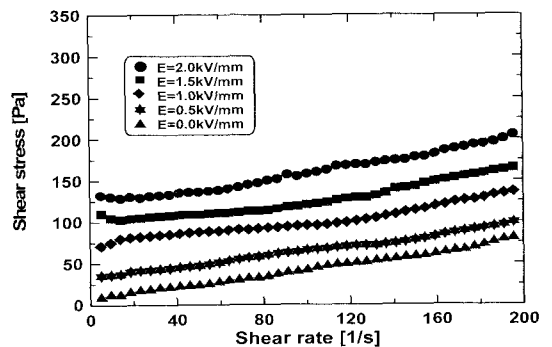
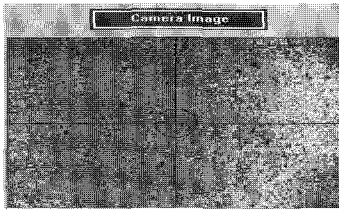
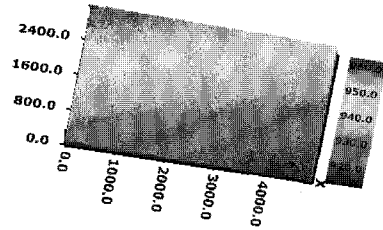


Fig. 9 Measured shear stress of ER fluid after 1800 minutes

수 있다. 이것은 전기 전도성이 아주 양호하고, 내식성과 경도가 낮은 구리를 전극으로 사용한 경우에는 아크 발생에 따른 부식의 영향으로 생각된다. 또한 ER유체가 펌프에서

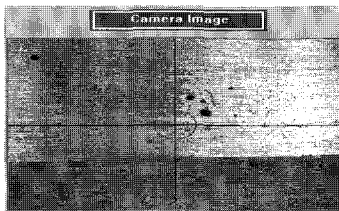


(a) Electrode

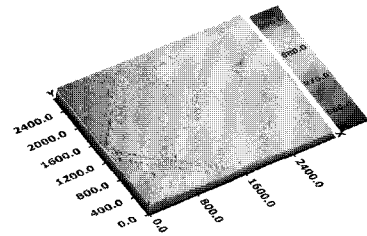


(b) Roughness

Fig. 10 Electrode surface of ER-Valve at initial state

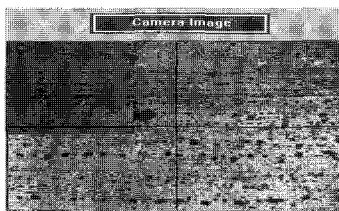


(a) Electrode

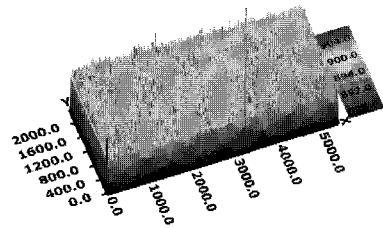


(b) Roughness

Fig. 11 Electrode surface of ER-Valve after 1000 minutes



(a) Electrode



(b) Roughness

Fig. 12 Electrode surface of ER-Valve after 1800 minutes

가압될 때 온도상승이 일어나며, 이러한 온도상승은 전분입자의 젤라틴화를 촉진하여 구리 전극의 화학적 변화를 초래하기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다. 그러나 Fig. 11은 Fig. 10보다 전극 표면의 거칠기가 감소한 것을 볼 수 있다. 이것은 ER유체 내부에 분포되어 있는 기포와 구리 전극이 반응하여 전극 표면에 산화막이 형성되기 때문이다. 또한 펌프에서 이송된 전분입자들이 전극 표면에 달라붙어 시간이 증가할수록 표면 거칠기가 고르게 분포될 것이다. Fig. 12와 Fig. 10 (a)의 초기상태를 비교해 보면, 구리 전극 표면에 검게 그을린 부분이 나타나는 것을 볼 수 있다. 이것은 ER유체의 전분 입자가 전극표면에 달라붙어 전극 표면에서의 전기

장 밀도를 변화시키고, 이러한 전기장 밀도의 변화에 따라 전기 전도성이 높은 구리 표면에서 방전이 일어나기 때문이다.

5. 결론

본 연구에서는 ER유체를 유압제어 시스템에 적용하여 오랜 시간 사용하였을 때를 고려하여, ER입자의 모양 및 크기 변형에 따른 전기 전도성의 변화, ER밸브 전극의 표면 거칠기 변화 및 마멸 등의 문제를 규명하기 위해, ER유체와 ER밸브를 직접 제작하여 내구성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 전기장의 강도가 증가함에 따라 전단응력이 일 정하게 증가하는 것은 펌프에서 전분 입자들이 매우 작게 분쇄되거나, 전분 입자의 모양이 타원형에서 원형으로 변하여 클러스터의 결합력이 일정해지기 때문이다.
- (2) ER유체의 내구성 실험을 수행한 후 전단응력이 감소하는 것은 ER유체가 침전되거나, ER유체가 일정한 무게분율을 유지하지 못하기 때문에 나타나는 현상이다.
- (3) 전기 전도성이 높고 내식성과 경도가 낮은 구리를 전극으로 사용할 경우는 아크에 의한 부식과 펌프에서 ER유체를 이송할 때 온도 상승으로 전분입자의 젤라틴화를 초래하여 구리 전극이 화학적 변화를 일으키기 때문인 것을 알 수 있었다.

향후 ER유체의 온도변화에 따른 내구성 평가, 전기장 강도변화에 따른 ER입자의 전기적·역학적 특성 및 입자 거동에 대해 검토할 예정이다.

참 고 문 헌

- (1) Jang, S. C. and Yum, M. O., 2004, "Design and Performance Test of Valve Operated by ER Fluids," *Transactions of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 1, pp. 63~68.
- (2) 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," *Transactions of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 12, No. 1, pp. 78~83.
- (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) Strandrud, H. T., 1966, "Electric-field valves inside cylinder control vibrator," *Hydraulics and Pneumatics*, pp. 139~143.
- (5) Lingard, S. and Bullough, W. A., 1989, "Tribological Aspects of Electro-Rheological Fluid Behaviour with Respect to Non-Polar Base Liquids," *Proceedings of the Second International Conference on ER Fluids*, pp. 158~175.
- (6) Sung, K. G., Chung, D. D. and Choi, S. B., 2001, "Control of Automatic Cargo Handling System Using ER Valves(I)," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 9, pp. 53~60.