

ER클러치의 성능실험에 관한 기초적 연구

Fundamental Study on Performance Experiment of ER Clutch

김도대(경일대 기계공학부), 장성철*(경남대 대학원), 엄만오(경남대 기계공학부), 김태형(경남정보대 기계계열)
D. T. Kim (Kyungil Univ.), S. C. Jang (Graduate School, Kyungnam Univ.), M. O. Yum(Kyungnam Univ.), T. H. Kim(Kyungnam College)

ABSTRACT

In this work, an ER clutch has been constructed and its characteristics have been evaluated by adapting an electro-rheological fluid(ERF) as an operating medium. ER fluids are suspensions which show an abrupt increase in rheological properties under electric fields. An ER clutch system using ER fluid is a new conception device because an apparent viscosity of ER fluid can be changed by apply an electric field. As a first, Bingham properties of ER fluids are experimentally distilled as a function of electric field. We use the disk type ER clutch in which the ER fluid fills the annular space between a pair of coaxial disk electrodes and experiment results show that the measured revolution per minute was increased with the increase of the electric field. The ER fluid used in the present study consists of weight fraction 35% in zeolite suspended silicone oil.

Key words : Electro-rheological fluid(ERF, 전기점성유체), ER clutch(ER 클러치), Electric field(전기장) Yield stress(항복응력), Apparent viscosity(겉보기 점도), Electrode(전극)

1. 서론

산업기기에 사용되는 동력전달장치는 동력원으로부터 발생되는 회전력을 필요한 기계요소에 전달시키기 위해 클러치와 같은 움직이는 기계요소를 통하여 전달하기 때문에 소음이나 진동, 부품의 마모 등에 문제를 발생시킬 수 있다. 동력전달의 요구조건을 만족하기 위하여 동력전달 장치의 구조가 매우 복잡해지는 반면 복잡한 구조의 기계장치로는 가변하는 동력전달의 정확한 제어에 많은 어려움이 따르고 장치의 복잡한 구조는 고장의 원인이 되기도 한다.

한편, 기존의 클러치와는 전혀 다른 방법의 하나로서 전기장의 강도에 따라 항복응력이 변하는 빙햄(Bingham)특성을 지닌 전기점성유체(Electro-Rheological Fluid, 이하 ER유체라 함)를 이용하여 클러치(이하 ER 클러치라 함)의 회전력

을 제어할 수 있다. ER유체는 인가되는 전기장의 강도에 따라 유체의 겉보기 점도가 변하는 현상을 나타내는 기능성 유체(機能性 流體)이며, 비전도성의 용매에 전도성의 입자를 분산시킨 현탁액이다. ER유체는 전기장의 강도에 의해서 빠른 반응성, 낮은 전력 소모등의 장점으로 인해 그 응용연구에 관한 관심이 고조되고 있다. 그렇지만 ER클러치에 대한 연구는 잠재적인 가능성에 비해 상대적으로 취약하여 최근에 와서야 ER유체를 이용한 클러치 개발에 대한 연구가 부분적으로 이루어지고 있다. Carlson⁽¹⁾은 ER클러치의 기초적인 형태를 제안하였고, Johnson⁽²⁾은 약 1000rpm까지 실험을 수행하여 실질적인 응용성을 강조하였다. 그러나 클러치의 용도를 만족시킬 수준의 성능을 지닌 ER클러치의 개발을 위해서는 우수한 ER유체의 개발, 온도변화에 따른 시스템의 성능변화와 같은 기본 성능의 구체적인 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 클러치의 회전력을 전달하는데 있어서 전기장의 강도에 따라 걸보기 점도가 변하는 ER유체를 사용한 새로운 개념의 클러치를 설계·제작 하였다. 우선, 성능이 우수한 입자분산계 ER유체를 자체 개발하여 ER유체의 가시화 실험, ER유체의 빙햄특성을 제올라이트의 무게분율과 전기장의 강도에 따른 항복응력 측정, ER클러치의 성능실험을 위하여 전기장 강도에 따른 회전력을 고찰하였다.

2. ER유체의 특성

Winslow⁽³⁾에 의해 보고된 ER유체는 외부에서 인가한 전기장에 의해 유체의 항복응력이 변화하는 기능성 유체로 잘 알려져 있다. ER유체는 입자 분산계와 균일계로 분류된다. 입자분산계 ER유체는 비전도성의 용매에 전도성의 입자를 분산시킨 현탁액이며, 전기장 하에서 전도성의 입자가 (+)전극과 (-)전극의 간극내에서 사슬구조(이하 클러스터라 함)를 형성하기 때문에 유체의 걸보기 점도가 현저히 증가하여 Newton유체에서 Bingham유체로 점도특성이 변화한다. 균일계 ER유체는 전기장에 의해 분자의 클러스터 또는 분자의 방향이 지배되며, 액정(liquid crystal)이 잘 알려져 있으며 가격이 고가이다.

본 연구에서 사용된 ER유체는 입자 분산계 유체로서, 용매는 전기절연성이 우수한 실리콘 오일(KF96-20, Korea Shinetsu Silicone Co.)이, 분산된 미세입자는 800℃까지 가열하여 수분을 제거한 제올라이트 입자(Sigma Chemical Co.)를 사용하였다. 사용 이유는 액정의 기본 점도보다는 분산계 ER유체의 기본점도는 다양하게 선택할수 있고, ER효과의 변화범위가 넓기 때문이다.

Fig. 1은 분산계 ER유체에 전기장을 인가하지 않은 경우와 전기장을 인가한 경우에 대한 ER 입자의 거동을 나타낸 것이다. 전기장이 인가되지 않은 상태에서 용매인 실리콘 오일과 분산된 제올라이트 입자는 전기적인 극성을 띄지 않으며 Newton유체의 특성을 나타낸다. 전기장이 인가

되면, 절연성이 양호한 실리콘 오일내에 강한 유전성(誘電性)을 가진 제올라이트 입자는 (+)전극과 (-)전극 방향으로 배열되고, 전극간에는 클러스터가 형성된다. 이것은 외부에서 전기장이 가해지면 유전분극(誘電分極)한 입자간에 전기적 인력이 발생하여 입자 주위에 전기장 방향으로 클러스터를 형성하게 되므로 항복응력을 갖는 Bingham유체의 특성으로 변화한다. 또한, 전기장이 제거되면 원래의 유체특성으로 돌아가는 가역성(可逆性)을 가지며, 전기장 인가에 대하여 응답성이 우수한 특징이 있다.



(a) Electric field 0 kV/mm



(b) Electric field 12 kV/mm

Fig. 1 Effect of DC electric field on the structure formation for ER fluids

뉴턴유체는 유체가 흐를 때 전단응력과 전단속도비에 비례하며, 그 비례상수는 유체의 점도이다. 그래프에서 원점을 지나는 직선인 유체로서 다음 식과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (1)$$

여기서, τ 는 전단응력, η 는 절연유의 점도를 나타내며 $\dot{\gamma}$ ($= du/dy$)는 전단속도이다. du 는 전극간 간극사이의 유체의 속도이고 dy 는 전극 방향으로의 길이이다. ER유체는 외부에서 가해진 전기장에 의해 유체의 점도가 변하는 것으로 표현하고 있지만, 입자 분산계 ER유체에서는 실제적으로 유체의 겔보기 점도(apparent viscosity)가 변하는 것이다. 유체의 전단력에 대한 항복응력이 변화하는 것, 즉 비뉴턴유체의 특성을 나타내는 것으로 다음 식으로 표현된다.

$$\tau = \tau_y(E) + \eta \dot{\gamma} \dots\dots\dots (2)$$

식(2)에서, $\tau_y(E)$ 는 ER유체의 항복응력을 나타내며, 전기장의 강도(E)와 더불어 지수적으로 증가한다. 따라서 식(2)를 전기장의 함수로 다시 표현하면 다음과 같다.

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

여기서, 계수 α , β 는 ER유체의 절연유 종류, 입자종류, 무게분율과 절연유의 점도등 ER유체의 조성조건에 영향을 받는 ER유체의 고유상수이다.

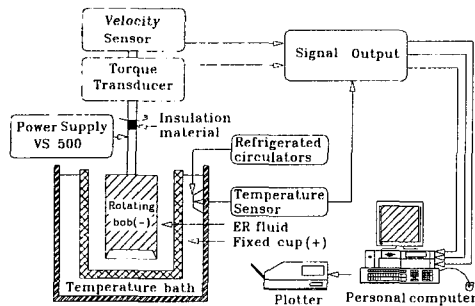


Fig. 2 Experimental setup Bingham test

Fig. 2는 본 연구에서 제조한 ER유체의 비뉴턴 특성을 조사하기 위하여 사용한 회전식 점도계(Haake社, VT-500)의 개략도이다. 이것은 동일한 중심축상에 있는 고정된 외부 원통(cup이라 함)과 회전하는 내부원통(bob이라 함)사이의 간극에 ER유체를 주입하고, 일정한 전단속도비 또는 전단속도비를 변화시켜, 내부원통을 회전시키는데 필요한 토크를 측정하여 점도를 측정하는 점도계

이다. 바깥쪽 원통(cup)의 내경은 23.1mm이고, 안쪽 원통(bob)의 내경은 20.2mm이며, ER유체가 채워지는 bob과 cup의 간극은 1.45mm이다. 그리고 안쪽 원통이 ER유체와 접하는 길이는 61.4mm이다. 또한 bob과 cup을 전극으로 사용하여 전기장의 강도에 따른 ER효과의 영향도 검토할 수 있도록 제작되어 있다. 점도계와 PC가 연결되어, 전단속도비(bob의 회전속도)변화에 따른 점성과 전단응력이 자동으로 측정되어, 출력되도록 구성되어 있다. ER유체에 인가되는 전기장 $E=0.0\sim 2.0\text{kV/mm}$ 까지 0.5kV/mm 씩 단계적으로 변화시켰으며, 전단속도비를 $0.0\sim 200\text{(s}^{-1}\text{)}$ 까지 2분 동안에 증가하도록 조건을 설정하였다. 한편, 온도는 $-10\sim 50^\circ\text{C}$ 까지 변화시켰다.

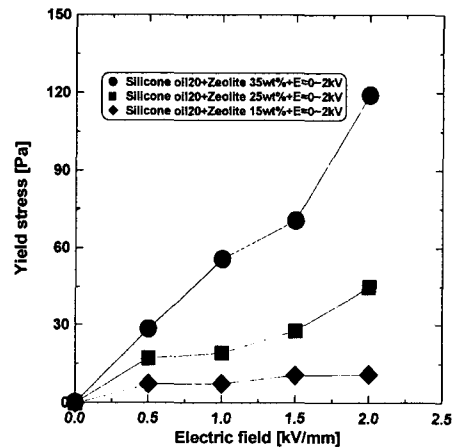


Fig. 3 Electric field dependent Bingham characteristics of ER fluids

Fig. 3은 온도 25°C 이며 전기장 강도에 따른 항복응력의 크기를 나타낸 것이다. 전기장의 강도가 커지고 제올라이트의 무게분율이 많아질수록 항복응력의 값이 증가한다는 것을 알수가 있다. 그래프에서 알 수 있듯이 제올라이트 입자의 무게분율을 달리하여 세 종류의 ER유체가 조성되었다. 제올라이트의 무게분율이 35%인 ER유체를 ER-SZ35로, 제올라이트의 무게분율이 25%인 ER유체를 ER-SZ25로, 제올라이트의 무게분율이 15%인 ER유체를 ER-SZ15라 칭하였다.

전기장의 강도 $E=0\sim 2\text{kV/mm}$ 까지 0.5kV/mm 씩 단계적으로 변화시켰다. 그림에서 보는 바와 같이 전기장 증가에 따라 항복응력의 값이 지수 함수적으로 증가하는 것을 알수 있으며 이를 식 (3)에서 전기장의 함수식으로 나타내면 다음과 같다.

- i) ER-SZ35: $\tau = 119.02E^{0.24}\text{Pa}$
- ii) ER-SZ25: $\tau = 44.99E^{0.26}\text{Pa}$ (4)
- iii) ER-SZ15: $\tau = 10.51E^{0.17}\text{Pa}$

본 연구에서 ER클러치의 작동유체로 사용된 실리콘 오일과 제올라이트는 무게분율이 35%인 경우, 비교적 ER효과가 크며 높은 전단속도비에서 발생하는 불규칙성과 마모에 의한 영향이 작은 특징을 지니고 있다.

3. ER클러치의 성능 실험

3.1 설계 및 작동 원리

Fig. 4는 본 연구에서 자체 제작한 ER클러치의 전체적인 형상과 구조를 나타낸다.

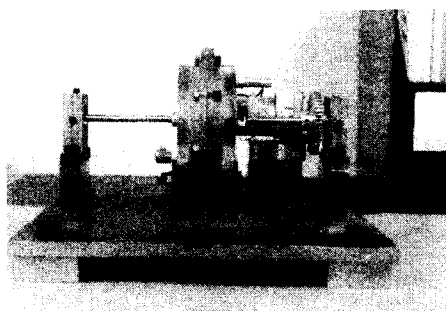
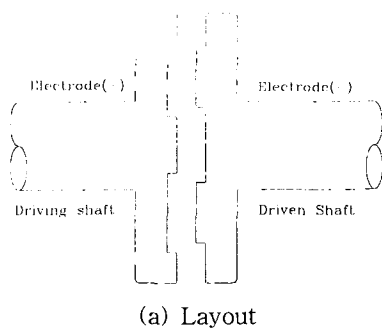


Fig. 4 The proposed of ER clutch

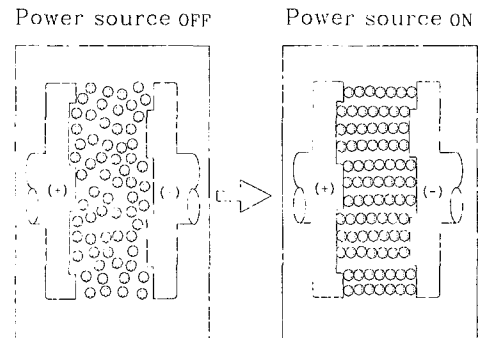


Fig. 5 Mechanism of ER effect in ER clutch

제안된 ER클러치의 형상은 단판 디스크(disk)형으로 구성하였으며, 직경은 60mm, 두께 3mm이며 전기장 인가시 ER효과가 최대가 되도록 하기 위해서 홈을 주어 ER유체의 유동 단면적이 최대가 되도록 설계·제작하였다. 원동축 클러치와 종동축 클러치는 고전압 전원장치와 연결되어 있어 (+)전극과 (-)전극으로 작용하며, 축으로 연결되어 베어링으로 지지된다. 직류 고전압 발생 장치와 각 클러치와의 연결은 원동축 클러치에 (+)전원을, 반대편 종동축 클러치에는 (-)전원을 두었으며, 클러치의 축이 전극으로 사용되므로 클러치의 간극은 1mm를 유지하여 하우징과 베어링으로 고정하였다.

Fig. 5는 ER클러치의 (+)전극과 (-)전극에서 발생하는 ER효과의 메커니즘을 나타낸 것이다. Fig. 1의 가시화 사진에서처럼 전기장이 인가되지 않은 상태에서 실리콘 오일과 분산된 제올라이트 입자는 전기적인 극성을 띄지 않고 (+)전극과 (-)전극 사이에 균일하게 분포되어 있다. 전기장을 인가하게 되면 전기 절연성이 양호한 실리콘 오일내에 강한 유전성을 가진 제올라이트 입자는 (+)전극과 (-)전극 방향으로 배열되고, 전극간에는 클러스터가 형성된다. (+)전극과 (-)전극 사이에서 형성된 클러스터가 원동축 클러치와 종동축 클러치를 회전 시킨다. 기존의 클러치는 원동축과 종동축을 움직이는 기계요소를 통하여 전달하기 때문에 소음이나 진동, 부품의 마모등에 문제를 발생시킬수가 있으나 ER클러치는 전기장의 강도에 따라 회

전력을 제어할 수 있다. 또한, 전기장을 제거하면 원래의 상태로 되돌아가는 가역성(可逆性)을 가진다.

3.2 실험방법 및 성능고찰

Fig. 6은 자체 제작한 ER클러치의 성능실험을 위한 전체적인 실험장치 구성을 나타낸다. 실험장치는 크게 구동되는 원동축 부분, 전기장을 공급하는 고전압 발생장치, 그리고 종동축 부분등으로 구성되어 있다. 실험에 사용된 ER유체는 빙햄 특성 실험에서 전기장 인가시 항복응력이 가장 뛰어난 ER-SZ35를 사용하였다. 탱크내에 저장된 제올라이트 입자의 침전을 방지하고 입자분포를 균일하게 하기 위해서 전동식 교반기로 교반 하였다. 유량을 공급하기 위한 펌프는 ER유체와 같이 유체내의 작은 입자들이 포함되어 있는 특수한 형태의 유체를 이송시키기 적합한 트로코이드 펌프가 사용되었다. 실험은 펌프에서 공급된 유량이 ER클러치의 하우징 입구로 조금씩 유입되게 해서 ER유체가 하우징에 채워지면 출구쪽의 밸브로 유량을 조절하여 전기장 강도에 따라 원동축 회전수를 변화시켜 종동축 회전수를 측정 하였다.

원동축의 회전력 제공원으로 사용된 기어(gear)2의 모터는 일정한 회전속도를 유지하면서 전압 공급 장치(DC power supply)의 전압 조절을

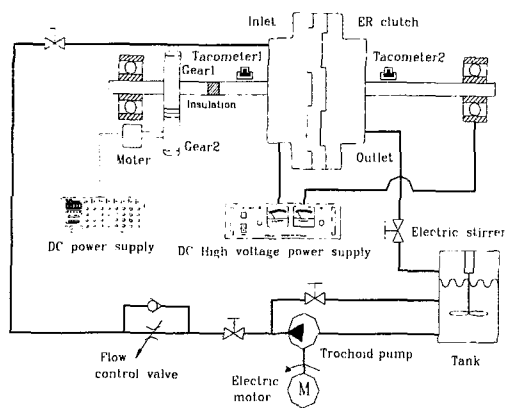


Fig. 6 Experimental apparatus for Performance test of ER clutch

통해 0~400rpm으로 변속 가능하게 하였다. 회전속도는 50rpm 간격으로 증가시키고 전기장은 직류 고전압 발생장치(DC high voltage power supply)를 사용하여 1.0kV/mm 간격으로 6.0kV/mm까지 증가시키면서 이때 발생하는 정상상태의 회전력을 측정하였다. 회전력의 측정은 원동축과 종동축에 타코미터(tachometer)를 부착하여 원동축 회전수의 변화에 따른 종동축의 회전수를 비교하여 ER클러치의 성능을 비교·분석 하였다.

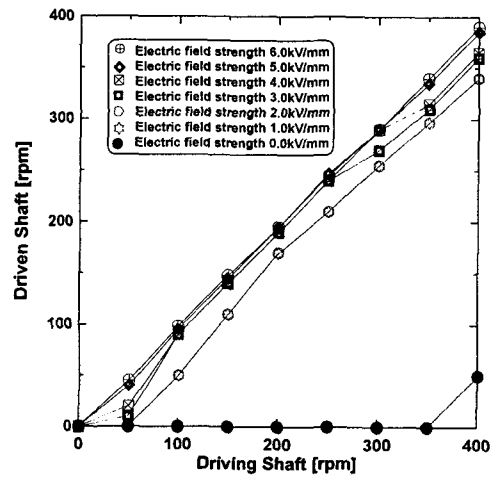


Fig. 7 Electric field dependent of ER clutch with respect to the rotational speed

Fig. 7은 전기장의 강도에 따른 원동축과 종동축의 회전력을 비교한 것이다. 그래프에서 전기장의 강도가 0.0kV/mm(●)이고 원동축의 회전수가 400rpm일 때 종동축의 회전수가 50rpm인 것은 전기장에 의한 ER효과가 아니고 회전속도의 증가에 따른 원심력의 영향인 것으로 판단된다. 전기장의 강도가 1.0kV/mm(☆)인 경우 ER효과가 발생되어서 원동축이 400rpm일 때 종동축은 340rpm으로 회전력의 전달이 약 85%로 나타났다. 전기장의 강도가 3.0kV/mm(□)인 경우 원동축이 400rpm일 때 종동축은 360rpm으로 회전력의 전달이 약 90%로 나타났으며, 전기장의 강도가 6.0kV/mm(⊕)인 경우 원동축이 400rpm일 때 종동축은 392rpm으로 회전력의 전달이 약 98%로 나타났다.

이 실험 결과로부터 전기장 강도에 의해 형성된 클러스터로 인해 원동축의 회전력이 종동축의 회전력으로 전달되어 가역적으로 변하는 특성을 알 수 있다. 따라서 ER클러치는 기존 클러치와는 달리 전기장 강도에 따라 임의적으로 요구되는 회전력을 발생 시킬 수 있는 중요한 장점을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 클러치의 회전력을 전달하는데 있어서 전기장의 강도에 따라 걸보기 점도가 변하는 ER유체를 사용한 새로운 개념의 클러치를 설계·제작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. ER유체에 전기장 강도를 높이면, ER입자는 단일클러스터가 형성된 후 복합 클러스터를 형성하는 것을 알 수 있다.
2. ER유체는 전기장의 강도가 세고, ER입자의 무게분율이 많을수록 항복응력은 크게 나타나는 것을 알 수 있다.
3. ER클러치는 전기장 강도에 따라 임의적으로 요구되는 회전력을 발생 시킬수 있는 것을 알 수가 있다.

이와 같은 연구결과는 기존의 복잡한 클러치보다 정밀도 및 실용성을 향상시킨 ER 클러치 개발시 매우 중요한 기초 자료로 제공될 수 있을 것이라 생각된다. 향후 더욱 향상된 성능을 보유한 ER유체의 개발과 ER클러치의 토크 전달 시스템등의 연구가 계속 수행될 예정이다.

5. 참고문헌

1. K.D.Weiss, J.D.Carlson and J.P.Coulter, "Material Aspects of Electro-Rheological System" J. of Intelligent material, Systems and structures, Vol.4, pp.13-134, 1993
2. A.R.Johnson, W.A.Bullough, R.Firoozian, A.Hosseini-Sianaki, J.Makin and S.Xiao, "Testing on a high speed Electro-Rheological Clutch" Proceeding of the 3rd International Conference on ER fluids, Edited by R.Tao, pp.424-441, 1991
3. W. M. Winslow, "Induced Fibrillation Suspensions" J. Applied Physics, Vol.20, pp.1137-1140, 1949
4. A. J. Simmonds, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", IEE Proceeding-D, Vol. 138, No. 4, pp.400-404, 1991
5. D. A. Brooks, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", Journal of Modern Physics, Vol. 6, pp.2705-2730, 1992
6. 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, pp.477-489, 1994
7. S. Yokota and Y. Kondoh, "A Control Valve by Making Use of an Electro-Rheological Fluid", 日本機械學會論文集, pp.93-100,1996.9
8. 장성철, 염만오, 김도태, 김태형 "ER유체를 이용한 유압제어밸브의 개발", 한국유체공학 학술대회 논문집, pp.495-498, 2000.9