

실리카계 ER유체의 구성요소에 따른 마모 특성 Wear Characteristics of Silica-Based ER Fluids with Different Compositions

송요찬*, 최승복**, 정재천**, 서문석***, 이문수***

* 인히대학교 기계공학과 대학원

** 인히대학교 기계공학과

*** 국방과학연구소

ABSTRACT

This study addresses the wear characteristics of electro-rheological(ER) fluids which are potential application candidates for various hydraulic systems. As the first step, three different ER fluids are composed and subsequently tested to observe field-dependent Bingham behaviors. The pin-on-disc testing method is then adopted herein to investigate the wear rate of the ER fluids with various base liquids and particle concentrations. In addition, friction coefficients for the ER fluids are evaluated with respect to the normal force.

1. 서론

전기장의 영향을 받는 ER유체의 발견은 1880년 독일에서 처음 보고되었으나[1], 1947년 미국의 W.Winslow가 미네랄 오일에 전분 또는 실리카를 분산시킨 ER유체를 이용하여 특허를 내고 전기장 부하시 유체 저항의 현저한 증가현상이 나타남을 발표할 때까지는 그 중요성이 인식되지 못하였다[2,3]. 그러나 ER유체의 몇 가지 문제점으로 인하여 1980년경 영국에서 이 유체에 대한 연구가 시작될 때까지 이 분야에 대한 연구 흥미도는 매우 취약했으나, ER유체가 가지고 있는 폭 넓은 응용성으로 인해 근래에 들어 미국, 영국 및 일본 등 선진 여러 나라에서 우수한 성능의 ER유체의 개발과 함께 ER유체를 이용한 다양한 응용장치 개발에 많은 관심과 투자를 하고 있는 중이다.

그러나 지금까지의 연구는 ER유체의 전기장 부하시의 항복용력 및 이를 이용한 응용장치의 적용가능성에 대한 연구가 진행되어 왔을 뿐[5~8] 그 이외의 연구, 예를 들면 ER유체를 유압 시스템에 적용시 발생할 수 있는 위치제어를 위한 유체의 비압축성과 비열, 점도와 유희특성, 마모, 열 발생 등에 관한 연구는 거의 진무한 실정이다. 트라이볼로지(tribology)특성 실험은 영국의 Bollough에 의해서만 연구가 진행되고[9~11] 있을 뿐 폭 넓은 연구는 진행되고 있지 않다.

ER유체를 작동유로 하여 유압 시스템에 적용할 경우에 있어서 유압 시스템내의 기계 요소가 상대 운동을 할 때 마이크로 연삭과 마모가 발생된다. 이러한 과정이 계속되면, 상대 운동을 하는 부분에서의 재료의 성질 변화, 작동유의 성질 변화에 의해 마찰력의 변화 뿐만 아니라, 마모 발생에 의한 기계 요소에서 작동유의 누수가 발생되고 결국 정지하게 된다. 또한 ER유체를 작동유체로 사용할 경우, 마모 입자(wear debris)는 ER유체의 전도 특성을 변화시킬 뿐만 아니라, 전극판 사이의 전압 부하를 방해하고, ER유체의 본래의 특성을 변화시킨다. 본 연구에서 ER 조성에서 사용된 용매는 서로 다른 항복용력 기동을 보인 뿐만 아니라 비극성 유체이므로 트라이볼로지 문제가 이기된다. 따라서 본 연구에서는 전기유동유체의 마모, 마찰 특성을 실험적으로 고찰하고 전기유동유체의 역학적 특성과 비교함으로써 보다 신뢰성 있고 우수한 ER 용

용장치 개발에 필수적인 자료를 제공하는 데 그 목적이 있다.

2. ER유체의 역학적 특성

전기유동유체는 가해지는 전기장의 강도에 따라 그 역학적 특성이 변하는 유체를 총칭하는 것으로, 기본적으로 비전도성의 용매 중에 강한 전도성을 갖는 고체 입자들을 분산시킨 콜로이드 용액이다. 입자의 종류에는 전분, 셀룰로이드, 실리카 등으로부터 전용으로 형성된 입자에 이르기까지 많은 종류의 입자가 사용되고 있다. 또한 ER유체의 효과를 증대시키기 위한 첨가제(additive) 등으로 구성된다. ER유체의 조성시 사용되는 용매는 유압 시스템에서 임의한 작동을 위해서 유수분리성이 키와 하며 고체 입자는 표면 활성제의 역할을 하는 수분 흡수용 위해 물과 친화력이 있어야 하고 다공성이어야 한다.

ER유체의 전기장 인가시 Bingham 유체 성질에서 도출된 전단기동 식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\tau = \tau(E) + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

이거시 τ 는 유체의 전단응력(shear stress)을 나타내고, η 는 유체의 점성계수(viscosity)이며, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비(shear rate)를 나타낸다. τ_y 는 유체의 항복응력(yield stress)을 표현하는 것으로 전기장(E)의 증가와 더불어 E^x 의 관계로 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서 식 (1)을 전기장의 함수로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + a E^x \quad (2)$$

이거시 상수 a 와 x 값은 자가 ER유체들의 용매, 입자 중량비와 전기장의 크기에 대한 특성치로써 실험을 통하여 얻어질 수 있다. ER유체의 구성 요소에 따른 마모, 마찰 특성과 항복응력과 연계하여 고찰하기 위하여 Table 1에 나타낸 것과 같이 용매와 입자 중량비를 달리한 ER유체들 조성하여 역학적 기동을 전기 점도계(VT500, HAAKE)를 이용하여 측정하였다. 안쪽의 실린더를 회전시키 이때 발생하는 전단력을 측정하였다. 실험 조건으로는 전기장용 0에서 2kV/mm까지 1kV/mm씩 증가 시켰으며, 전단속도비는 0에서 50rpm까지 점진적으로 증가시켰다.

진기장의 크기를 변화시켰을 때 실리카계 ER유체(ERTS3)의 전단속도비와 전단응력의 관계를 Fig.1에 나타냈다. 진기장의 크기가 증가할수록 ER유체의 동일한 전단속도비에 대한 전단응력의 크기가 증가하는 것을 알 수 있으며, 일정한 진기장의 크기에 대하여 유동이 시작된 후에는 전단응력과 전단속도비와의 크기가 전장 무부하시의 경우와 유사한 비율로 증가함을 알 수 있다.

Fig.2와 Fig.3에서의 진기장에 따른 항복응력은 Fig.1과 같은 전단응력과 전단속도비와의 그래프에서 선형회귀를 통하여 y절편과 만나는 점을 항복응력으로 정의하였다. Fig.2는 실리카의 입자 중량비율 15%로 고정하고 용매의 종류를 달리한 경우의 ER유체(ERSS, EROS, ERTS1)의 진기장에 따른 항복응력 거동을 나타낸 것이다. ER유체는 비전도성의 용매와 전도성의 입자에 의해 구성된다. 즉 비극성이 높을수록 유전율이 작기 때문에 입자와의 유전율 차가 커지므로 진기장에 따른 ER유체의 항복응력이 크다고 할 수 있다. 실리컨 오일로 조성된 ER유체가 진기장에 따른 항복응력 거동이 가장 크게 나타났고, 올리브 오일, 트랜스포머 오일로 조성된 ER유체의 항복응력은 2kV/mm의 진기장에서 실리컨 오일로 조성된 ER유체의 경우보다 각각 0.83, 0.63 배정도 낮게 나타났다.

Fig.3은 용매를 고정하고, 실리카계 입자의 중량비를 달리하여 조성된 ER유체(ERTS1, ERTS2, ERTS3)의 진기장에 따른 항복응력 거동을 나타낸 것이다. 입자의 중량비가 증가할수록 진기장에 따른 항복응력은 증가함을 알 수 있다. 즉, 30%와 40%의 ER유체의 항복응력은 2kV/mm의 진기장에서 15% ER유체의 경우보다 각각 3.58, 3.80 배정도 크게 나타났다.

Table 1 Specifications of base liquids and ER fluid Lubricants

Lubricant designation	Component of based liquids and ER fluids
ERBS	Silicone oil (50cs)
ERSS	Silicone oil (50cs) + Silica (15%)
ERBO	Olive oil (98cs)
EROS	Olive oil (98cs) + Silica (15%)
ERBT	Transformer oil (35cs)
ERTS1	Transformer oil (35cs) + Silica (15%)
ERTS2	Transformer oil (35cs) + Silica (30%)
ERTS3	Transformer oil (35cs) + Silica (40%)

3. 실험장치 구성 및 방법

실험에 사용된 핀-디스크의 시편 조합과 시편사이의 활동면에 윤활제를 공급하는 기구를 Fig.4에 나타냈다. 고정된 시편은 핀이 되고 미끄럼 운동을 제공하는 시편은 디스크가 된다. 핀의 재료는 연강을 사용했으며, 디스크의 재료는 고주파 열처리로 경화시킨 강을 사용하였다. 시편들의 물리적 특성은 Table 2에 나타났다. 디스크가 회전함에 따라 용기내에 있는 윤활제가 디스크 원주 상에 따라 윤활가 시편들 사이의 표면에서 경계윤활을 하게 된다. 또한 회전하는 디스크 원주상에 작은 원통형의 핀으로 수직하중을 가하게 되어 있다. 핀이 디스크의 회전축에 수직인 방향으로 놓여 있으므로 디스크의 일면과 접촉하게 되어 있다. 이 시험기는 원핀의 옆면에 핀이 접촉함으로써 윤활제가 디스크에 완전히 짜질 필요가 없다. 다만 접촉면이 평면이 아닌 곡면이므로 핀의 마모면이 시험이 진행됨에 따라 곡면이 되는 성질이 있다[12]. 핀에 가해지는 하중은 0~310 N까지 가했으며 디스크의 회전속도는 200rpm으로 고정시켰다. 이 속도는 윤활제 용기로부터 윤활제가 디스크의 표면을 따라 오르도록 알맞은 회전속도로 정하였으며 실험시간은 27분간에

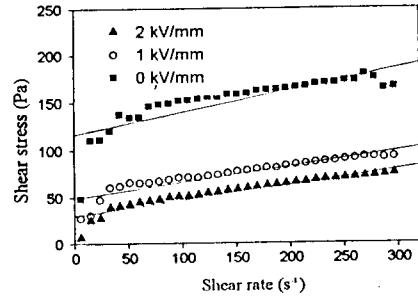


Fig.1 Shear stress vs. shear rate (ERTS3)

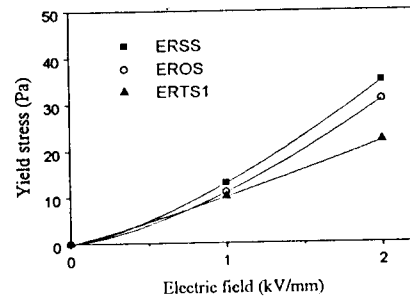


Fig.2 Field-dependent yield stress (ER fluids with different base liquid)

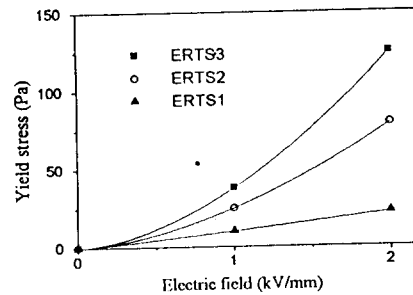


Fig.3 Field-dependent yield stress (ER fluids with different particle concentration)

걸쳐서 행하였다. 마모량의 측정에는 직접적인 방법으로 핀의 무게변화를 측정하였다. 10^{-4} g까지 측정 가능한 정밀저울을 사용하여 핀의 무게변화를 측정하였고, 측정 전에는 고정시편을 희석이세폰에 담긴 상태로 초음파세척기로 세척하여 핀에 부착되어 있는 기름등 불순물을 제거하였다. 또한 각각의 하중에 대한 실험시 KS M 2026에 규정된 반복성을 기초로 하여 데이터를 얻었다. 이 무게변화를 마모율로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{마모율} = \frac{\text{서편의 마모량}}{\text{미끄럼 거리}} \quad (3)$$

마모율은 단위거리당 핀의 무게변화를 나타내는 것으로 단위는 g/m 이다.

또한 고정 시편인 핀에 직접 스트레인 게이지를 부착하여 스트레인 인디케이터를 통하여 변형율을 측정하고, 이를 마찰계수로 환산하였다. 공압에 의해 움직이는 실린더 로드 가 안내면

에서의 마찰에 의한 하중의 손실을 방지하기 위하여 안내면을 선형 베어링으로 하였다. 실험 조건은 각각의 하중에 대하여 디스크가 200회전후 10초간 민형율을 측정하였다. 수직 하중 185N하에서 핀이 디스크 원주상을 1000m 미끄럼 운동 후, 전자 현미경을 이용해서 100배율로 핀의 표면에 발생된 마모트레를 조사하였다. 실험 전 시편을 인삭과 연마를 통하여 시편 표면 거칠기를 일정하게 하였고, 실험 진후에 시편을 희석 아세톤에 담근 상태로 초음파 세척을 통하여 시편에 붙어 있는 불순물을 제거하고 알코올 세척한 후 전자 현미경에 올려 놓고 마모 트랙을 촬영하였다.

Table 2 Characteristics of the specimens

	Material	Vickers hardness	Roughness (μm)
Disc	S45C harden steel	540	4.4
Pin	mild steel	180	1.2

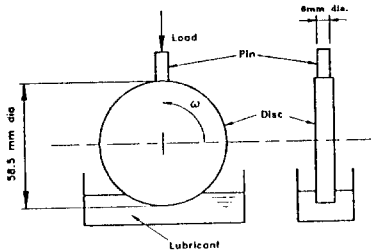


Fig.4 Pin-on-disc test apparatus

4. 실험 결과 및 고찰

Fig.5는 ER유체의 조성에 사용된 세 가지 용매의 실리콘계 입자 15%로 조성한 세 가지 ER유체를 유티체로 하여 핀-디스크 마모 시험기로 마모 실험을 수행한 결과이다. ER유체의 조성에 사용되는 비극성 용매는 일반 유압자동유에 비하여 상대적으로 비극성이라는 특성을 갖기때문에 금속 표면상의 미세 요철 사이에 유티체의 흡착과 유티체 분자 상호간의 응집력에 의한 유막강도가 약하기 때문에 트라이볼리지 문제가 발생하게 된다. 실리콘 오일은 다른 용매에 비하여 비극성이 크기 때문에 큰 마모율 변화를 나타낸다. 실리콘 오일로 조성한 ER유체도 용매의 경우와 거의 같은 마모율 변화를 나타냈다. 그러나 올리브 오일(ERBS)과 트랜스포미(ERBS)로 조성한 ER유체(EROS, ERTS1)는 용매의 경우보다 마모율이 적게 나타났다. 이것은 입자와 용매의 친화성에 기인하여 금속접촉면적보다 유티체접촉면적이 커지기 때문이다. 또한 입자와의 친화성 여부에 따라 그 정도의 차가 결정된다[13,14].

ER유체의 전기장에 따른 항복응력 기동은 입자의 중량비가 증가할수록 커지는 것을 실험을 통하여 알 수 있었다. ER유체를 응용장치에 적용하기 위해서는 ER유체의 전기장에 따른 높은 항복응력이 요구된다. 그러나 입자의 중량비가 증가하면 유체의 트라이볼리지 특성이 변한다. Fig.6은 용매를 트랜스포미 오일로 하고, 입자의 중량비를 달리하여 조성한 ER유체(ERTS1, ERTS2, ERTS3)의 하중에 따른 마모율 변화이다. 유체 내에 입자중량비가 30% 이하에서는 용매의 경우보다 낮은 마모율을 나타냈다. 그러나 입자중량비가 40%가 되면 오일의 양이 그만큼 줄어들고, 경질입자인 실리콘에 의해 두 시편사이에서 마모를 촉진시켜 큰 마모율 변화를 나타낸다.

Fig.7은 ER유체의 조성에 사용된 세 가지 용매의 실리콘계 입자

중량비 15%로 조성한 세 가지 ER유체를 유티체로 하여 마찰계수를 측정된 결과이다. 하중에 따른 마찰계수의 변화는 Amontons의 법칙에서 알 수 있듯이 축하중에 관계없이 고하중하에서도 일정한 값을 갖는다[15]. 실리콘 오일은 $\mu=0.47$, 올리브 오일은 $\mu=0.13$, 트랜스포미 오일은 $\mu=0.29$ 이다. 그러나 입자의 존재시 용매의 경우 보다 작은 마찰계수를 나타냈다. Bologh의 집속을 실험에서 증명된 바와같이 입자가 두 시편사이에서 구름 베어링 역할을 하기 때문이다. Fig.8은 용매를 트랜스포미 오일로 고정시키고, 입자의 중량비를 달리하여 조성한 ER유체(ERTS1, ERTS2, ERTS3)의 하중에 따른 마찰계수의 변화이다. 입자의 중량비가 증가하면 두 시편 사이에 용매의 공급이 줄어들어 마찰력은 증가하게 되고 결국 마모에 큰 영향을 주게 된다.

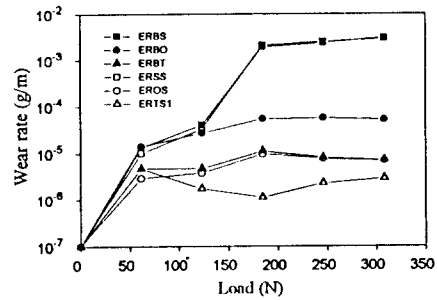


Fig.5 Wear rates of the base liquids and the ER fluids

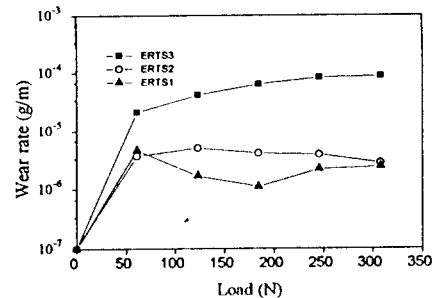


Fig.6 Wear rates of the ER fluids with different particle concentration

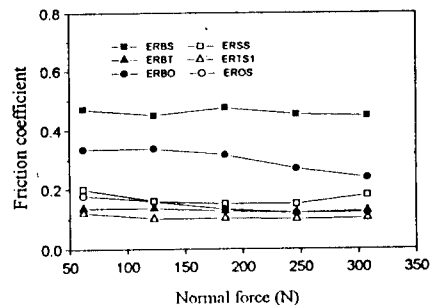


Fig.7 Friction coefficients of the base liquids and the ER fluids

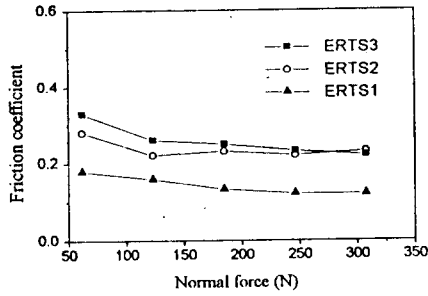


Fig. 8 Friction coefficients of the ER fluids with different particle concentration

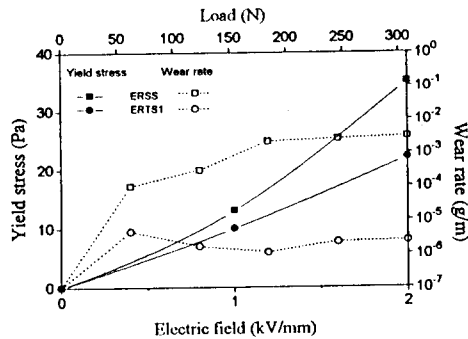


Fig. 9 Comparison between wear rate and yield stress (ER fluids with different the base liquid)

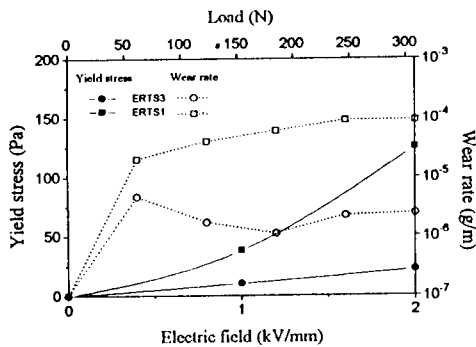


Fig. 10 Comparison between wear rate and yield stress (ER fluids with different the particle concentration)

Fig.9와 Fig.10은 조성이 다른 ER유체의 하중에 따른 마모율 변화와 전기장에 따른 항복응력 거동을 나타낸 것이다. 비극성이 높은 용매로 조성한 ER유체의 마모율은 크게 나타나고, 또한 항복응력도 높게 나타났다. 입자의 중량비가 증가할수록 마모뿐만 아니라 항복응력도 증가하므로 유압 시스템에서 두가지 특성을 만족시키는 입자 중량비가 존재함을 알 수 있다.

Fig.11 (a)와 (b)는 실리콘 오일과 트랜스포머 오일을 윤활제로 사용했을 경우의 핀의 마모 트랙을 나타낸다. 실리콘 오일은 비탄화수소계의 오일으로써 열과 산동의 화학적 작용에는 강하지만 금속 표면에서 흡착성이 낮아 경계유막특성은 매우 나쁘다[15]. 즉 유막에 의해 두 시핀의 접촉을 이간시키지 못해 금속 접촉 면적이 커

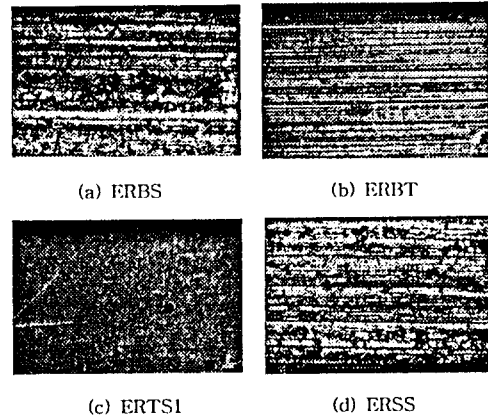


Fig.11 Worn surface

져 연삭 마모뿐만 아니라 용착마모에 의해 두 시핀 사이에서 전이가 발생한다. 반면에 Fig.11 (b)에서 보듯이 트랜스포머 오일은 실리콘 오일에 비해 금속표면에서의 흡착성이 양호하여 순수 연삭 마모만 발생하였다. Fig.11 (c)와 (d)는 입자 중량비가 각각 15%(ERTS1) 40%(ERTS3)로 조성된 ER유체를 윤활제로 사용했을 경우의 핀의 마모 트랙을 나타낸다. 입자 중량비 15%의 경우, 오일내 입자의 존재가 두 시핀 사이의 유막 강도를 강화시켜 용매의 경우보다 마모 트랙의 홈 간격이 미세하다. 그러나 입자 중량비 40%의 경우에는 오일 보다 입자의 영향이 크게 나타나므로 두 시핀 사이에서 윤활제의 냉각 효과가 떨어져, 용착이 발생하여 마모가 크게 발생한다. 용착마모는 마찰에는 큰 영향을 미치지 못하지만 마모에는 큰 영향을 미친다[16].

5. 결론

실리하게 ER유체의 구성 요소에 따른 마모, 마찰 특성을 실험적으로 고찰한 결론은 다음과 같다.

1. ER유체의 내마모성은 용매의 분자 구조에 따라 크게 좌우됨을 알 수 있다. 또한 항복응력 거동은 상대적으로 비극성이 높은 용매로 조성한 ER유체가 전기장에 따른 높은 항복응력 거동을 나타냈다. ER유체를 유압 작동유로 사용할 경우, 유압 시스템에서 요구되는 ER유체의 높은 항복응력 기동과 내마모성은 서로 상반됨을 알 수 있다. 또한 입자의 중량비에 따른 ER유체의 마모 특성과 전기장에 따른 항복응력 거동을 동시에 만족하는 입자 중량비가 존재함을 알 수 있다.
2. 입자 중량비가 작은 ER유체는 조성에 사용된 용매보다 작은 마찰을 보였다. 그러나 입자 중량비가 40%인 ER유체는 마찰이 증가하고 용착이 발생하여 마모가 크게 발생한다. 입자 중량비가 어느 이상이 되면 용착이 발생하여 마찰은 약간의 변화가 있지만, 마모는 현저하게 증가한다.
3. 마모트래 분석에서 알 수 있듯이, 비극성이 큰 실리콘 오일은 금속과의 흡착성이 매우 낮아 금속 용착의 발생과 전이 현상에 기인하여 다른 용매에 비하여 비교적 큰 마모율을 나타낸다.

후기

본 연구의 일부는 국방과학기술연구소의 위탁연구과제(MD930157CD)로 수행되었으며 이에 관계자가 감사드립니다.

참고 문헌

1. W. Konig, "Bestimmung einiger Reibungscoefficienten und Versuche Über den Einfluss der Magnetisierung und Electricität auf die Reibung der Flüssigkeiten," *Annals of Physics*, Vol. 125, pp 618~624, 1885
2. H. Winslow, "Induced Fibrin Suspension," *J. of Physics*, Vol. 20, pp 1137~1140, 1949
3. M. V. Gandhi, B. S. Thompson, "Smart Materials and Structure," Chapman & Hall, pp 147~148, 1992
4. T. B. Jones, "Orientation of Particle Chains in AC Electric Fields," *Proceedings of the Second International Conference on ER Fluid*, pp 14~25, 1990
5. 박우철, 김기선, 최승복, 정재천, "전장부하에 대한 전기유동유체의 역학적 고찰," *한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집*, pp 310~314, 1993
6. Shin Morishita, Jun'ichi Mitsui, "An Electronically Controlled Engine Mount Using Electro-Rheological Fluid," *SAE 922290*, pp 92~103, 1992
7. J. E. Stangroom, "Electro-Rheological Fluids," *ER fluid Developments Limits*, pp 22~23, 1992
8. 김기선, 정달도, 이효정, 최승복, 정재천, "전기유동유체를 이용한 실린더형 밸브의 성능 고찰," *한국정밀공학회지*, 제11권, 제4호, pp 148~157, 1994
9. S. Lingard, W. A. Bollough, "Tribological Aspects of Electro-Rheological Behaviour with Respect to Non-Polar Base Liquids" pp 158~175, 1989
10. S. Lingard, W. A. Bollough, W. M. Shek "Tribological Performance of an Electrical-Rheological Fluid" *J. Phys. D Appl. of Phys*, Vol.22, pp 1639~1645, 1989
11. S. Lingard, W. A. Bollough, W. M. Shek "Hydrodynamic Pressure Generation with an Electro-Rheological Fluid" *Wear*, Vol. 142, pp 373~381, 1991
12. 한국표준연구소 "재료시험법," pp226~314, 1987
13. 한국 하우론 "기술자료" IY-E-01~2
14. Chao-Yuan Tung, S. K. Hsieh, "Determination of Friction-Reduction and Antiwear Characteristics of Lubricating Engine Oils Compounded with Friction Modifiers," *Lubricating Engineering* Vol.44, 10, pp 856~865, 1987
15. 曾田範宗, "固體の摩擦と潤滑," 丸善株式會社, pp 184, pp. 206~211, 1961
16. W. A. Glaeser, "Wear Experimentals in the Scanning Electron Microscopic," *Wear*, 73, pp 371~386, 1962