

유압밸브 적용을 위한 ER유체의 역학적 특성 고찰

김옥삼*, 이현창**, 박우철**

Investigation of Mechanical Characteristics of ER Fluids for Application in Hydraulic Valve

Ok-Sam Kim*, Hyun-Chang Lee** and Woo-Cheul Park**

Abstract

The electro-rheological (ER) effect refers to the abrupt change in viscosity in certain suspensions on application of an electric field. This paper presents experimental results on material properties of an ER fluids subjected to electrical fatigues. As a first step, two types of ER fluids are made of arabic gum and methyl cellulose(MC) choosing 25% of particle weight-concentration. Following the construction of test mechanism for electrical durability of ER fluid, the dynamic yield shear stress and current density of the ER fluids are experimentally distilled as a function of electric field. The yield shear stress of operated ER fluids are distilled and compared with those of unused ER fluids.

Key Words : Electro-Rheological fluids(전기 유동유체 :ER유체), Bingham property(빙햄 특성), Electric field(전기장), Yield shear stress(항복 전단응력)

1. 서 론

서보밸브는 각종 유압시스템의 메카니즘을 구현하는데 중요한 구성요소로서, 유체의 압력과 유량을 조절하여 제어 대상 시스템의 전달력을 변화시킨다. 대부분의 유압 시스템의 경우, 기계적 이동장치를 이용하여 밸브를 개폐하기 때문에 시스템의 응답성 저하가 불가피하다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 일환으로 기계요소의 설계변경이나 피드백 제어와 연계된 유압시스템에 관한 많은 연구가

수행되었다⁽¹⁾. 그러나 기계적인 메카니즘에서 오는 응답 지연과 유압 시스템이 갖는 비선형성은 유압시스템의 고속화와 고정밀화에 가장 걸림돌로 작용하고 있다. 이러한 이유로 지능형 소재^(2,3)를 이용한 새로운 차원의 서보 유압밸브인 전기유동(Electro-Rheological:ER)유체의 연구가 진행되고 있다^(4,5). ER유체의 고유 특성과 연계해 볼 때 ER유체를 이용한 유압밸브에 대한 연구가 매우 적합한 응용장치로 인식되어 많은 성과가 이루어지고 있다. Simmonds⁽⁶⁾는 평판형의 ER밸브를 제안하여 전기장에 따른

* 여수대학교 기계공학과(kos@yosu.ac.kr)
** 삼척대학교 자동차공학과

압력 강하를 고찰하였고, 이를 바탕으로 실용화를 위한 문제점과 방향을 제시하였다. Brooks⁽⁷⁾는 ER밸브를 이용한 유압 회로를 구성하여 성능시험을 수행하였으며 이를 응용한 연구 분야에 대하여 발표하였다. 한편 국내에서도 다단 실린더형 ER밸브를 제안하여 전기장 크기와 유량에 따른 압력강하를 실험적으로 연구하였다⁽⁸⁾.

그러나 ER유체를 사용하여 응용 장치에 적용하기에는 미세한 메카니즘의 규명, ER유체의 전기장 강도에 대한 관계성, 응용 시 유체의 안정성 및 마모와 피로현상의 규명과 침전현상 등 선결해야 할 문제점들이 많다. 따라서 본 연구에서는 ER유체를 유압기에 적용하기 위하여 고려하여야 할 사항들에 대하여 실험적으로 고찰하고 특성을 파악하였다. 유압 회로와 유사한 ER유체의 전기적 내구성 실험장치를 구성하여, ER유체의 사용시간과 ER유체에 가하는 전기장의 사이클 수에 따른 ER유체의 역학적 특성 변화를 규명하였다.

2. ER유체의 거동특성

ER유체는 부하되는 전기장의 강도에 따라 역학적 성질이 변하는 유체를 총칭하는 것으로 비전도성의 용액 중에 강한 전도성 입자를 분산시킨 콜로이드(colloid) 용액이다. ER유체에 전기장을 부과하면 유체 중에 분산된 입자가 유도분극을 일으켜, 양쪽의 전극을 향하여 전기장과 평행한 섬유상 구조의 고리를 형성함으로써 유체의 이동이나 외부 전단력에 대하여 저항을 하게 된다. ER유체는 전기장에 의하여 항복응력과 가점성이 변하며, 그 반응은 매우 신속하다. 아울러 전기장 부하에 대하여 가역적인 반응을 나타내며, 부과되는 전기장의 크기에 따라 연속적이고 국부적으로 제어 가능한 특성을 가지고 있다.

ER유체의 전기장 부하에 따른 반응을 미시적 관점에서 보면 Fig. 1에 도시된 바와 같이 전기장 무 부하시에는 ER유체 중의 입자가 양쪽의 전극사이에서 자유로이 이동을 하기 때문에 뉴우토니안(Newtonian) 유체와 같은 등방성(isotropic)의 거동을 나타낸다. 전기장을 ER유체에 부과하면 유체 중에 분산된 입자가 유도 분극을 일으켜 전극을 향하는 다수의 섬유상 조직과 같은 클러스터를 형성하고, 클러스터내의 입자들의 결합력에 의하여 이방성(anisotropic) 거동⁽⁹⁾을 갖게 된다. 전기장 부하시, 형성된 클러스터들의 결합력에 의하여 항복응력 전까지는 비유동성이지만 항복응력보다 외부에서 가해지는 전단력의 세기가 커지면 유동이 시작되는 빙햄(Bingham) 유체의

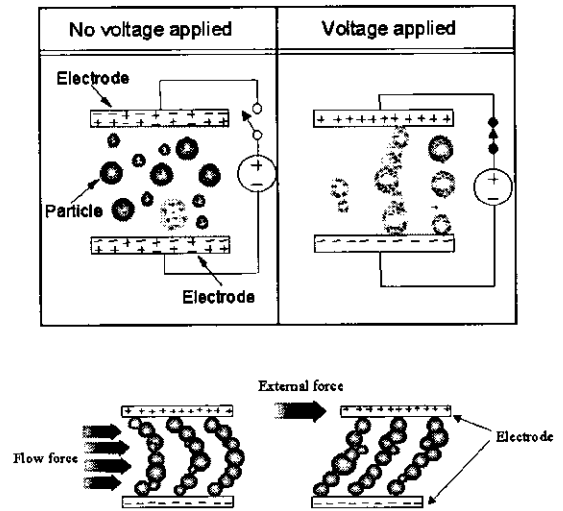


Fig. 1 Micro structure of the ER fluids

거동⁽¹⁰⁾을 한다. 전기장 부하에 따른 ER유체의 반응은 가역적이며 반응속도는 1~5ms정도이다.

ER유체는 부하되는 전기장의 크기에 따라 유체의 항복응력이 증가하는 특성이 있다. ER유체의 항복응력 τ_y 는 전기장 E 에 지수적인 비례 관계를 보유하며 아래식과 같이 Bingham 거동⁽⁶⁾을 한다.

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

여기서 τ 는 유체의 전단응력, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비이며 η 는 유체의 점도를 나타낸다. τ_y 는 유체의 항복응력을 표현하는 것이며 전기장(E)과 더불어 지수 함수적으로 증가한다. 여기서 α 와 β 는 ER유체의 용매 종류, 입자 종류, 입자 증량비와 용매의 점성 등 ER유체의 조성 조건에 영향을 받는 고유상수이다.

그리고, 식(1)에서 나타난 바와 같이 ER유체는 외부에서 부하되는 전기장에 대하여 함수 관계를 갖기 때문에 전하나 이온의 이동에 영향을 미치는 입자의 결정 구조, 용매와 입자 사이의 투자율(permittivity)의 차이, 입자 내의 불순물 및 입자 내의 수분 함유량에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다⁽¹¹⁾. 따라서 식(1)과 같은 함수식으로부터 전기장의 증가와 외부에서 가해지는 전단 속도비의 증가에 따른 유체의 전단응력과 항복응력 증가를 예측할 수 있다.

3. ER유체의 역학적 특성 실험

3.1 실험장치

ER유체를 작동매체로 하여 유압회로를 구성할 경우, 기존 밸브장치의 이동기구의 복잡성에서 벗어나 압력과 유량을 조절하기 위한 전극(electrode)만을 필요로 하게 되므로 작동기 및 밸브가 하나의 단일 구조로 형성되어 있어 설계의 단순화를 도모할 수 있다. 제어 측면에서는 ER유체의 항복응력을 제어함으로써 대상 시스템의 속도와 위치제어가 동시에 가능하게 되며, 제어 알고리즘 구성 시 연속 가변성이 있기 때문에 신뢰성과 정밀도가 높은 제어 이론을 도입할 수 있다.

전기장 부하에 의한 ER유체의 특성 변화 및 전극 변화를 실험하기 위하여 Fig. 2와 같이 실제의 유압 회로 시스템과 동일하게 실험장치를 제작하였다. 실험 장치는 ER유체의 유동을 발생시키기 위한 펌프와 펌프를 가동시키기 위한 모터, ER유체에 전기장을 부과할 수 있는 전극부와 고전압 공급장치로 구성되어 있다. ER유체를 순환시키기 위한 펌프는 1회전 당 1.7cc의 용량을 갖는 기어 펌프를 사용하였으며, 분당 2l의 유량을 순환시킬 수 있도록 D.C. 모터(D.C. reel motor, Sanyo)를 이용하여 펌프의 회전수를 일정하게 고정하였다. ER유체에 전기장을 부과하기 위한 전극부는 단일 평판구조를 갖는 밸브 형태이고, 전극의 크기는 16×10mm의 평판 형태로 하였으며, 유로의 역할과 ER유체에 전기장을 형성하기 위한 전극의 간극은 1mm이다.

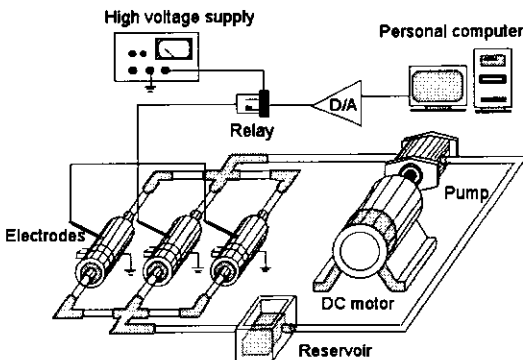


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

3.2 전기장의 반복사이클

ER유체에 부과되는 전기장의 반복 사이클은 10만 사이

클 이하에서는 1만, 2만, 4만 사이클로 증가시켰으며, 10만 사이클 이후에는 10만, 20만, 40만, 60만 사이클까지 부과하였다. 부과되는 전기장의 형태는 on-off형태로 하여 3Hz의 주기를 갖도록 하였다. ER밸브의 양단에 압력 센서를 부착시켜 지정된 반복 사이클에서의 압력 변화를 측정하고자 하였으나, 실험장치 구성 시 배관을 일반적인 공압용 배관을 사용하였기 때문에 압력 손실이 발생하였다. 따라서 지정된 반복 사이클에서 전기장 부하에 의한 압력 변화를 정확하게 측정할 수 없어 매회 지정된 사이클 이후, ER유체를 수거하여 ER유체의 빙행특성과 전류밀도 변화를 측정하였다. ER유체의 전기장의 세기에 따른 빙행 특성을 측정하기 위하여 Searl형의 상용 점도계(VT500, HAKKE)를 사용하였다. 바깥쪽 실린더의 내경은 23mm, 안쪽 실린더의 직경은 21mm이다. ER유체에 외력을 부과하기 위하여 안쪽 실린더를 회전시켰으며 부과하는 전기장은 0.5kV/mm~3kV/mm까지 0.5kV/mm씩 상승시켰고, 전단속도비는 0~700/s 범위 내에서 변화시켰다

3.3 ER유체의 특성

ER유체는 전도성 입자의 종류를 달리하여 두 가지로 조성하였다. 하나는 아라빅 검(arabic gum)을 사용한 ITA25이고, 다른 하나는 MC(methyl cellulose)를 사용한 ITMC25이다. ITA25과 ITMC25의 용매에 대한 입자의 중량비는 각각 25%로 하였다. 비전도성의 용매로는 트랜스포머 오일을 사용하였으며, 트랜스포머 오일의 점도는 10cs, 절연계수는 12kV/mm이다. 아라빅 검과 MC 입자의 크기는 입도분석기(PARTICLE SIZER ANALY-SETTE 22, FRITTSCH)로 측정하였으며, 아라빅 검 입자의 평균크기는 22.4 μ m, M.C. 입자의 평균크기는 99.04 μ m이다.

4. ER유체의 역학적 특성 실험결과 및 고찰

4.1 전단력 분포의 평가

지속적이고 반복적으로 전기장을 부과할 수 있는 실험 장치를 사용하여, 전기장 부하에 따른 ER유체의 특성변화는 다음과 같다. 전단속도비에 대한 전단력의 분석을 위한 ITA25 ER유체의 내구성 실험결과를 Fig. 3에 나타냈다. 사용하기 이전의 ITA25의 전기장 부하에 따른 전단력의 분포는 Fig. 3의 (a)그림과 같이 전기장의 세기에 비례하여 증가하는 형태이다. 2.5kV/mm이상의 전기장을 부과한 경우, 50/s 이상의 전단속도비 영역에서 전단속도비가

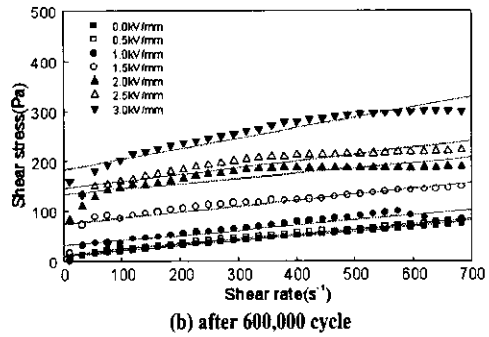
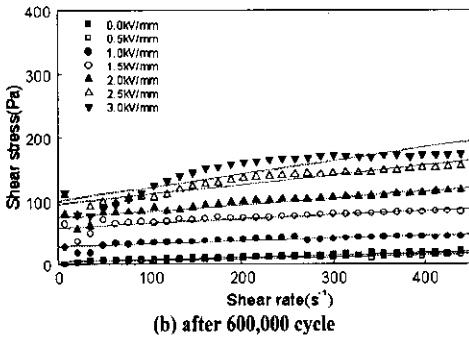
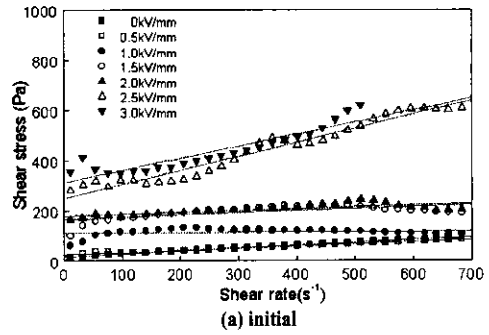
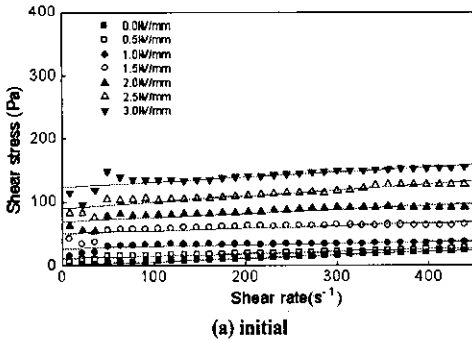


Fig. 3 Shear stress of ITA25 ER fluid with different electric durability test

Fig. 4 Shear stress of ITMC25 ER fluid with different electric durability test

증가하여도 전단력은 변하지 않고 일정한 크기를 나타내고 있다. 60만 번의 전기장을 부하한 후 ITA25 ER유체의 빙햄특성의 실험결과는 Fig. 3의 (b)와 같다. 전기장을 부하한 ER유체는 2.0kV/mm 이하의 낮은 전기장에서 내구성 실험을 행하기 이전의 ER유체의 경우와 유사한 거동을 나타내지만, 2.5kV/mm이상에서는 다른 경향을 보여준다. 유동의 시작되는 부근에서 사용하기 이전의 ER유체와 비슷한 크기의 전단력을 나타낸 후 감소하지만, 50/s 전단 속도비 이후는 전단력이 증가하였다. 그 이후 150/s 이상의 전단속도비 영역에서 전단 속도비 증가에 따른 전단력의 변화가 작게 나타나고 있다. 이와 같이 전기장 부하에 따른 전단력 분포가 다르게 나타나는 것은 입자들의 유도분극의 세기에 의존하여 입자들간의 결합력이 변하고, 실험장치의 기어 펌프에 의하여 입자 크기가 작아졌기 때문으로 생각된다.

Fig. 4에는 ITMC25 ER유체의 유동곡선(flow curve)의 변화를 나타냈다. Fig. 4의 (a)그림과 같이 내구성 실험을 행하기 이전의 ITMC25 ER유체는 전기장 부하에 따른 동적 항복응력의 변화가 매우 크며, 2.5 kV/mm이상에서

는 전단속도비 증가에 따른 전단력의 분포가 다소 불규칙하게 나타나고 있다. 그러나, 60만 번의 전기장을 부하한 ITMC25 ER유체는 Fig. 4의 (b)와 같이 전기장 세기에 따른 동적 항복응력은 작게 나타나며, 전단속도비와 비례하여 전단력이 증가하였다. 이는 ITA25 ER유체의 경우와 유사하게, 기어 펌프에 의하여 입자들이 매우 작게 분쇄되어 ER효과를 나타내는 메카니즘에 변화가 생겼기 때문으로 사료된다.

4.2 Bingham 특성변화

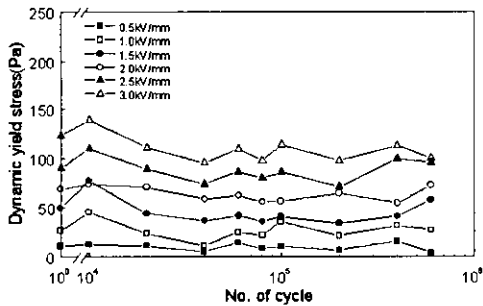
유압회로 내의 운동부위에 의한 입자 변형과 반복적인 전기장 부하에 따른 ITA25 ER유체의 역학적 특성변화는 Fig. 5이다. Fig. 5의 (a)와 같이 아라빅 검체 ER유체인 ITA25의 내구성 실험 결과는, 사용하는 시간과 부하하는 전기장의 사이클 수가 증가하면 동적 항복응력이 약간씩 변하는 경향을 나타내는데, 이는 ER유체의 특성변화에 의한 것이 아니라 실험 장치에서 발생하는 누유에 의해서 일정한 조성비를 유지하지 못하기 때문이다. Fig. 5의 (b)에는 ITA25 ER유체의 내구성 실험을 한 후,

ER효과를 나타내는데 소요되는 전류밀도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 6만 사이클 이전에는 내구성 실험을 하기 이전의 ER유체와 비슷한 크기의 전류밀도를 나타내지만, 6만 사이클 이후에 점진적으로 전류밀도의 크기가 감소하는 양상을 나타내고 있다. 이것은 입자들이 펌프에 의하여 분쇄되어 크기가 작아져서 분극화하는데 소요되는 전력 소모가 감소하기 때문으로 판단된다.

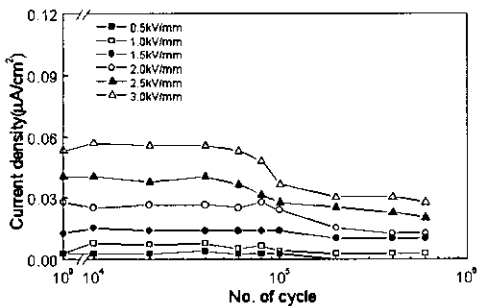
지속적이고 반복적인 전기장의 사이클 증가에 대한 M.C.계 ER유체인 ITMC25의 동적 항복응력 변화를 Fig. 6의 (a)에 나타냈다. 10만 사이클 미만의 전기장 사이클 부하 시에는 내구성 실험을 하기 이전의 ER유체의 동적 항복응력보다 높은 값을 나타낸 후 감소하는 거동을 보이며 40만 사이클 이후 초기 ER유체의 절반 정도의 크기를 나타낸다. ITMC25 조성에 사용된 M.C.입자는 초기에는 바늘 모양으로 길게 생긴 모양이었던 것이 펌프 내 기어의 상대운동에 의하여 잘게 부서져 타원의 형태를 갖게 된다. 40만 사이클 이후에 동적 항복응력이 작게 나타나

는 것은, 아라빅 검게 ITA25의 경우와 마찬가지로 기어 펌프에 의해 입자들이 분쇄되어 전기장 부하 시 입자 내의 분극화 정도가 약화되어 결합력이 작아지기 때문이다. ER효과를 발생하는데 있어 입자의 크기도 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있는데, 이것은 Boissy⁽¹¹⁾ 등이 발표한 바와 같이 D.C. 전기장을 가하는 경우에 입자는 커패시터와 유사한 메카니즘에 의하여 ER효과를 발생하기 때문에 입자 내의 이동 가능한 전하의 양에 영향을 받기 때문이다. 이러한 현상은 Fig. 6의 (b)에 도시된 전류밀도의 크기를 비교하면 확인할 수 있다. 그림과 같이 6만 사이클까지는 전류밀도가 증가하지만, 10만 사이클 이후에는 감소하고 있다.

이와 같이 10만 사이클 이전에 높은 전류밀도를 나타내는 것은 입자가 ER효과를 나타내기 알맞은 사이즈이기 때문이며, 40만 사이클 이후에 낮은 전류밀도를 나타내는 것은 입자들이 더욱 작게 분쇄되어 전기장 부하 시 분극화하는데 에너지가 적게 소요되기 때문으로 사료된다.

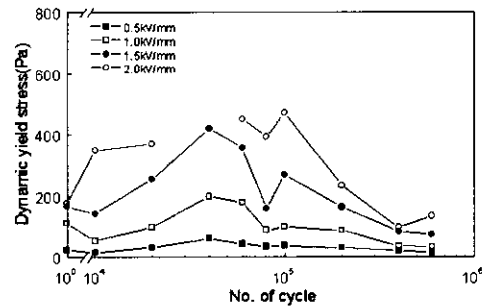


(a) Dynamic yield stress

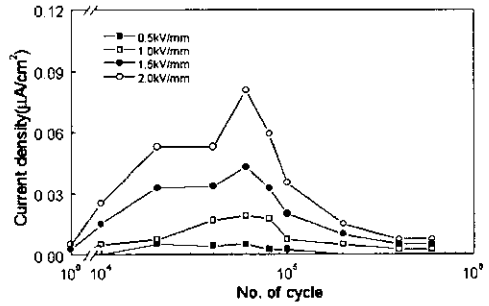


(b) Current density

Fig. 5 Bingham properties of ITA25 with different electric durability test



(a) Dynamic yield stress



(b) Current density

Fig. 6 Bingham properties of ITMC25 with different electric durability test

4.3 현미경 관찰 결과

결과의 타당성을 가시적으로 검증하기 위해, ITA25 ER 유체의 내구성 실험 이전과 60만 번의 전기장을 부하한 후의 입자들의 현미경 사진을 Fig. 7에 나타냈다. Fig. 7의 (a)사진에 나타난 바와 같이 내구성 실험 이전의 아라빅 검 입자들은 구형이며 양쪽의 전극을 향하여 여러 개의 입자들이 체인 모양의 클러스터를 형성함을 확인할 수 있다. 60만 번의 전기장을 반복적으로 부하한 ER유체는 Fig. 7의 (b)와 같이 입자가 분쇄되어 매우 작게 나타나고 있다. 이러한 입자에 3kV/mm의 전기장을 부하하면 내구성 실험을 행하기 이전의 ER유체와 유사한 형태인 여러 개의 체인들이 모여 기둥 형태의 클러스터를 형성하고, 양쪽의 전극에 많은 입자들이 모여 클러스터의 기초를 구축하고 있다. 내구성 실험 후 ER유체에 전기장을 부과하였을 경우, 양쪽의 전극에 많은 입자들이 분포하는 것은 펄프와의 상대운동에 의하여 입자가 분쇄되어 크기가 작아지고 또한, 전기장에 의하여 발생하는 입자 내부의 전하나 이온의 재배열에 의한 분자구조의 변화 때문으로 생각된다.



(a) Before the test



(b) After 600,000 cycle

Fig. 7 The clusters of the ITA25 at 3kV/mm.

다. 이러한 분자구조의 변화와 입자 크기의 변화는 전기장 부하시 전기영동현상이 일어나 전극쪽으로 입자들이 편중되어 분포하는 현상을 나타낼 것으로 예측할 수 있다.

5. 결론

아라빅 검계와 MC계의 ER유체들을 중량비 25%로 각각 조성하였으며 유압회로와 유사한 구조의 실험장치를 구성하여 연구한 결과는 다음과 같다.

- (1) ER유체를 실질적인 유압기기에 적용하기 위하여 고려하여야 할 사항에 대한 특성을 파악할 수 있었다.
- (2) 지속적이고 반복적인 전기장 부하에 의한 ER유체의 방핵특성 변화는 실험결과 아라빅검계 ER유체 경우, 60만 사이클 이후에도 초기의 항복응력과 거의 비슷한 값이며 전류밀도 변화도 거의 나타나지 않는다.
- (3) MC계 ER유체의 경우는, 부과하는 전기장 사이클의 증가에 의존하여 역학적 특성 변화가 현저하게 나타났다.
- (4) ER유체에 가하는 전기장의 사이클 수에 따른 ER유체의 역학적 특성변화를 고찰하여 ER유체의 사용수명에 대한 기초 자료를 제시하였다.

아울러 향후 ER유체의 실용화 및 응용장치의 개발을 위해서는 침전률을 줄이기 위한 연구와 혹독한 운전 조건 하에서도 적용 가능한 새로운 ER유체의 개발이 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 1999년도 삼척대학교 학술연구 조성비에 의하여 연구된 것으로 관계자 제위에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) A. R. Plummer and N. D. Vaughan, "Robust Adaptive Control for Hydraulic Servo-systems", Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 118, pp. 237~244, 1996.
- (2) 남무호, "ER시트 댐퍼를 사용한 상용차 운전석의 실험적 성능해석 및 진동해석", 한국공작기계학회지 제7권, 제3호, pp. 7~13, 1998.

- (3) 남무호, "MR 유체를 이용한 운전석 댐퍼의 성능특성", 한국공작기계학회지 제9권, 제5호, pp. 127~134, 2000.
- (4) D. L. Klass and T. W. Martinek, "Electroviscous Fluids. II. Rheological Properties", J. Appl. Physics, Vol. 38, No. 1, pp. 75~80, 1967.
- (5) T. G. Duclos, "An Externally Tunable Hydraulic Mount Which Uses Electro-Rheological Fluid", SAE Technical Paper Series 870963, 1987.
- (6) A. J. Simmonds, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", IEE Proceeding-D, Vol. 138, No. 4, pp. 400~404, 1991.
- (7) D. A. Brooks, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", Journal of Modern Physics, Vol. 6, pp. 2705~2730, 1992.
- (8) 이효정, 김기선, 정달도, 최승복, 정재천, "전기유동유체를 이용한 실린더형 밸브의 성능 고찰", 한국정밀공학회지, 제8권, 제4호, pp. 428~432, 1994.
- (9) 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 Fluids, pp. 477~489, 1994.
- (10) M. Whittle, R. Firoozian and W. A. Bullough, "Decomposition of the Pressure in an ER Valve Control System", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 5, No. 1, pp. 105~111, 1994.
- (11) C. Boissy, P. Atten, and J. N. Foulc, "On the Role of Conductivities and Frequency in the Electrorheological Effect," Proc. of the 5th Int. Cof. on Electro-Rheological Fluids, Magneto-Rheological Suspensions and Associated technology, edited by W. A. Bulough, World Scientific, Singapore, pp. 756~763, 1995.