

지능형 유압시스템을 위한 메틸 셀룰로이드 성분 ER유체의 내구성평가

김옥삼* · 박우철**

Durability Estimation for ER Fluids of Methyl Cellulose Component in Smart Hydraulic Systems

O-S Kim* · W-C Park**

Key words : Electro-rheological fluids(전기 유동유체:ER유체), Methyl cellulose(메틸 셀룰로이드: MC), Dynamic yield shear stress(동적 항복 전단응력), Surface roughness(표면 거칠기), Durability estimation (내구성 평가)

Abstract

The electro-rheological(ER) fluids for smart hydraulic system are a class of colloidal dispersion which exhibit large reversible changes in their rheological behavior when they are subjected to external electrical fields. This paper presents experimental results on material properties of an ER fluids subjected to electrical fatigues. As a first step, ER fluid is made of methyl cellulose(MC) choosing 25% of particle weight-concentration. Following the construction of test mechanism for durability estimation, the dynamic yield shear stress and the current density for the ER fluids of MC component are experimentally distilled as a function of electric field. In addition, the surface roughness of the employed electrode are evaluated as a function of the number of the electric-field cycles.

1. 서 론

기존 유압시스템의 경우, 기계적 요소로 벨브를 개폐했기 때문에 원칙적으로 응답성 저하가 불가피했다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 노력의 일환으로, 피드백(feedback) 제어와 연계된 스마트 유압시스템에 관한 연구가 수행되어왔다¹⁾. 그러나

기본 메카니즘에 기인한 응답지연과 비선형성은 유압시스템의 고속화와 고정밀화에 가장 큰 걸림돌이 되고 있다. 이와 같은 이유로 새로운 차원의 유압 서보시스템에 관한 개발작업이 이루어지고 있으며, 신소재 재료의 하나인 전기유동(Electro-Rheological : ER)유체를 이용한 지능형 유압시스템에 대한 연구가 진행되었다^{2,3)}. ER유체는 인가

* 여주대학교 기계공학과
** 삼척대학교 자동차공학과

되는 전기장의 세기에 따라 역학적 강도가 변하는 유체를 측정하는 것으로, 비전도성 용액에 강한 전도성 입자를 분산시킨 콜로이드(colloid) 용액이다. 인가되는 전기장을 제어하면 유체 중에 분산된 입자가 유도분극을 일으켜, 양쪽전극 방향으로 섬유상 구조의 클러스터를 형성함으로써 흐름이나 외부에서 가해지는 전단력에 대하여 지능이 있는 것처럼 선택적인 저항력을 보유하게 된다. 전기장의 세기에 따라 항복응력과 점성이 변하며, 가역적으로 제어할 수 있으므로 지능형 유압시스템을 구성하는데 적당한 특성을 지니고 있다. 아울러, 부가적인 구동장치가 필요치 않아 응용장치의 구조설계의 단순화를 가져올 수 있으며, 상 변화에 요구되는 소비전력도 낮은 장점이 있다¹⁴⁾.

ER유체를 이용한 유압밸브에 대한 연구는 ER유체의 고유특성과 연계해 볼 때, 지능을 부여하기 가장 적합한 응용장치로 인식되어 많은 진전이 있었다. Simmonds¹⁵⁾는 평판형 ER밸브를 제안하여 전기장에 따른 압력강하를 고찰하였고, 이를 바탕으로 실용화를 위한 문제점과 해결방안을 제시하였다. ER밸브를 이용한 유압회로를 구성하여 Brooks¹⁶⁾가 성능시험을 수행하였다. Nakano 등¹⁷⁾은 평판형 밸브를 통과하는 ER유체를 하겐-포아젤(Hagen-Poiseuille)흐름으로 해석하고, 압력강하에 대한 과도응답과 압축성 효과를 분석하였다. 전기장 부하에 따른 압력강하의 응답특성으로부터 선행 2차 밸브시스템 모델링을 Whittle 등¹⁸⁾이 시도하여 실험적으로 타당성을 입증하였다. 한편 국내에서도 다단 실린더형 ER밸브를 제안하여, 전기장 크기와 유량에 따른 압력강하를 실험적으로 진행한 연구가 있었다¹⁹⁾. 그러나 ER유체를 응용장치에 적용하는 과정에는 미세 관점의 작동구조 규명, 전기장 강도에 대한 제어의 연관성, 유체의 안정성, 마모와 피로 및 침전현상 등 해결해야 할 문제점들이 많다.

따라서 본 연구는 유기화합물인 메틸 셀룰로이드(methyl cellulose, MC)성분의 ER유체를 지능형 유압시스템에 적용하기 위하여, 시스템과 유사한 내구성 실험장치를 구성하고, 여러 가지 기계적 성질을 실험적으로 평가하였다. 아울러 유압시스템에 지능을 부여하기 위해 사용시간과 인가되는

전기장의 사이클 수에 따라 ER유체의 역학적 특성변화를 고찰하였다. 그리고 ER유체 응용장치의 설계와 제작과정에 필수적으로 사용하는 다양한 소재의 전극(electrode)선택에 대한 기초자료를 마련하고자 한다.

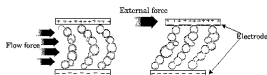
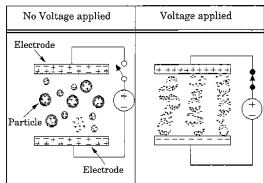


Fig. 1 Micro structures of the ER fluids of MC component

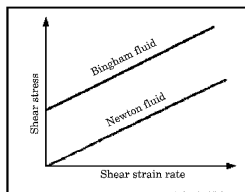


Fig. 2 A Bingham fluid for the isothermal constitutive behavior of a typical ER fluid

2. MC계 ER유체의 거동

MC성분 ER유체는 비전도성 용매와 전도성 분산제 입자가 혼합되어 있어 반복적으로 장시간 사용하였을 경우, 조성 입자들에 의해 응용장치의 작동부는 마모 등의 문제가 발생할 수 있다. 작동부에 의해 ER유체 입자들의 모양과 크기 그리고 용매 자체의 점도와 극성도 변화되어 역학적 특성이 달라질 것으로 예측된다. ER유체의 물리적 특성은 전기장을 인가하지 않을 때는 액체상태로 존재하나, 인가 시에는 고체상태로 상 변화를 하는 것이다. Fig. 1에 도시된 바와 같이 전기장 인가에 따른 반응을 미시적 관점에서 보면, 전기장을 인가하지 않았을 때는 입자가 양쪽의 전극사이에서 자유로이 이동하여 뉴턴유체(Newton fluid)와 같은 등방성(isotropic) 흐름양상을 보여준다. 전기장을 인가하면 유체 중에 분산된 입자가 유도분극을 일으켜 전극을 향하는 쌍극자 쌍극의 클러스터를 형성하고, 클러스터 내 입자들의 결합력에 의하여 이방성(anisotropic) 특성을 갖게 된다. 형성된 클러스터들의 결합력에 의하여 항복응력 전까지는 유동성을 보이지 않다가, Fig. 2와 같이 외부에서 가해지는 전단력 세기가 항복 전단응력을 초과하면 흐름이 시작되는 빙행(Bingham) 유체 거동을 한다.

ER유체는 전기장 세기에 따라 항복응력이 증가하는 특성을 보이며, 그 거동이 매우 복잡하다. MC성분 ER유체의 항복 전단응력 τ_y 는 전기장 E 의 지수에 비례하는 관계가 성립하고 있으며, 아래와 같이 빙행유체의 거동을 하는 것으로 알려져 있다.

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

여기서 τ 는 유체의 전단응력, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비이며 η 는 유체의 점도를 나타낸다. α 와 β 는 ER유체의 용매종류, 입자종류, 입자 중량비와 용매의 점성 등의 조성조건에 영향을 받은 고유상수들이다. 식(1)과 같이 MC계 ER유체는 인가되는 전기장에 함수관계가 성립하기 때문에 전하와 이온의 이동에 영향을 미치는 입자의 결정구조, 용매와 입자 사이의 투과율(permission)의 편차, 분산물 및 수분 함유량 등에 많은 영향을 받는다¹⁾. 식(1)로부터

전기장과 전단속도비의 증가에 따라 MC계 유체의 항복 전단응력이 상승할 것을 예상할 수 있다. ER유체의 상변화를 위하여 요구되는 전장의 크기는 약 1~3 kV/mm이나 전류밀도가 약 $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 이하이기 때문에 상변화를 위해 요구되는 전력은 매우 낮다. 그리고 전장에 대한 유체의 반응속도는 1ms이하이며, 최대 반응주파수는 약 12kHz이다.

3. 실험장치의 구성 및 방법

3.1 ER유체의 내구성 실험장치

MC계 ER유체를 작동매체로 지능형 유압시스템을 구성할 경우는, 기존 밸브장치의 복잡성을 벗어나 압력과 유량을 조절하기 위한 전극반을 필요하므로 작동기(actuator)와 밸브가 하나의 구조로 시스템화되어 설계의 단순화를 도모할 수 있다. 또한, ER유체의 항복 전단응력을 전기장의 세기로 제어함으로써 유압시스템의 신속한 응답속도와 위치제어가 동시에 가능하여 제어 알고리즘 작성 시 신뢰성과 정밀성을 확보할 수 있다.

지능형 유압시스템에서 MC계 ER유체의 특성 및 전극변화의 양상을 분석하기 위하여 Fig. 3과 같이 실험장치를 제작하였다. 실험장치와 연결된 고전압 전력공급기 (high voltage power supply)는 (Trek(주), model CTM-2)를 사용하여 전류를 0.5mA로 고정시킨후 요구되는 전기장을 온-오프 형태로 공급한다. 전극(electrode)의 운동신호 발생기에서 나온 일정한 주파수를 GP-IB를 장착한 주파수 카운터(Kotronic, FC-865A)를 이용하여 계측하는데, 정확도는 소트러거 오차내이다. 장치는 ER유체의 유동을 발생시키기 위한 펌프와 구동모터, ER유체에 전기장을 인가할 수 있는 전극, D/A 컨버터 및 피스널 컴퓨터 등으로 구성되었다. ER유체를 순환시키기 위한 펌프는 1회전 당 1.7cc의 용량을 갖는 기어펌프(gear pump)를 사용하였으며, 분당 2 l의 용량을 순환시킬 수 있도록 DC 모터(DC reel motor, Sanyo) 회전수를 일정하게 하였다. 전극 내부에 있는 ER유체의 바깥쪽 실린더 내경은 23mm이고, 안쪽 실린더 직경은 21mm이다.

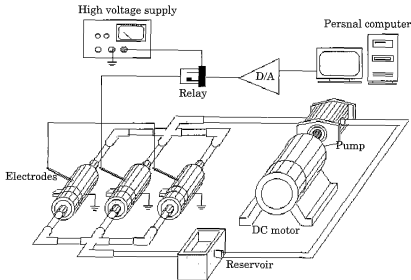


Fig. 3 Schematic diagram of the experimental apparatus

3.2 전기장의 전극과 전도성 용매

전기장을 인가하는 전극 크기는 $16 \times 10 \text{mm}$ 의 단일 평판구조 형태이고, 유로의 역할과 ER유체에 전기장을 형성하기 위한 간격은 1mm 이다. 전극재질에 따른 영향을 살펴보기 위하여 스테인레스, 구리 및 알루미늄 등으로 전극을 변화시켰다. 전극표면의 조건을 일정하게 하기 위하여 #1200 번 사포를 사용하여 긴식 연마하였다. 실험 후, 사용된 전극을 수거하여 전극표면의 광택과 색상변화를 금속현미경으로 관찰하였다. 전극의 거칠기는 표면 거칠기 측정기(Surfest 402, Mitutoyo)를 이용하여 측정하였으며 그 크기는 중심선 평균 거칠기(R_a)로 표시하였다.

사용된 ER유체는 탄소, 수소 및 산소로 이루어진 유기 화합물 전도성 입자인 MC 성분인 ITMC25이다. ITMC25 용매에 대한 입자의 중량비는 25%로 하였고, 비전도성 용매는 트랜스포머 오일(transformer oil)을 이용하였다. 상용 점도계(VT500, Hakke)로 측정한 트랜스포머 오일의 점도는 10cSt 이다. 실험에 사용된 MC계 입자의 크기는 입도분석기(Particle sizer analysette 22, Fritsch)로 측정하였으며, 평균크기는 100nm 였다.

3.3 ER유체의 내구성 실험방법

지능형 유압시스템에 인가되는 전기장 사이클은 10만 사이클 이하에서는 1만 사이클 간격으로 증가시켰으며, 10만 사이클 이상은 10만간격으로 60만 사이클까지 반복 인가하였다. 전기장의 형태는 on-off형태의 3Hz의 주기를 갖도록 하였다. 유압시스템의 양단에 압력센서를 부착시켜 지정한 반복 사이클에서 압력변화를 매번 측정하고자 하였으나, 실험장치 구성 시 공압용 배관을 사용함으로써 발생된 압력손실로, 입자의 사이클에서 정확한 압력변화를 측정할 수 없었다. 전기장은 0.5kV/mm 부터 3kV/mm 까지 0.5kV/mm 씩 증가시켰으며, 외벽은 전극내부의 안쪽 실린더를 회전하여, 전단속도비(shear rate)를 $0 \sim 700 \text{s}^{-1}$ 까지 다양하게 변화시킨 후 ER유체를 수거하여 특성변화를 실험하였다. ER유체로부터 전달되는 토크를 측정하기 위하여 안쪽 실린더의 상부에 스트레인 게이지를 부착하였는데 순수비틀림이 작용하는 것으로 가정하여 휘스트브릿지를 형성하였다. 형성된 전극을 통하여 전기장을 가하면서 바깥쪽 실린더를 회전시켜 ER유체로부터 전달되는 토크를 측정하여 전단력으로 환산하였다. 전단응력 특성의 평가는 전기장이 부족되어 있는 이원통형 회전점도계(주) Co-technic)를 이용하였다.

4. MC계 ER유체의 내구성해석 및 고찰

4.1 전단응력과 현미경 관찰

ITMC25 ER유체의 전단속도비에 대한 전단응력 분포변화는 Fig. 4에서 알 수 있다. 내구성 실험을 행하기 이전 ITMC25 전단응력 지동은, 전기장 세기가 3.0kV/mm까지 증가함에 따라 일정하게 상승하는 형태로 Fig. 4의 (a)그림과 같다. 2.0kV/mm까지 전기장을 인가했을 경우 펄속의 전단속도가 증가하여도 종속의 전단응력은 거의 변하지 않았다. 다만 2.5kV/mm이상 전기장을 인가하면 보다 급격한 기울기를 형성하면서 가파르게 상승하였다. 60만 사이클을 반복한 후, ITMC25의 병행복성 실험결과를 Fig. 4의 (b)그림에 나타냈다. 1.5kV/mm 이하 낮은 전기장에서는 실험을 행하기 이전 ER유체의 경우와 유사한 거

동이지만, 2.0kV/mm 이상은 보다 큰 전단응력 값으로 변화하는데 구배는 비슷한 양상을 보여준다. 그리고 2.0kV/mm 이상 전기장을 인가하면 2차원적인 곡선의 형태를 형성하지만 표준편차의 평가치가 오차한계 이내이므로 직선으로 판단하여도 무리가 없을 것으로 사료되었다. 실험초기의 50s¹ 전단속도비 이후는 전단응력이 증가한 후, 150s¹ 이상 영역에서는 전단응력의 변화를 작게 보여준다. 이와 같은 이유는 실험장치의 기어핀드에 의해 입자가 분쇄되어 MC계 성분의 ER유체 입자크기가 축소되어 유동분극 세기와 결합력이 변했기 때문으로 사료된다. 또한 이 결과 이후 실험의 오차 줄이기 위하여 같은 조건에서 7번씩 반복하여 측정하여 가장 큰 값과 작은 값을 배제한 다음, 나머지 5개의 데이터를 산술적으로 평균한 값을 회소자승법(least-squares method)으로 직선을 구하였다.

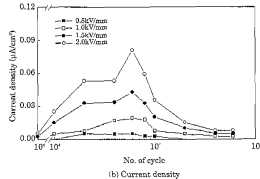
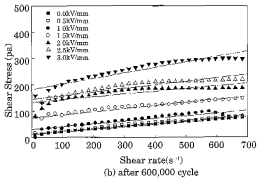
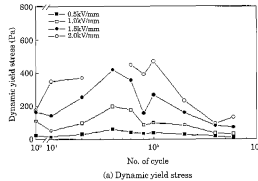
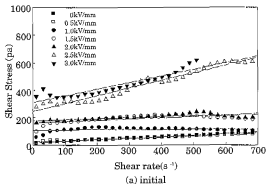
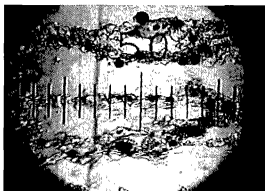


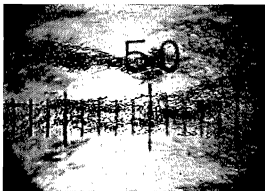
Fig. 4 Shear stress of ITMC25 ER fluid (different electric durability test)

Fig. 5 Bingham properties of ITMC25 with different electric durability test

전기장의 사이클 증가에 대한 ITMC25의 동적 항복응력과 전류밀도 변화를 세미로그(semi-log) 좌표계로 Fig. 5에 나타냈다. Fig. 5의 (a)그림은 10만 사이클까지 동적 항복응력이 높은 값으로 증가하는 양상을 알 수 있고, 40만 사이클 이후는 10만 사이클의 1/3 크기인 180Pa 이하를 보여준다. 그 이유는 ITMC25 조성에 사용된 MC계 입자는 초기에 바늘모양이었던 것이 펄프 내 기어의 상대 운동에 의하여 점차 길이가 짧아져 타원 형태로 변했기 때문이다. ER효과는 입자크기도 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있는데, 이것은 Boissy 등¹⁰⁾이 규명한 바와 같이 입자가 커패시터와 유사한 기능을 함으로서 이동가능한 전하의 양에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 이러한 현상은 Fig. 5의 (b)에 도시된 전류밀도의 변화경향을 비교하면 확인할 수 있다. ER유체의 항복응력 도출을 위해



(a) Before the test



(b) After 600,000 cycle

Photo. 1 The clusters of the ITMC25 at 3kV/mm

최적의 특성매개 변수인 전류밀도는 각종 요소들의 설계에서 동력의 소비를 정확하게 예측하는데 매우 중요한 역할을 한다. 인가되는 사이클 수와의 관계는 그림과 같이 2.0kV/mm의 전기장에서 6만 사이클까지는 전류밀도가 0.08 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 정도로 증가하지만, 이후는 감소하고 있다. 이와 같이 6만 사이클 이전에 높은 전류밀도를 나타내는 것은 이때 입자의 크기가 ER효과를 나타내기 위한 전하 이동이 활발한 크기였으며, 40만 사이클 이후에 낮은 전류밀도는 입자들이 분쇄되어 분극화 에너지 소요가 적기 때문이므로 이와 같은 제반 특성을 효과적으로 이용하면 지능형 유압시스템을 구축하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

MC 성분 ITMC25 ER유체의 내구성 실험 전후, 입자형상과 클러스터 변화 모습의 현미경 관찰사진이 Photo. 1이다. 이 사진의 (a)와 같이 실험을 행하기 이전 입자들은 구형(球形)이며, 양쪽전극을 향하여 체인모양의 클러스터를 형성하고 있는 것을 확인할 수 있다. 60만 사이클의 전기장용 인가한 ER유체는 Photo. 1의 (b)와 같이 입자가 분쇄되어 매우 작게 나타나고 있다. 3kV/mm의 전기장을 인가하면, 다수의 체인들이 모여 기동형태의 클러스터 집단을 형성하고 있다. 양쪽전극에 많은 입자들이 분포하는 것은 입자내부의 전하와 이온의 재배열에 의한 분자구조와 크기의 변화로 전극방향으로 편향되게 분포되는 현상이 발생하였다. 이와 같은 특성을 이용하여 흐름이나 외부에서 가해지는 전단력에 대하여, 선택적이며 가역적인 저항력을 제어하여 지능형 유압시스템을 구축할 수 있을 것이다.

4.2 전극 재질과 표면거칠기

MC 성분 ITMC25를 작동유로 사용한 경우 스테인레스, 구리 및 알루미늄 전극의 표면 거칠기 변화과정을 Fig. 6에 각각 나타냈다. 상단부 스테인레스 전극은, 전기장의 사이클이 증가하여도 전극표면 거칠기는 큰 변화가 없었다. 그러나 60만 사이클의 전기장을 인가한 후 전극표면에 부식된 작은 부분이 나타나는데, 이것은 MC 성분입자가 전극표면에 소착(燒着)되어 전기장 밀도변화에 의한 아아크가 발생하였기 때문으로 판측되었다. 중

양부의 구리전극은, 실험 전에는 중심선 평균(R_a)의 거칠기 크기가 $0.19\mu\text{m}$ 였지만 60만 사이클의 전기장을 인가한 후 약간 감소하였다. 전기장 사이클이 증가함에 따라 표면 거칠기의 크기가 감소하는 것은 첫째, ER유체와 구리전극과 접촉에 의한 반응 둘째, 인가하는 전기장과 구리전극의 반응 등으로 전극표면에 구리 산화막이 형성되었기 때문으로 생각된다. 하단부에 있는 알루미늄 전극의 경우, 전기장 사이클이 증가함에 따라 표면 거칠기의 요철이 다소 커져 R_a 는 $0.43\mu\text{m}$ 정도로 사용하기 이전보다 약간 크게 나타나고 있다. 이것은 표면 거칠기가 전체적으로 변화한 것이 아니라, 국부적으로 생긴 아이스크레에 의하여 측정하는 부위의 높이가 기준선 아래에 분포했기 때문이다. 알루미늄 전극은 60만 사이클의 전기장을 인가한 경우에도 아이스크레에 의한 부식은 발생하지 않았으나, 유동하는 ER유체와 직접접촉하는 전극의 표면전체에 산화피막이 발생하였다. 이러한 현상은 전기장과 유압회로 내에서 장시간 사용에 따른 ER유체의 온도상승 등의 영향으로 화학적 반응을 일으키기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 7은 연구결과와 타당성을 확보하기 위하여 구리와 알루미늄을 전극으로 사용한 경우, 아래

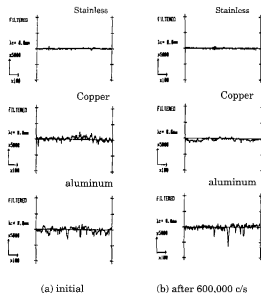


Fig. 6 Surface roughness of electrodes with ITMC25

검 성분의 ER유체인 ITA25와 MC계 ITMC25에 대하여 전기장 사이클에 따른 표면 거칠기의 변화 모양을 횡축을 세미로그 좌표로 표현한 그림이다. Fig. 7의 (a)그림에서는 구리를 전극으로 사용하는 경우 10만 사이클까지는 ITA25와 ITMC25가 약 $1.5\mu\text{m}$ 로 비슷하나, 20만 사이클 이후부터 ITMC25가 $0.3\mu\text{m}$ 로 표면 거칠기가 증가한 후 40만 사이클부터는 $0.2\mu\text{m}$ 이내에서 진정되었다. ITA25는 60만 사이클까지 비교적 $0.1\sim 0.2\mu\text{m}$ 이내의 균일한 표면 거칠기를 보여주고 있다. 알루미늄 전극은, Fig. 7의 (b)그림과 같이 ITA25와 ITMC25 ER유체를 작동유로 하여 20만 사이클 이후 거칠기의 요철 변화가 매우 크게 나타났다. 이와 같은 이유를 측정기 탐침이 산화피막 부분을 측정하였기 때문으로 사료되며, 이의 부분에서는 ITA25와 ITMC25의 거동과 경향이 양호하게 일치하므로 실험결과와 타당성을 입증할 수 있다. 그러나 알루미늄 전극은 강도와 경도가 다른 재질에 비하여 매

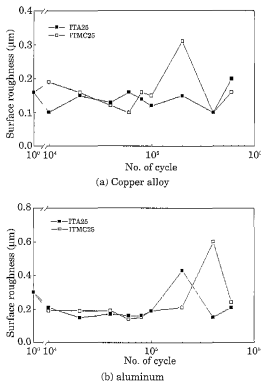


Fig. 7 Surface roughness with durability test

우연하기 때문에, 표면조도를 비교하기 위한 사포 연마작업에 의해서는 조도를 균일하게 맞추기가 어려운 정도 있었다.

5. 결 론

탄소, 수소 및 산소로 이루어진 유기화합물인 메틸 셀룰로오즈 성분의 ER유체를 지능형 유압시스템에 적용하기 위하여, 고려하여야 할 여러 가지 사항들에 대하여 실험적으로 특성을 파악하였다. 입자의 중량비를 25%로 조성하였으며, 전기장 사이클 수에 따른 ER유체의 역학적 특성변화와 사용수명에 대한 내구성평가를 하였다. MC계 ER유체를 이용한 응용장치의 설계 및 제작 시 전극선정의 기초자료를 제시하였다.

ITMC25 ER유체의 전단속도비에 대한 전단응력 분포는 전기장 세기가 증가함에 따라 일정하게 상승하여 동적 항복응력은 40만 사이클 이후 처음의 1/3 크기로 감소하였다. 6만 사이클에서 높은 전류밀도를 나타내는 것은, ER효과를 나타내기 위한 전하이동이 활발하게 일어나기에 알맞은 입자의 크기였으며, 이후 낮은 전류밀도는 입자들이 분쇄되어 소량의 분극화 에너지가 필요했기 때문이다. 전기장을 인가하던 기동형태의 플러스터 집단을 형성되고, 양쪽전극에 많은 입자들이 분포하는 것은 전하나 이온의 재배열에 의한 분자구조의 변화 때문이다. 이러한 특성을 효과적으로 사용하면 지능형 유압시스템을 구축하는데 도움이 될 것이다. 스테인레스 전극표면은 큰 변화가 없었으며 구리전극은 전기장 사이클이 증가함에 따라 표면 거칠기가 감소하였고, 알루미늄 전극은 유통하는 ER유체와 직접 접촉하는 전극표면에 산화피막이 발생하였다.

향후 MC 성분 ER유체의 실용화 및 지능형 유압시스템 등의 응용장치 개발을 위해서는 침전율을 줄일 수 있는 방안과 -45°C 이하와 120°C 이상의 온도 및 혹독한 운전조건에서도 기능발휘가 가능한 새로운 ER유체 개발이 후속되어야 할 것이다.

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) D. L. Klass, T. W. Martinek, "Electroviscous Fluids. I. Rheological Properties" *J. Appl. Physics*, Vol. 38, No. 1, pp. 75~80, 1967
- (3) T. G. Duclos, "An Externally Tunable Hydraulic Mount Which Uses Electro-Rheological Fluid", SAE Technical Paper Series 870963, 1987
- (4) T. C. Jordan and M. T. Shaw, "Electrorheology", *IEEE Trans. on Electrical Insulations* Vol. 24, No. 5, pp. 849~872, Oct. 1989
- (5) A. J. Simmonds, "Electro-Rheological Valves in a Hydraulic Circuit", *IEE Proceeding-D*, Vol. 138, No. 4, pp. 400~404, 1991.
- (6) D. A. Brooks, "Design and Development of Flow Based Electro-Rheological Devices", *Journal of Modern Physics*, Vol. 6, pp. 2705~2730, 1992.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 이효정, 김기선, 정달도, 최승복, 정제현, "전기 유통 유체를 이용한 일린더형 밸브의 성능 고찰", *한국정밀공학회지*, 제8권, 제4호, pp. 428~432, 1994.
- (10) C. Boissy, P. Atten, 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

저 자 소 개



김옥삼(金錚三)

1985년 인하대학교 공대 기계공학과 졸업. 1987년 동 대학원 석사(기계공학). 1991년 동 대학원 박사(기계공학). 1992년~현재, 여주대학교 기계·자동차공학부 부교수. 1996년~1997년 일본 도호대학 연구교수.



박우철(朴佑晳)

1987년 인하대학교 기계공학과 졸업. 1989년 동 대학원 석사(기계공학). 1997년 동 대학원 박사(기계공학). 1997년~현재, 삼척대학교 자동차공학과 조교수.