

자기 유변 유체와 영구 자석을 이용한 회전 액츄에이터의 개발

MR Rotary Brake Development with Permanent Magnet

⁰ 권순우*, 박영진**

*한국과학기술원 기계공학과 (Tel:+82-42-869-3076;Fax:+82-42-869-3095;E-mail:b612ksw@cais.kaist.ac.kr)

** 한국과학기술원 기계공학과 (Tel:+82-42-869-3036;Fax:+82-42-869-3095;E-mail:)

Abstract This paper presents the new MR rotary brake with a permanent magnet, based on the shear operating mode. Due to the permanent magnet, the MR rotary brake can give the nominal resistance to the external disturbance and give the fail safe capacity to the system even when the power supply is accidentally cut off. As we apply the positive or negative current to the electric magnet coil, the resistance torque of the MR rotary brake can be reduced to the value less than the nominal resistance or increased up to the magnetic saturation point

Keywords Magnetorheological(MR) fluid, Rotary brake, Shear mode, Demagnetization

1. 서론

1-1 연구 배경 및 목적

모터의 정밀 위치 제어를 위해서는 시스템의 감쇄력을 조절할 필요가 있고 이를 위하여 일반적으로 D-action 이 있는 제어를 사용한다. 일반적으로 타코미터 신호나 엔코더 신호를 미분한 신호를 궤환하여 사용하는데, 이러한 센서류의 측정 잡음 및 오차로 인하여 좋은 성능을 보장 받지 못하거나 고가의 고정밀도의 센서를 사용함으로써 전체 시스템의 가격이 상승하게 된다. 특히 모터를 사용하여 일정한 위치를 유지하려 할 경우 모터에 과부하가 걸리는 수가 있으므로 브레이크와 동시에 사용하는 경우가 많다. 따라서 영구자석을 이용한 MR 회전 브레이크를 개발하여 모터와 동시에 사용하면 속도의 측정 없이 물리적인 감쇄력을 시스템에 공급할 수 있고, 모터에 과부하를 걸지 않고, 일정 위치를 유지할 수 있으며, 특히 전원이 차단될 경우에도 어느 정도의 브레이크력을 시스템에 공급하여 fail-safe 성능을 부가할 수 있다.

MR 유체 이용 회전 액츄에이터는 자동차의 반 능동 스테빌라이저 바, 전차의 포신 능동 진동 감쇠, 로봇 팔 제어 등에 폭넓게 사용될 수 있어 군사적, 산업 경제적, 그리고 과학 기술적 측면에서 막대한 파급 효과를 기대할 수 있다.

본 논문에서는 기존의 영구자석을 이용한 MR 회전 브레이크들의 문제점인 영구자석의 반자화 현상(Demagnetization)을 지적, 이를 해결하기 위해 새로운 모델을 제시하고, 모의 실험을 통하여 제시된 모델의 타당성을 검증한다.

1-2 자기 유변 유체(Magneto-Rheological Fluid)

가제어성 유체란 주로 가변 자성 유체 (Magneto-Rheological Fluid, 이하 MR 유체)나 가변 전성 유체 (Electro-Rheological Fluid, 이하 ER 유체)를 의미하는 것으로 실리콘 오일 또는 미네

랄 오일 등과 같은 용매 속에 1 마이크로에서 100 마이크로 크기의 외부의 전기장 또는 자기장에 의해 강한 전도성 또는 자성을 가질 수 있는 상자성 입자들을 균질하게 분산시킨 용액이다.

ER 및 MR 유체의 역학적 성질은 전기장 또는 자기장 무부하는 뉴튼 유체의 성질을 가지게 되지만 전기장 또는 자기장 부하는 항복 응력을 갖는 빙햄(Bingham) 거동을 한다.

$$\tau = \eta_{MR}\dot{\gamma} + \tau_y(H) \quad (1-1)$$

ER 및 MR 유체의 고유 특성으로는 전기장 또는 자기장에 따른 항복 응력 제어성, 빠른 반응성, 액상과 고상간의 가역성 등을 들 수 있다. 이들 유체의 각각의 장단점을 살펴보면 ER 유체는 빠른 응답 속도와 전기장 형성이 용이하다는 장점을 가진 반면 낮은 강도와 좁은 사용 온도 범위 특히 고온에서의 급격한 성능 저하, 고전압 장치가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 MR 유체는 ER 유체에 비해 20~50 배 정도의 높은 항복 응력, 넓은 사용 온도 범위, 또한 기계 장치의 사용 중 유입되는 불순물에 대하여 상당히 둔감하다는 장점을 가지고 있다 응용 장치의 개발면에서는 일반적으로 MR 유체가 ER 유체에 비해 상당히 적은 양의 유체가 사용되어도 동일한 효과를 내기 때문에 MR 유체를 이용한 시스템은 소형화가 가능하다.

기존의 장치들이 전기 또는 기계적으로 제어되는 밸브나 메커니즘을 필요로 하여 유지나 보수가 필요한 반면 가제어성 유체를 사용할 경우, 이러한 부수적인 장치들이 필요 없어 기존의 장치에 비해 훨씬 간단하고, 빠르며 정확하게 제어 가능한 장점을 갖는다. 하지만 가제어성 유체의 특성상 상대 속도의 반대 방향으로만 힘 발생이 가능하게 되어 반능동 제어 장치로 주로 사용되어 전 능동 제어 장치에 비하여 성능이 약 반 정도 밖에 나오지 않는 단점을 내포하고 있다. [1][2][3]

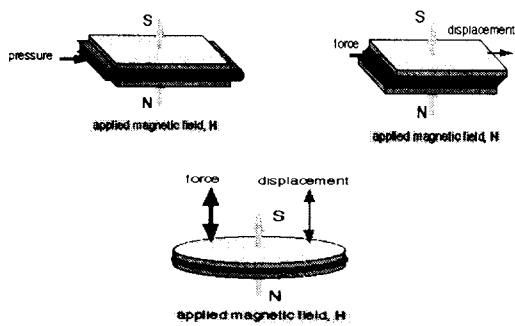


그림 1-2 MR 유체의 3 가지 작동 모드

Fig.1-2 Three basic operating modes

현재까지 MR 유체의 운동 모드로는 flow mode, shear mode, squeeze film mode 등 3 가지가 밝혀져 있다. 각각의 적용 예를 살펴 보면 flow mode 는 선형 댐퍼, 엔진 마운트, 충격 흡수기, 서보 밸브에 적용되어 진동을 차단하거나 줄이는 기구에 사용되고, shear mode 는 동력 전달에 사용되는 클러치, 브레이크, 잠금 장치 등에 사용되며, squeeze film mode 는 큰 힘을 낼 수는 있지만 작동 변위에 제한을 받기 때문에(최대 운동 변위가 2mm 이다.) 회전체나 미소 변위로 운동하는 장치의 변위를 제어하는데 주로 이용되고 있다.

2. 영구자석을 이용한 회전 액추에이터의 개발

2-1 기존 영구 자석을 이용한 MR 유체 장치들의 문제점

물질의 자성은 그것을 구성하고 있는 원자 혹은 분자가 갖고 있는 자기 모멘트에 의해 나타나며 이 자기 모멘트는 원자의 주위를 회전하는 전자의 궤도 운동이나 전자의 스핀(자전)에 의해 생기는 것으로, 이것을 전자기적으로 바라보면 미소한 전류 루프가 된다. 한편 현상론적인 관점에서 보면, 자석은 N,S 극의 쌍을 기본 요소로 쌍극자를 형성해 이 쌍극자가 자기모멘트를 형성한다는 모델이 이용된다.

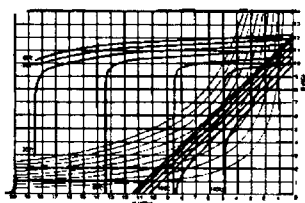


그림 2-1 영구자석의 B-H 특성 곡선

Fig. 2-1 B-H Characteristic curve of Permanent magnet

일반적으로 강자성체를 재료로 일정 형상을 만든 다음 외부에서 큰 자계 H_c 를 인가하여 강자성체내의 자기 모멘트를 일정한 한 방향으로 정렬시켜 영구자석을 만든다. 최근에 가장 많이 사용되는 영구자석의 재료로는 원자번호 60 번에 해당하는 Nd(Neodymium)와 철, 브롬을 섞어 만들고 일반적으로 Nd 영구자석이라고 부르며 B-H 특성 그래프는 그림 2-1 과 같다. 그래프에서 보면 알 수 있듯이 외부 자계 H가 영구자석의 보자력 H_c 보다 작게 가해지면 잔류 자속 밀도 B_r 는 거의 일정함을 알 수 있다. 그러나 외부에서 보자력 H_c 정도의 자계가 가해지면

영구자석 내의 자기 모멘트가 외부 자계의 영향으로 회전을 하게 되어 잔류 자속 밀도는 0 또는 상당히 작아지게 되어 영구자석의 성질을 잃어버리게 되고 H_c 보다 더 큰 자계가 가해지면 기존의 착자되었던 방향의 반대 방향으로 자기 모멘트가 회전 하여 반대의 자장을 형성하게 된다.

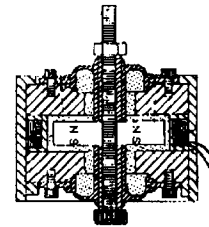


그림 2-2 영구자석을 이용한 MR 장치

Fig. 2-2 MR Device with permanent magnet

기존의 영구자석을 이용한 MR 유체 장치(그림 2-2)들은 외부 감쇄력을 조절하기 위해 MR 유체를 통과하는 자기 선속의 양을 조절해야 하는데 이를 위해 전자석에 전류를 인가하여 자기 선속을 유도하게 되면 외부 코일에 의한 유도된 자기 선속이 영구자석을 통과하여야 하는 구조를 가지고 있다. 한쪽 방향으로 착자(magnetization)된 영구자석의 반대 방향으로 외부 코일에 의해 생성된 큰 자기 선속이 통과하게 되면 영구자석내의 일렬로 배열 되어 있던 자기 모멘트들이 반대 자기 선속의 영향으로 회전을 하게 되어 전자석에 의해 생성된 자기 선속이 없어져도 자기 모멘트가 처음과 같은 방향으로 재 회전 되지 않아 처음과 같은 자장 형성이 어렵게 되어 예상된 성능을 내기 어렵다. 위와 같은 반자화현상이 나타나지 않도록 전자석에서 작은 자기장을 형성시키면 MR 유체를 통과하는 자기 선속의 양이 거의 일정해지고 따라서 제어 가능한 외부 저항력의 범위가 상당히 작아지게 된다.[4]

2-2 새 모델 제시

위와 같은 영구자석의 반자화 현상(demagnetization)을 해결하기 위해 자기 선속의 흐름경로를 2 경로(path)로 나누어 외부 코일에 의해 생성된 자기 선속이 영구 자석을 통과하지 않고, 가변 감쇄력의 범위를 넓히기 위해 모멘트 팔의 차이를 이용한 그림 2-3 과 같은 모델을 제시한다.

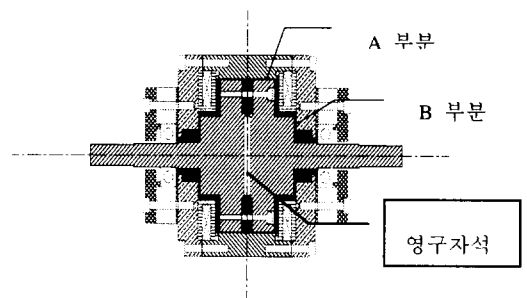


그림 2-3 새로이 제시된 모델

Fig. 2-3 New Model

이 모델은 MR 유체의 3 가지 작동 모드 중 전단 모드를 이용한 모델로서 360도 회전이 가능하다. 이 시스템에서 발생하는 전체 저항력은 MR 유체의 점성에 의해 나타나는 저항력,

베어링이나 MR 유체의 유출을 방지하기 위해 삽입한 리테이너에서 발생하는 마찰 저항력, 자기장 형성에 의해 발생하는 제어 가능한 저항력으로 크게 3 가지로 분류 된다. MR 유체의 점성에 의한 저항력은 다음 식과 같이 각속도의 함수로 표현되며 자기장에 의한 저항력은 그림 2-3의 A, B 두 부분에서 발생하며 전체 저항토크는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 T_{\text{total}} &= T_{\text{friction}} + T_{\text{viscosity}} + T_{\text{MR}} \\
 T_{\text{viscosity}} &= \mu_{\text{MR}} \frac{r_{\text{out}} \omega}{\delta_A} \times 2\pi r_{\text{out}} 2b \times r_{\text{out}} \\
 &+ \mu_{\text{MR}} \frac{(r_o + r_i) \omega}{2} \times \pi(r_o^2 - r_i^2) \times \frac{(r_o + r_i)}{2} \\
 T_{\text{MR}} &= \tau_A \times 2\pi r_{\text{out}} 2b \times r_{\text{out}} + \tau_B \times \pi(r_o^2 - r_i^2) \times \frac{(r_o + r_i)}{2}
 \end{aligned} \quad (2-1)$$

자계 H 와 전단응력과의 관계는 다음식으로 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \tau &= \alpha H^x \\
 \alpha &= 2.37 \times 10^{-8} \\
 x &= 1.89
 \end{aligned} \quad (2-2)$$

여기서 전단응력의 단위는 τ_y 는 kPa 이고, H의 단위는 A/m 이다. α, x 값은 Lord사에서 제공한 값을 이용하였다. MR 유체에 의해 발생하는 저항력은 A부분에서 발생하는 저항력과 B부분에서 발생하는 저항력으로 구성이 되며 MR 유체에 의해 발생하는 저항력 계산식 식 2-1을 보면 알 수 있듯이 저항력은 전단응력의 1승에 비례하고 모멘트 팔의 제곱에 비례하는 것을 알 수 있다. A부분에서 발생하는 저항력은 모멘트 팔이 크기 때문에 B부분에서 발생하는 전단 응력보다 상대적으로 작아도 큰 힘을 발생 시키는 반면 B부분은 A부분에 비해 상대적으로 큰 전단 응력이 발생하여도 모멘트 팔이 작기 때문에 전체 저항력에는 크게 영향을 주지 못한다.

2-3 새로이 제시된 모델의 자기 해석과 모의 실험(simulation)

MR 회전 브레이크에 전류 비인가시에도 약 2Nm 정도의 저항력 발생을 위해 A부분은 0.5mm의 간극을, B부분은 1mm의 간극을 주도록 한다. 이 시스템의 영구 자석에 의해 형성된 자기장과 코일에 의해 생성된 자기장 분포를 도시화하기 위해 자기장 해석 프로그램을 이용하여 자기장을 해석한다. A, B점을 통과하는 자기장의 양을 해석적으로 구하기 위해 자기회로를 이용하기로 한다. 일반적으로 자기 회로와 전기 회로는 다음과 같은 유사성을 지니고 있다.

전기 회로	자기 회로
전류 I	자기 선속 Φ
저항 R	자기 저항 $R = \frac{l}{\mu S}$
전압 V	자기 전압 Ni

여기서, l은 자기 선속 흐름의 둘레 길이, S는 자기 선속이 흐를 때의 재료 단면적, μ 는 재료의 투자율로 공간에서는 $4\pi \times 10^{-7} \text{T}\cdot\text{m}/\text{A}$, N은 코일의 감은 횟수이다. 위의 자기 회로 식을 이용하여 다음과 같이 자기 회로를 모델링한다. 철의 상대

투자율 μ_r 은 자기 유변 유체의 상대 투자율 μ_r 에 비해 약 100배 이상 차이가 나므로 자기 저항 해석시에는 MR 유체에서만 자기 전압이 떨어진다고 가정하고, 자기 선속이 A, B부분을 지나는 경로로만 흐른다고 가정하자.

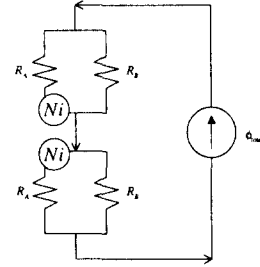


그림 2-4 자기 모델

Fig. 2-4 Magnetic circuit

처음에 외부에서 전류 비인가시에 영구 자석에 의한 자기 선속이 흐를 수 있는 길(path)은 A, B 두 부분이지만 자기 저항 R의 차이로 자기 선속은 대부분 A점을 통과하게 된다.

$$\begin{aligned}
 R_A &= \frac{\delta_A}{\mu S_A} = \frac{0.5\text{mm}}{\mu(2\pi \times 29\text{mm} \times 10\text{mm})} = \frac{0.2744}{\mu} = 3.64 \times 10^4 \text{ A}\cdot\text{T}\cdot\text{m}^2 \\
 R_B &= \frac{\delta_B}{\mu S_B} = \frac{1\text{mm}}{\mu\pi(15\text{mm}^2 - 5\text{mm}^2)} = \frac{1.592}{\mu} = 22.34 \times 10^4 \text{ A}\cdot\text{T}\cdot\text{m}^2 \\
 \frac{R_A}{R_B} &= 0.1724
 \end{aligned} \quad (2-3)$$

위 식에서 볼 수 있듯이 자기 저항이 약 A부분에 비해 B부분이 약 5.8배 정도 크며 철에서의 자기 경로 둘레 길이도 길기 때문에 대부분이 A부분을 통과하게 된다. 이 시스템에 사용한 영구자석의 잔류 자속 밀도 B_r 는 1.1T이고 전체 자기 선속 Φ_{total} 과 A, B부분을 흐르는 자속, 자속 밀도는 다음 식에 의해 계산된다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\pi}{4} d^2 B_r &= \Phi_{\text{total}} = 7.775 \times 10^{-4} \text{ Wb} \\
 \phi_a &= \frac{R_B}{R_A + R_B} \Phi_{\text{total}} = 6.686 \times 10^{-4} \text{ Wb} \\
 \phi_b &= \frac{R_A}{R_A + R_B} \Phi_{\text{total}} = 1.09 \times 10^{-4} \text{ Wb} \\
 B_A &= \frac{\phi_a}{2\pi r_{\text{out}} b} = 0.367 \text{ T} \\
 B_B &= \frac{\phi_b}{\pi(r_o^2 - r_i^2)} = 0.1834 \text{ T}
 \end{aligned} \quad (2-4)$$

이때 MR 유체에 의해 발생하는 저항력을 계산해 보면 약 2Nm 정도를 얻을 수 있다.

외부 저항력을 증가시키기 위해 즉, A부분을 통과하는 자기 선속의 양을 증가시키기 위해 영구자석에 의해 형성된 자기 선속의 방향과 코일에 의해 생성된 자기 선속의 방향이 A부분에서 일치하도록 코일에 전류를 인가하자. 이때의 A,B부분에서의 자속 밀도 B_A, B_B 를 해석적으로 구하면 다음 같다. 외부 코일에서 발생한 자속을 계산하여 영구 자석에서 발생한 자속과 더하고 빼주고 A, B부분의 단면적으로 나누어 자속 밀도를 구해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_C &= \frac{Ni}{R_A + R_B} = \frac{100}{2598 \times 10^4} = 3.85 \times 10^{-4} \text{ Wb} \\ B_A &= \frac{\phi_C + \phi_a}{2\pi \times 29\text{mm} \times 10\text{mm}} = 0.578\text{T} \\ B_B &= \frac{\phi_C - \phi_b}{\pi(15\text{mm}^2 - 5\text{mm}^2)} = 0.439\text{T} \end{aligned} \quad (2-5)$$

전류를 더욱 크게 인가하면 더욱 큰 저항력을 얻을 수 있고, 중심 로터(rotor)의 포화가 일어나기 전까지는 계속 저항력을 키울 수 있다.

외부 저항력을 줄이기 위해 즉, A 부분을 통과하는 자기 선속의 양을 감소시키기 위해 영구자석에 의해 형성된 자기 선속의 방향과 외부 코일에 의해 생성된 자기 선속의 방향이 반대가 되도록 코일에 전류를 인가하면 A 부분을 통과하는 자기 선속의 양은 영구자석에 의한 자기 선속과 코일에 의한 자기 선속에 의해 서로 상쇄되고, B 부분에서는 영구자석에 의한 자기 선속 방향과 코일에 의한 자기 선속의 방향이 일치하므로 많은 자기 선속이 모델의 겉 표면을 통과하여 흐르게 된다. 이때 역시 A,B 부분에서의 자속 밀도 B_A, B_B 를 해석적으로 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} B_A &= \frac{\phi_C - \phi_a}{2\pi \times 29\text{mm} \times 10\text{mm}} = 1.556\text{T} \\ B_B &= \frac{\phi_C - \phi_b}{\pi(15\text{mm}^2 - 5\text{mm}^2)} = 7.862\text{T} \end{aligned} \quad (2-6)$$

이때 발생하는 전체 저항력은 A 부분에서는 자기 선속의 양이 적기 때문에 전단응력이 작아져 작은 저항력을 발생시키고, B 부분에서는 많은 자기 선속이 지나가 큰 전단응력을 발생시키지만 모멘트 팔이 작기 때문에 큰 저항력을 발생시키지는 못한다. 위의 계산된 각 경우의 식을 이용하여 자기 해석 프로그램을 이용하여 모의 실험한 결과는 다음과 같다. 그림 2-5(a),(b),(c)는 각각 전류 비인가시, 외부 저항력 증가시키는 방향으로 전류 인가시, 외부 저항력 감소시키는 방향으로 전류 인가시에 해당하는 그림이다.

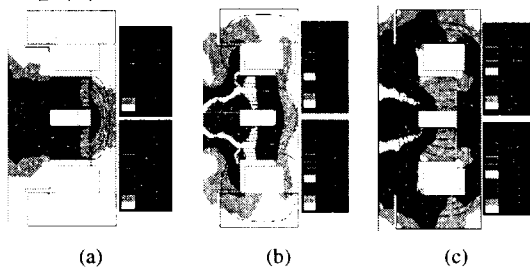
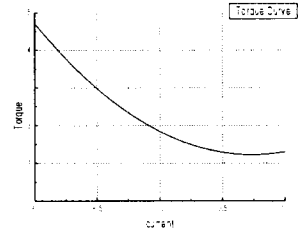


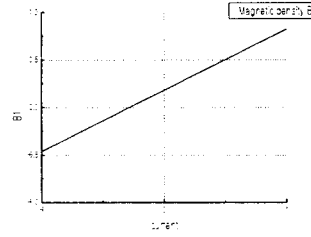
그림 2-5 전류인가에 따른 자기 선속의 흐름도

Fig.2-5 Magnetic flux when the current is supplied

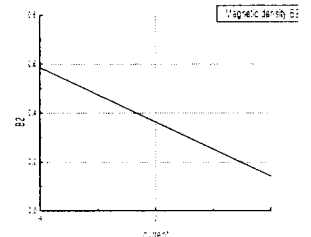
이때 자속의 흐름을 살펴보면 영구자석의 착자된 방향의 반대 방향으로는 흐름이 생기지 않아 영구자석의 반자화 현상은 일어나지 않는다는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 2-6 전류에 대한 토크 및 A,B 부분의 자속 밀도

Fig.2-6 Graph of Current vs. Torque, magnetic density of part A,B

그림 2-6 (a), (b)와 (c)는 각각 자기 전압 Ni 변화에 따른 외부 저항력, A와 B 부분의 자속 밀도를 그린 그래프이다. 해석적인 방법과 모의 실험한 결과를 비교하였을 때의 오차는 해석적인 방법으로 접근할 때는 영구자석에 의해 생성된 자속이 고려한 경로 이외로는 흐르지 않는다는 가정에서의 오차에 기인한다.

3. 결론

영구 자석을 이용한 MR 장치들의 문제점인 영구자석의 반자화 현상 해결을 위해 새로운 모델을 제시하였고 자기장 해석 프로그램을 이용하여 모의 실험을 수행한 결과 영구자석에서의 반자화 현상을 방지하였고, 제어 가능한 저항력의 크기도 상당히 넓어졌음을 알 수 있다

참고문헌

- [1] J.D. Carlson, D. M. Catanzarite and K.A.St. Clair, Lord Library of Technical Articles, "Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices"
- [2] J.D. Carlson and B.F. Spencer Jr., Third International Conference on Motion and Vibration Control, Chiba, September, "Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control"
- [3] Keith.D. Weiss, Theodore G. Duclos, J.D. Carlson, Micheal J. Chrzan, and Anthony J. Margida, SEA International 1993, "High Strength Magneto- and Electro- rheological Fluid"
- [4] J.D. Carlson, Multi-Degree of Freedom Magneto-Rheological Fluid Devices and System for Using Same. .U.S. Patent 5,492,312 (1996)