

<연구논문>

자기 유변 유체를 이용한 반능동 감쇠기의 개발

정병보 · 권순우* · 김상화** · 박영진

한국과학기술원 기계공학과

*㈜ CAS

**국방과학연구소

(1999년 5월 2일)

Development of Semi-active Damper by Magneto-Rheological Fluid

Byung Bo Jung, Soon Woo Kwon*, Sang Hwa Kim** and Youngjin Park

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

*CAS corp.

**Agency for Defense Development

(Received May 2, 1999)

요 약

감쇠기는 기계 시스템에서 에너지를 소모하는데 사용되는 요소이다. 이러한 감쇠기에는 수동 감쇠기, 능동 감쇠기, 반능동 감쇠기 등의 종류가 있다. 반능동 감쇠기는 수동 감쇠기에 비해서 더 좋은 성능을 내면서 능동 감쇠기보다는 더 작은 동력원을 필요로 하는 장치로 상황에 따라서 그 감쇠력 특성을 변화 시킬 수 있다. 본 논문은, 자기 유변 유체를 이용한 반능동 감쇠기의 개발에 관한 것이다. 자기 유변 유체는 가제어성 유체의 일종으로 인가 자기장에 대해서 그 유동학적 성질이 변하며 높은 항복응력, 낮은 점성계수, 불순물에 대한 안정성과 넓은 사용 온도 범위 등의 장점을 가진 재료이다. 이를 이용할 경우 간단한 구조로 반능동 감쇠기를 설계할 수 있을 뿐만 아니라 빠른 응답성 등의 효과도 기대할 수 있다. 본 연구에서는 자기 유변 유체를 이용하여 설계 · 제작된 몇 가지 종류의 감쇠기들을 통하여 그 응용 방법과 범위 그리고 응용 시 수반되는 문제점 등을 제시하였다.

Abstract—Dampers have been used to dissipate energy in mechanical systems. There are several types of dampers such as passive, active, and semi-active damper. Semi-active dampers have higher performance than passive ones and require less power to operate than active ones. Their damping characteristics can be changed properly for varying conditions. In this paper, we investigated the semi-active damper using Magneto-Rheological fluid. Magneto-Rheological fluid, which is one of controllable fluids, changes its damping and rheological characteristics from Newtonian fluid to Bingham fluid as the magnetic field is applied. It has several advantages such as high yield strength, low viscosity, robustness to impurities and wide temperature range of stability. If we design a semi-active damper by using this material, we can not only design a simply structured damper but also expect rapid response. In this study, we propose several types of semi-active dampers which are designed and manufactured using Magneto-Rheological fluid and some problems encountered during their applications.

Keywords : Magneto-Rheological fluid, MR damper, MR brake, Semi-active damper

1. 서 론

일반적으로 기계 장치에서는 에너지 발산을 위해 감쇠기(damper)를 사용한다. 이러한 감쇠기 종류에는 외부 입력에 관계없이 설계 시 고려된 일정한 감쇠력만을 발생시키는 수동 감쇠기(passive damper), 외부 입력의 변화에 따라 시스템의 감쇠력을 적절히 변화시킬 수 있는 반능동 감쇠기(semi-active damper), 외부 입력에 대해 반작용력을 발생시켜 진동을 줄이는 능동 감쇠기(active damper) 등이 있다. 이들 감쇠기의 성능과 감쇠기에 공급하여야 할 에너지를 살펴 보면 수동 감쇠기는 가격은 저렴하지만 설계에

서 고려하지 않은 외부 입력에 대하여 상당한 성능 저하를 일으키게 되고, 능동 감쇠기는 수동 감쇠기에 비하여 월등히 성능이 향상되지만 시스템에 에너지를 공급하는 장치가 부수적으로 필요하게 되어 실용성이 없을 정도의 고가가 된다. 여기에 비해 반능동형 감쇠기는 능동 감쇠기에 비해 성능은 떨어지지만 적은 에너지의 공급만으로도 수동 감쇠기보다 높은 성능 향상을 이룰 수 있다. 반능동 감쇠기에 대한 연구는 이미 상당 수준 이루어져 있으나 이러한 장치를 개발, 적용하기 위해서는 필연적으로 몇 가지 기계 부품으로 구성된 벨브 장치를 필요로 한다. 따라서 시스템은 복잡해지고, 가격은 고가가 된다. 지능형 재료

(smart material) 중 가제어성 유체(controllable fluid)의 일종인 자기 유변 유체(Magneto-Rheological fluid, MRF)를 이용할 경우 이러한 기계 부품없이 자기장 발생 장치만으로도 동일한 성능의 밸브 장치를 만들 수 있어 시스템이 단순화 되면서 원하는 성능을 얻을 수 있다. MRF는 인가해 주는 자기장의 유무에 따라서 그 유동학적 성질이 뉴턴 유체(Newtonian Fluid)에서 빙햄 유체(Bingham Fluid)로 바뀌는 유체로 높은 항복 응력, 낮은 점성 계수, 불순물에 대한 안전성, 넓은 온도 사용 범위 등의 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 MRF를 이용한 반동 동형 감쇠기의 설계 및 응용기술에 관한 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 MRF의 기초 기술과 3가지 종류의 MRF를 이용한 반동동 감쇠기의 적용 사례를 통하여 그 응용 기술과 수반되는 문제점 및 향후 과제를 제시하였다.

2. 이 론

2.1. 자기 유변 유체의 특성

자기 유변 유체는 가제어성 유체의 일종으로 자기장이 가해지지 않는 경우는 전단 변형율에 전단력이 비례하는 뉴턴 유체의 성질을 띠나 자기장이 인가되면 식 (1)과 같이 전단 변형율이 없어도 초기에 항복 응력을 가지는 빙햄 유체로 유동학적 성질이 바뀌는 유체이다(Fig. 1참고).

$$\tau_y = \tau_{y(H)} + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서 τ_y 는 MRF의 항복 응력, $\tau_{y(H)}$ 는 자기장으로 인하여 생성되는 항복 응력, η 는 유체의 점성, $\dot{\gamma}$ 는 전단 변형율을 나타낸다. 현재까지 알려진 MRF의 운동 모드는 Fig. 2에서 나타난 valve mode, shear mode, 그리고 squeeze mode의 3가지가 있다.

Valve mode는 Fig. 2의 (a)에서 보듯 상대적 움직임이 없는 두 극판 사이로 자기장을 가해주는 방식으로 flow mode라고도 하며 소형으로 큰 힘을 낼 수 있어 주로 선형 감쇠기 등에 적용되고 있다. Valve mode에서 전체 압력 강하(ΔP)는 점성으로 인한 압력 강하(ΔP_η)와 자기장을 인

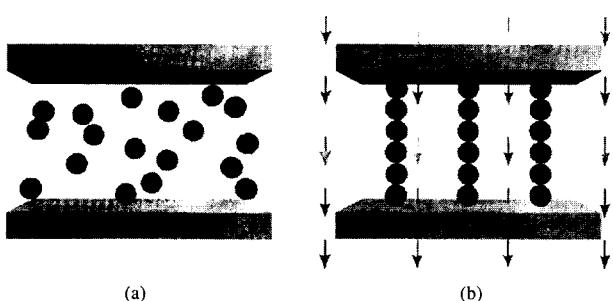


Fig. 1. Rheological behavior of MRF. (a) Newtonian behavior; (b) Bingham behavior.

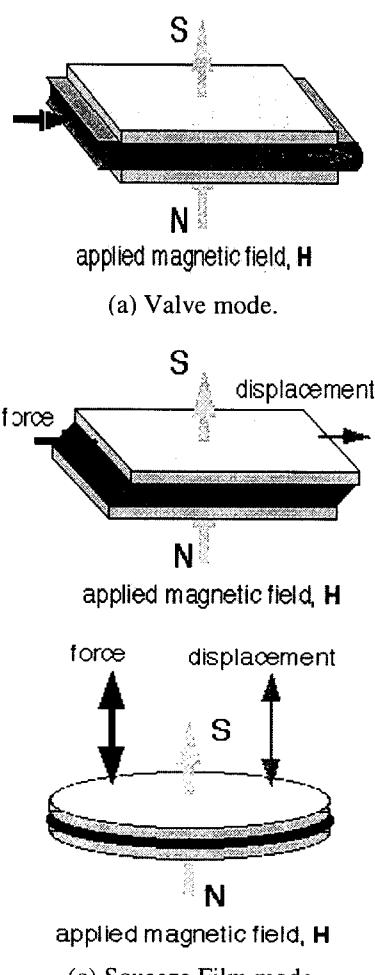


Fig. 2. Operation modes of MRF

가함으로써 발생하는 압력 강하(ΔP_τ)의 합으로 이루어진다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta P = \Delta P_\eta + \Delta P_\tau$$

$$\text{여기서 } \Delta P_\eta = \frac{12\eta Q L_{eq}}{g^3 w} \quad (2)$$

$$\Delta P_\tau = \frac{c\tau L}{g}$$

Q 는 양 극판 사이를 통과하는 유량, L 은 자기장이 형성되는 극판의 길이, L_{eq} 는 유체의 등가 유동 경로 길이, w 는 극판의 폭, g 는 양 극판 사이의 간극을 나타낸다. c 는 2에서 3사이의 값을 갖는 매개 변수이다.

Shear mode는 자기장이 형성되는 양 극판이 서로 상대 운동(회전 또는 병진 운동)을 하는 경우 사용되는 운동 모드로(Fig. 2의 (b)참고) 자기장 유도가 어렵고 발생하는 힘이 valve mode에 비해서 적으며, 주로 회전형 감쇠기 등에 적용되고 있다. Shear mode에서의 전체 전단력(F)은 아래의 식 (3)과 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$F = F_n + F_t$$

$$\text{여기서 } F_n = \frac{\eta S L w}{g} \quad (3)$$

$$F_t = \tau L w$$

S 는 양극판 사이의 상대 속도이며 다른 변수는 식 (2)와 동일하다.

Squeeze Film mode는 두 극판 사이의 상대 운동이 shear mode와는 달리 인가된 자기장의 방향과 동일한 방향으로 운동을 한다.(Fig. 2의 (c)참조) 따라서 다른 모드에 비해서 매우 큰 힘을 얻을 수 있지만 약 2 mm 정도의 제한된 작동 범위를 가진다. 아직 운동 모드가 발견된 지 얼마 되지 않아 수학적인 해석이 이루어져 있지 않다. 현재 국내에서도 많은 곳에서 MRF에 관한 연구가 진행 중이나 아직 기초 기술 및 응용 기술의 수준은 선진국에 비해서 미흡한 실정이다.

2.2. 유변학적 성질

본 연구에서 사용한 MRF는 미국의 Lord 사에서 판매하는 제품으로 MRF-132LD와 MRX-135CD의 두 종류가 사용되었다. 일반적으로 MRF의 인가 자기장과 항복 응력 사이는 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tau_y &= \tau_{(H)} + \eta \dot{\gamma} \\ &\equiv \alpha H^x + \eta \dot{\gamma} \\ &\equiv \alpha H^x (\because \eta \dot{\gamma} \ll \alpha H^x) \end{aligned} \quad (4)$$

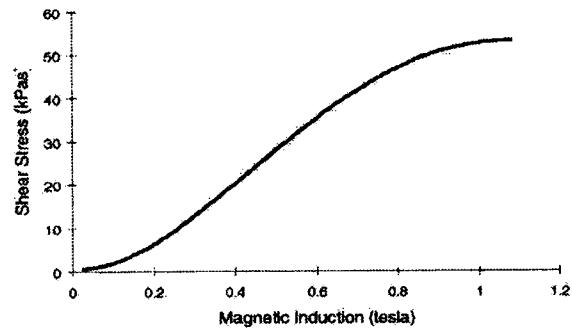
따라서 자기 유변 유체를 이용하여 장치를 설계하기 위해서는 식 4의 α 와 x 값을 찾아야 한다. 본 연구에서는 MRX-135CD의 경우 제조사인 Lord 사에서 그 특성을 제공하지 않은 관계로 실험을 통하여 모델링을 하였으며 MRF-132LD의 경우 웹을 통하여 제공하는 자료를 바탕으로 모델링을 하였다. Fig. 3은 MRF-132LD의 유변학적 특성을 나타내는 그림이다. 주어진 유변학적인 자료를 이용하여 식 4의 형태로 근사화를 시켜서 α 와 x 값을 찾았다. 자기 유변 유체의 경우 전단 변형률(shear rate)에 따른 전단 항복 응력의 변화보다 인가된 자기장에 따른 항복응력의 변화량이 상대적으로 크므로 뉴톤 유체의 경향을 무시하기로 한다. 즉, 전단 변형률에 따른 항복응력의 변화는 무시하기로 한다.

각 유체의 모델링 결과는 식 (5)와 같다.

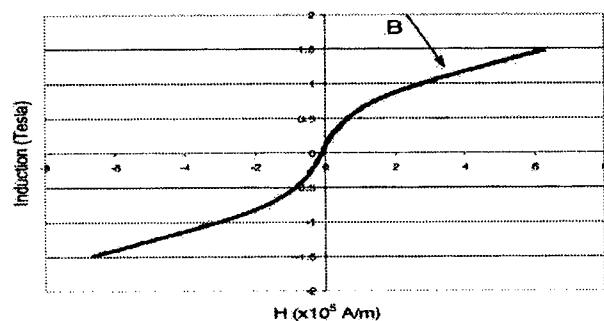
$$\begin{aligned} \text{MRF - 135CD} : \tau_y &\approx 10^{-3.494} \times H^{1.611} \\ \text{MRF - 132LD} : \tau_y &\approx 10^{-3} \times H^{1.5337} \end{aligned} \quad (5)$$

MRF를 이용하여 장치를 설계하고 그 성능을 예측하기 위해서는 이러한 수식적 모사과정을 거쳐야 한다.

각 MRF의 빙햄 특성을 제작한 장치로 확인하기 위하여 MRF의 자기적 특성을 확인하는 실험을 수행하였으며 Fig. 4

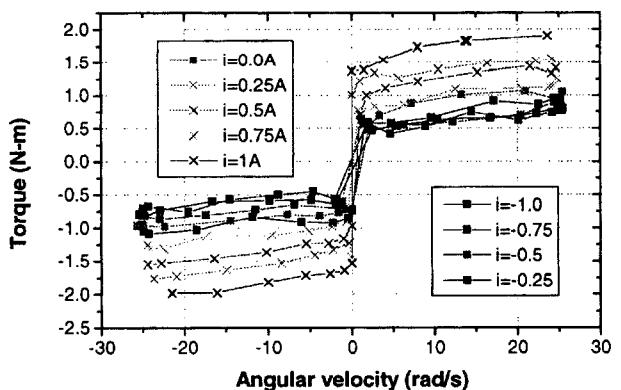


(a) τ -B graph of MRF-132LD.

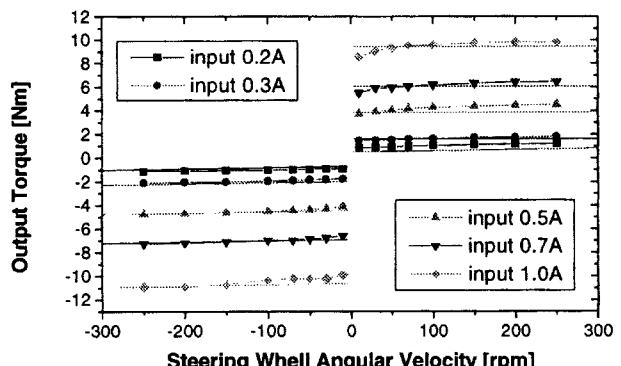


(b) B-H graph of MRF-132LD.

Fig. 3. Rheological char. of MRF-132LD.



(a) Bingham characteristics of MRX-135CD.



(b) Bingham characteristics of MRF-132LD.

Fig. 4. Bingham characteristics of MRF : experiment results.

와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 4의 (a)의 결과는 3.1에서 제작된 감쇠기에 의한 실험 결과이며 Fig. 3의 (b)의 결과는 3.3에서 제작된 장치에 의한 실험 결과이다. 이상의 결과를 통하여 MRF의 빙햄 특성을 확인할 수 있었다.

2.3. 자기 해석 및 자기 포화

MRF를 이용하여 장치를 설계할 경우 2.1에서 제시된 식 (2), (3) 등의 식 이외에도 자기 해석과 자기 포화 해석을 함께 행하여야 한다. 자기 해석을 통하여 입력 전류에 대하여 적절한 양의 자기장이 형성이 될수 있는지를 확인하여야 하며 형성되는 자기장이 자기 포화에 의하여 제한을 받는지 여부도 확인하여야 한다.

자기 해석은 설계한 감쇠기의 도면 등을 통하여 간단히 자기 경로를 설정하고 이를 자기 회로화 한 후에 주어진 자기 회로에 대해서 Table. 1에 있는 전기 회로와의 유사성을 이용하여서 해석하게 된다. 이 때 자기 경로 상의 각 재료에 대하여 자기 포화의 유무를 조사하여야 한다. 자기 포화(Magnetic Saturation)란 자속이 지나는 물질마다 각각의 단면적당 지나는 자속의 수가 일정 값을 넘지 못하는 데 이 값보다 더 많은 자속이 지나는 경우 인가하는 자기장의 세기는 증가하나 그에 따른 자속은 증가하지 않는 현상이다. MRF의 최대 항복 응력은 자기 포화에 의해서 제한된다. 따라서 각 재료마다 자기장이 지나는 부분 중 가장 단면적이 좁은 부분에 대하여 자기 포화를 확인하여야 한다. 또한 이를 위하여 사용되는 재료들의 자기적 특성값을 미리 알아야만 한다. 자기 포화는 아래의 식 (6)과 같은 부등식을 이용하여 간단히 확인할 수 있다.

$$B_{knee} S_{min} \geq B_{opt} S_{opt} \quad (6)$$

B_{knee} 는 $B=\mu H$ 로 근사할 수 있는 구간의 B 값의 최대값이다. B_{opt} 는 원하는 자속 밀도 값이며 S_{opt} 는 B_{opt} 의 자속이 지난 부분의 단면적이 된다. 대부분의 경우 B_{opt} 는 MRF에 관계된 값이 된다.

MRF에서는 $H_{max}=100000$ A/m까지 $B=\mu H$ 의 근사화 식이 성립하며, 이로부터 B_{opt} 값을 찾을 수 있다.

이상에서 설명한 자기 해석과 포화의 방법을 이용하여 MRF를 이용 장치를 설계 변수를 결정하게 된다. 회전 감쇠기의 경우 대개 설계 변수는 축차의 반지름 r , 축차의

Table 1. Magnetic circuit and electric circuit

자기회로	전기회로
전류 I	자속 Φ
저항 R	자기 저항 $R = \frac{L}{\mu S}$
전압 V	자기 전압 NI

두께 b , 그리고 자기장 형성 부위의 간극 d 등을 결정하여야 한다.

3. 반동 감쇠기의 설계 및 실험 결과

2.1에서 소개된 MRF와 2.2에서 설명한 자기 해석 및 자기 포화의 방법들을 이용하여 다음과 같이 3가지 종류의 반동 감쇠기를 설계·제작하였다. 각각의 감쇠기에서 자기 해석을 위하여 자기장이 형성되는 재료의 자기적 특성 값을 알아야 한다. 본 연구에서는 각 재료들을 표준 과학연구소 검교정센터에 의뢰하여 자기적 특성 값을 찾았다.

3.1. 영구 자석을 이용한 회전 감쇠기

영구 자석을 이용하여 MR 감쇠기를 만들 경우 다른 가제어성 유체와는 달리 입력 전류가 흐르지 않을 때에도 일정량의 브레이크력을 내는 감쇠기를 만들 수 있다는 장점이 있다. 본 장치는 기존의 영구 자석을 이용한 MR 장치들의 문제점인 영구 자석의 반자화 현상과 적은 제어 영역을 넓히기 위해 영구 자석에서 발생한 자속의 흐름 방향을 둘 이상으로 나누어 영구 자석의 반자화 현상을 제거하고, 적은 에너지 소모로 큰 영역을 제어할 수 있는 구조를 제안하였다. 제안된 감쇠기의 도면은 Fig. 5와 같다. 감쇠기의 크기는 반경 38.5 mm, 길이 93 mm이며 최대 소산 토크는 2N·m이다. 사용된 MRF는 MRX-135CD이며 몸통부의 재질은 SS41을 사용하였다. 감쇠기의 실험을 위한 실험 장치는 Fig. 6와 같은 실험 장치를 사용하였다.

본 감쇠기는 Fig. 5와 같이 영구 자석을 감쇠기 내부에 함께 사용하므로 자기장이 형성되지 않아도 Fig. 7의 결과와 같이 일정 크기의 토크값을 가짐을 알 수 있다. 또한 기존의 영구 자석을 이용한 감쇠기와는 달리 입력 전류를 조절하여 전체 발생 토크의 크기를 자기장이 없을 시의 값보다 더 크게 만들어 줄 수 있는 장점이 있다.

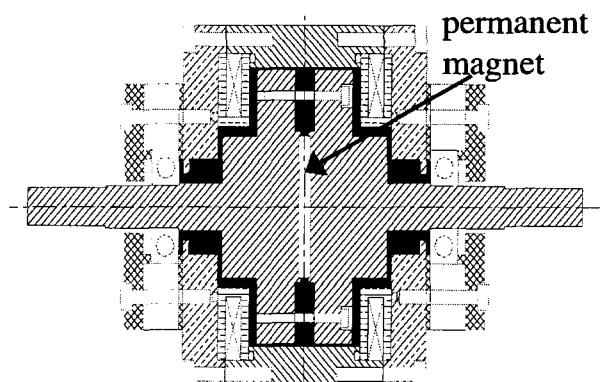


Fig. 5. Rotary MR damper with permanent magnet.

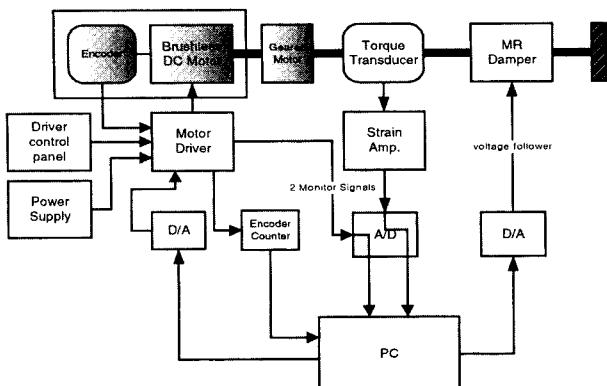


Fig. 6. Experiment systems for MR damper.

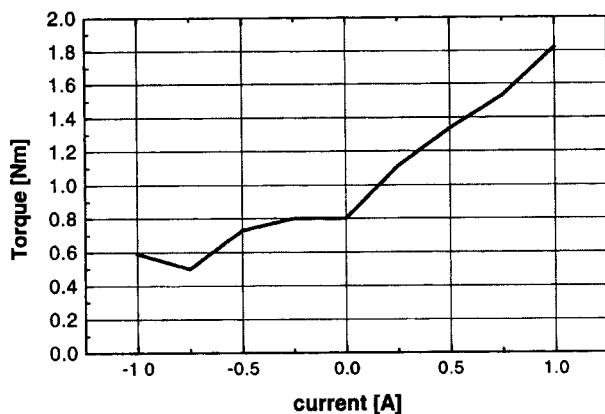


Fig. 7. Experiment results of MR damper.

3.2. Valve mode를 이용한 각도 제한 회전 감쇠기

일반적으로 회전 감쇠기에는 MRF의 운동 모드 중에서 shear mode를 이용한 감쇠기가 주로 쓰인다. 그러나, shear mode는 valve mode에 비하여 발생하는 항복 응력의 크기가 매우 작아 그 성능이 valve mode를 이용한 선형 감쇠기 등과 비교할 때 매우 저조하다. 본 장치는 회전 감쇠기에 valve mode를 사용함으로서 기존의 회전 감쇠기가 가지는 낮은 소산 토크의 단점을 해결하는 구조를 제안하였다. 이러한 구조를 위하여 감쇠기의 회전 범위가 $50^\circ \sim 310^\circ$ 로 제한 되어진다. 설계된 감쇠기는 Fig. 8과 같다. 제작된 감쇠기의 반경은 40 mm, 길이는 90 mm이며 최대 소산 토크는 약 25 N·m에 가까운 값을 가진다(Fig.10 참고). 사용된 봄통부의 재질은 SM45C이며 MRX-135CD를 사용하였다. 감쇠기 성능 실험을 위한 실험 장치는 Fig. 9 과 같은 실험 장치를 사용하였다. 본 감쇠기는 valve mode를 적용하기 위하여 두개의 유실을 만들고 두 유실 사이를 이어주는 유로 상에 자기장을 형성하여 이를 구현하였다. 유로의 길이를 길게 할수록 소산 토크의 크기는 커지나 히스테리시스의 문제를 유발하여 제어 시 강한 비선형성을 보이는 문제점이 있다. 본 장치에서도 Fig. 11과 같은 결과를 통하여 심한 히스테리시스 현상을 확인할 수 있었다.

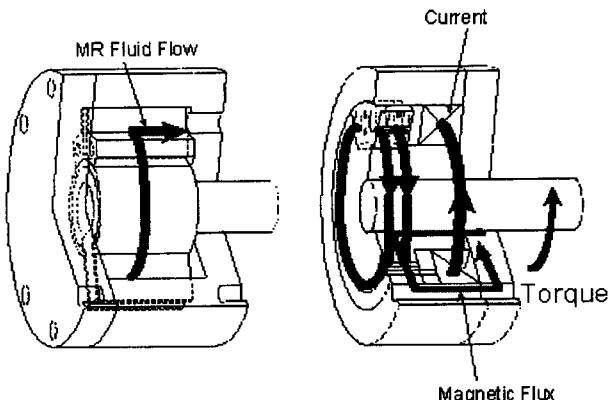


Fig. 8. Constrained rotary MR damper based on shear mode.

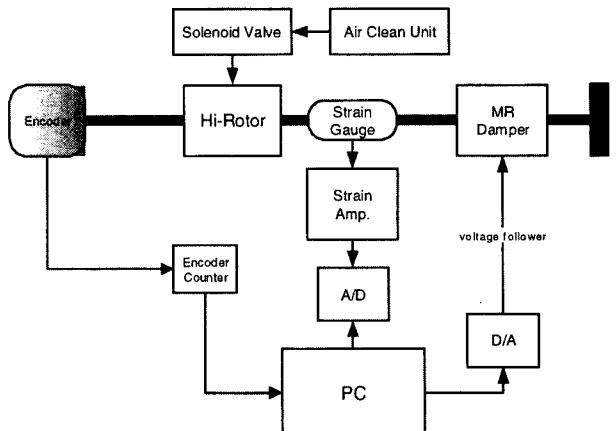


Fig. 9. Experiment systems for MR damper.

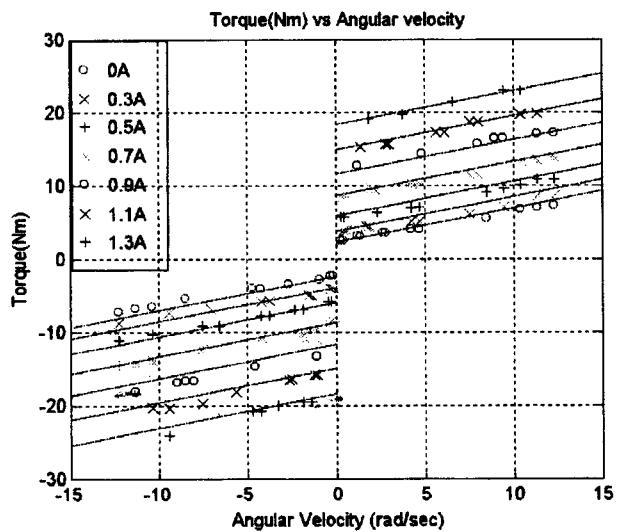


Fig. 10. Experiment results of MR damper.

3.3. 자동차용 조향 장치를 위한 회전 감쇠기

본 감쇠기는 자동차의 속도 감응 동력 조향 장치(Electronically Controlled Power Steering, ECPS)를 개선

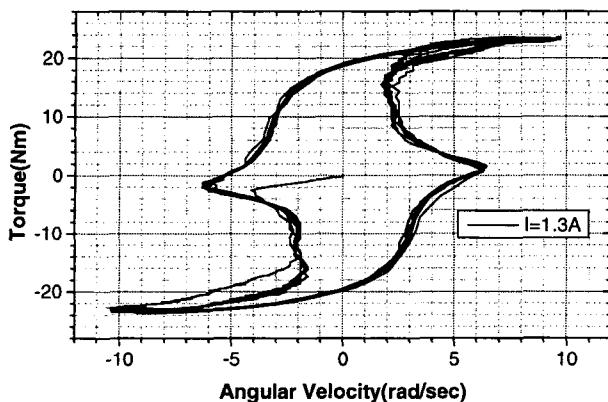


Fig. 11. Hysteresis phenomenon of MR damper.

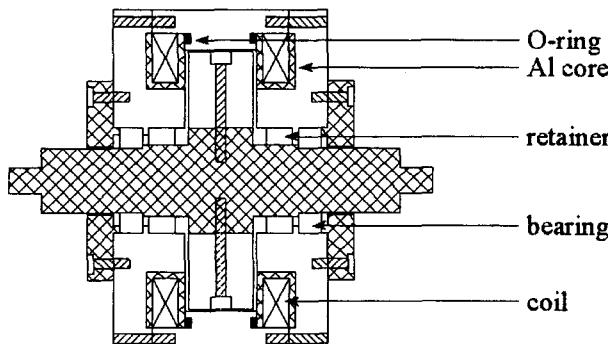


Fig. 12. Rotary MR damper for ECPS.

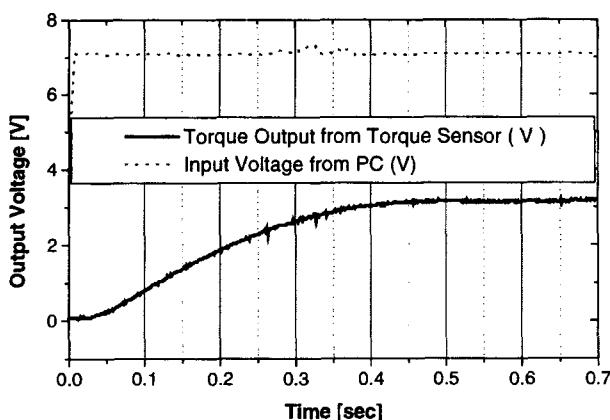
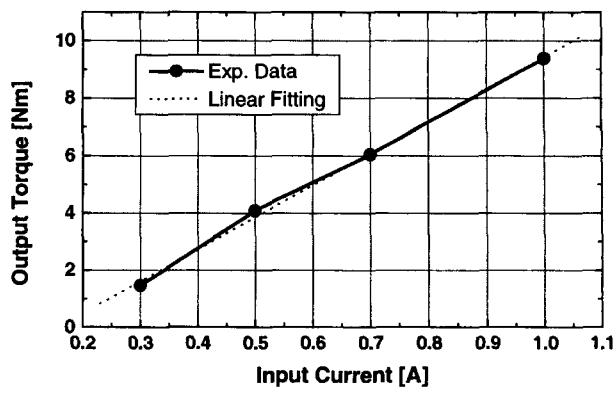
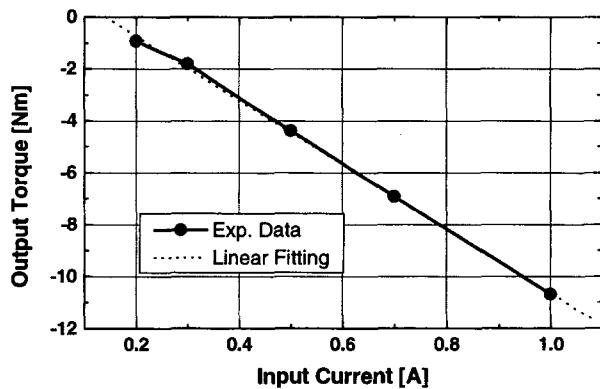


Fig. 13. Step response.

하기 위한 새로운 형태의 ECPS 시스템에 응용 목적으로 설계된 감쇠기이다. 감쇠기의 도면은 Fig. 12과 같다. 감쇠기의 크기는 실제 자동차의 설치를 고려하여 설계되었다. 반경은 52 mm, 길이는 84 mm이며 최대 소산 토크는 11 N·m이다. MRF는 MRF-132LD를 사용하였으며 몸통부 재질은 SM15C이다. 감쇠기 성능 실험을 위한 실험 장치는 3.1의 Fig. 6에 있는 장치와 동일한 장치를 사용하였다. Fig. 12에서와 같이 자기장 유출을 막고 원하는 부분



(a) Positive direction



(b) Negative direction

Fig. 14. Relationship between current and torque.

으로 자기장의 경로를 형성하기 위하여 특정 부분을 알루미늄을 이용하여 제작하였다. Fig. 12에서 양방향으로 사선이 그어진 부분은 알루미늄을 이용하여 제작된 부분들이다. 본 장치의 실험 결과는 2.1의 Fig. 4의 (b)에서 제시하였으며 Fig. 13은 단위 입력에 대한 출력 결과이다. 입력 전류에 따른 감쇠기의 소산 토크는 Fig. 14에 나타내었다. 실험 결과 Fig. 14과 같이 선형으로 근사가 가능함을 알 수 있었다. 이러한 결과는 Lord 사의 제품의 실험 결과와 그 경향이 유사함을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 MRF를 반동 회전 감쇠기에 응용하는 것을 그 목표로 한다. 이를 위하여 MRF를 이용한 3종의 감쇠기를 설계·제작하고 성능 실험을 통하여 기계적 특성을 살펴 보았다. 감쇠기의 성능을 향상시키기 위하여 자기장이 형성되는 부위를 늘일 경우 Fig. 11과 같이 히스테리시스 현상이 증가하게 되고 이는 감쇠기 제어 시 문제가 된다. 또한 Fig. 13의 결과에서 응답 속도가 매우 느림을 알 수 있었다. 응답성의 향상을 위하여 몸통부 재질의 선정과 자기 회로의 변화 등을 고려할 수 있을 것이다.

MRF를 이용한 반능동 감쇠기뿐 아니라 MRF를 이용하는 대부분의 기계 장치에서 히스테리시스 문제와 응답성의 향상에 관한 연구가 선행되어야 할 것이며 이러한 문제를 해결하게 되면 그 응용분야가 매우 넓어질 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단 특정기초과제인 “자기 유변 유체의 특성 해석 및 핵심요소 기술에 관한 연구(과제번호 : 97-0200-0701-3)”의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. S. Kwon and Y. Park, “MR Rotary Brake Development with a Permanent Magnet”, M.S thesis in KAIST, 1997.
2. S.H. Kim and Y. Park, “Constrained Rotary MR Damper Design and Its Application”, M.S thesis in KAIST, 1997.

3. Keith D. Weiss, Theodore G. Duclos, JJ. David Carlson, “High Strength Magneto- and Electro-Rheological Fluids”, SAE Technical Paper Series 932451, 1993.
4. J.D.Carlson, D.M. Catanzarite and K.A. St. Clair, “Commercial Magneto-Rheological, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology.
5. J.D. Carlson, Cary, United States Patent 5,284,330, 1994.
6. H.H. Woodson and J.R. Melcher, “Electromechanical Dynamics”, John Wiley & Sons.
7. Herbert H. Woodson and James R. Melcher, “Electromechanical Dynamics”, John Wiley & Sons.

관련 특허

1. International patent pending, Magnetorheological damper using permanent magnetic, pending No. 97-60078, S. Kwon, 1997.
2. International patent pending, Rotary Damper using Magnetorheological fluid, pending No. 97-51694, S.H. Kim, 1997.
3. Domestic patent pending, Electronically controlled power steering apparatus by magnetorheological fluid, pending No. 99-16188, B.B. Jung, 1999.