

자기 유변 유체를 이용한 각도 제한 회전 감쇠기 설계 및 응용

Constrained Rotary MR Damper Design and Its Application.

⁰ 김상화*, 박영진**

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

** 한국과학기술원 기계공학과 (Tel : +82-42-869-3036; Fax : +82-42-869-8220; E-mail : yjpark@sorak.kaist.ac.kr)

Abstract Passive, semi-active and active dampers have been used to dissipate energy in mechanical systems. Semi-active dampers have higher performance than passive dampers and require lower power to operate than active dampers. Its damping characteristics can be changed appropriately for varying conditions. In this paper, we developed a semi-active damper based on Magnetorheological(MR) fluid. MR fluid has a variable damping characteristics proportional for the magnetic field intensity. It has several advantages such as high strength, low viscosity, robustness in impurities and wide temperature range of operational stability. We designed a constrained rotary MR damper base on valve mode which can dissipate more energy per unit volume. The system with Bingham characteristics is obtained and proved by the experiment.

Keywords Magnetorheological(MR) fluid., Semi-active dampers, constrained rotary MR damper, valve mode

1. 서론

1.1 연구 배경 및 목적

일반적으로 기계 장치에는 에너지 발산을 위해 감쇠기를 사용한다. 이러한 감쇠기 종류에는 외부 입력에 관계없이 초기에 설정된 일정한 감쇠력만을 발생시키는 수동 감쇠기(passive damper), 외부 입력의 변화에 따라 시스템의 감쇠력을 변화시킬 수 있는 반능동 감쇠기(semi-active damper), 외부 입력에 대해 반작용력을 발생시켜 진동을 줄이는 능동 감쇠기(active damper) 등이 있다. 수동 감쇠기는 가격은 저렴하지만 설계 및 제작에서 고려하지 않은 외부 입력에 대하여 상당한 성능 저하를 일으키게 되고, 능동 감쇠기는 수동 감쇠기에 비하여 월등히 성능이 향상 되지만 시스템에 에너지를 공급하는 장치가 필요하게 되어 고가가 된다. 반능동 감쇠기는 능동 감쇠기에 비해 성능은 떨어지지만 적은 에너지로 수동 감쇠기보다 상당한 성능 향상을 이룰 수 있다. 반능동 감쇠기를 개발, 적용하기 위해서는 필연적으로 기계적 요소로 구성된 밸브 장치가 필요로 한다. 따라서 시스템은 복잡해지고, 가격이 비싸게 된다. 하지만 지능

형 재료(smart material)중 가제어성 유체인 ER 유체(Electro-Rheological Fluid) 및 MR (Magneto-Rheological Fluid)유체를 이용할 경우 이러한 기계적인 요소 없이 전기장 또는 자기장 발생 장치만으로도 동일한 성능의 밸브 장치를 만들 수 있어 시스템이 단순화 되면서 원하는 성능을 얻을 수 있다. 1940 년대에 Willis Winslow 가 ER 유체를 개발한 후 1980 년대까지 지난 40 여년 동안 설계, 조립이 간단하고, 빠른 반응 속도와 시스템의 안정성, 그리고 실시간 제어가 용이하다는 점 등의 장점으로 인해 이를 이용한 장치들에 대한 많은 연구와 논문이 발표되었으나 실제 상용화하기에는 낮은 항복 응력과 좁은 작동 온도 범위 등의 단점으로 인하여 제품의 상용화에 제약을 받게 된다. 특히 제조 과정이나 유체의 사용 도중에 발생하는 물과 같은 불순물에 대하여 상당한 성능 저하를 일으키게 된다. 또한 지속적으로 사용을 하지 않는 경우 입자가 유체와 분리 현상을 일으켜 침전이 발생하며, 고가의 고전압 공급 장치가 필요하다는 등의 문제점이 발생하여 이의 대안으로 1990 년대부터 ER 유체가 가지고 있는 장점은 유지하면서 높은 항복 응력, 낮은 점성, 넓은 온도 범위에서의 안정성, 불순물에 대한 강인성, 고전압 공급 장치가 필요 없다는 장점을 가지고 있는 MR 유체에 관심이 모아지고 있다. 지금까지의 MR 유체를 이용한 응용 장

치에 대한 연구는 주로 선형 댐퍼, 마운트 등에 국한되어 이루어져 왔다. 또한 자기 유변 유체를 이용한 기존의 회전 감쇠기도 양 극판의 상대 운동을 이용하는 직접 전단 모드를 사용함으로써, 낮은 토크를 발생시켜 응용 범위가 제한되었다. 공압 유동 모터, 자동차의 스테빌라이저, 힘 반작용형 원격 조정기와 같은 회전 각도가 제한되고, 큰 토크를 감쇠시킬 필요가 있는 경우는 직접 전단 모드보다 2 ~ 3 배 정도의 항복 응력을 발생시키는 밸브 모드(Valve Mode)를 이용하여 높은 토크를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 밸브 모드를 이용한 각도가 제한된 회전 감쇠기를 설계, 제작하여 응용 범위를 보다 넓게 하는 것을 목적으로 한다. 또한 실험 결과를 바탕으로 모델링을 하여 실험 결과와 비교, 모델링의 타당성을 살펴본다.

2. 본론

2.1 각도 제한 회전 감쇠기 설계

대부분의 가제어성 유체를 이용한 장치들의 설계 방법은 밸브 모드(Valve Mode), 직접 전단 모드(Direct Shear Mode), 스퀴즈 필름 모드(Squeeze Film Mode)의 세가지 모드 중 하나에 기초한다. 이들 모드 중 단위 체적 당 가장 큰 힘을 낼 수 있는 밸브 모드의 경우, 전체 압력 강하(ΔP)는 점성항(ΔP_{η})과 자기장이 인가되었을 때 형성되는 항복 응력항(ΔP_{τ})의 합으로 이루어진다. 이들을 각각 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\Delta P = \Delta P_{\eta} + \Delta P_{\tau} \quad (1)$$

$$\Delta P_{\eta} = \frac{12\eta QL_{eq}}{g^3 w} \quad (1-1)$$

$$\Delta P_{\tau} = \frac{c\tau L}{g} \quad (1-2)$$

여기서 η 는 점성 계수를 나타내고 τ 는 자기장이 가해졌을 때 MR 유체에 형성되는 항복 응력을 나타낸다. Q는 양 극판 사이를 통과하는 유량, L은 자기장이 형성되는 극판의 길이, L_{eq} 는 유체의 등가 유동 경로 길이, w는 극판의 폭, g는 양 극판 사이의 간극을 나타낸다. 또한 c는 2에서 3사이의 값을 갖는 매개 변수이다.

2.1.1 구조 및 특성

일반적으로 회전 감쇠기의 구조는 항복 응력이 낮은 직접 전단 모드를 이용하기 때문에 얻어지는 감쇠 토크의 크기가 작다. 본 논문에서 고려한 회전 감쇠기는 회전 각도를 제한 시킨 밸브 모드를 이용하여 감쇠시키는 토크의 크기를 증가시켰다. 그

림 1에서와 같이 두개의 유실(Chamber)이 형성된 시스템에서 한쪽 유실에 있던 MR 유체가 축의 날개(blade)에 의해 압축이 되면 유체가 유실을 빠져 나와 전자석에 의하여 자기장이 걸리는 원통형 유로를 돌아 다른 쪽 유실로 흘러가게 된다.

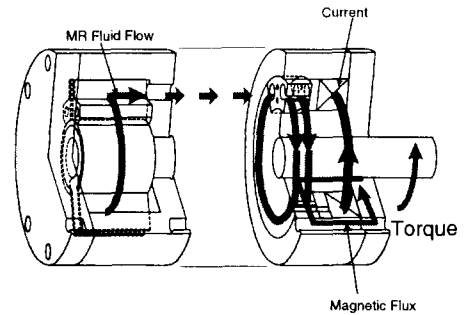


그림 1. 각도 제한 회전 감쇠기 작동 원리

2.1.2 파라미터의 선정 방법

우선 감쇠기의 사양을 다음과 같이 정하였다.

- 최대 소산 토크의 크기 : 30Nm ($\omega = 12\text{rad/sec}$ 에서)
- 감쇠기의 반경 : 80mm
- 감쇠기의 길이 : 90mm
- 사용 각도 : $50^\circ \sim 310^\circ$

(1), (1-1), (1-2)를 사용하면 감쇠기에서 나오는 토크는 다음의 식으로 표현된다. 여기서 마찰항은 무시하였다.

$$\text{Torque} = \frac{(I_2^2 - I_1^2)}{2} \times t \times \Delta P \quad (2)$$

여기에서 ΔP 는 식(1)로 나타난다. 축 중심에서 날개의 시작과 끝부분의 길이를 각각 l_1 , l_2 라 하고, t는 날개의 폭이다. 식(1-1)에서 유체의 점성 유동 시 경로에 따른 압력 강하는 두 부분으로 나눌 수 있다.(그림 2) 유체의 운동을 직사각형 모양의 덕트를 통과하는 유동으로 고려하면, MR 유체는 A 유실에서 자기장이 걸리는 부분으로 들어가기 위한 경로가 90도 꺾어지는 부분(①)과 자기장이 걸리는 부분을 빠져 나와 유실 B로 들어가는 동안 90도 꺾인 경로(②)를 통과하게 된다. 다른 하나는 자기장이 걸리는 부분으로 관이 310도 만큼 원주 방향으로 굽어져 있는 경로(③)이다. 두 가지의 경우 모두 수두 손실(head loss)이 발생하게 된다. 따라서 유체 경로의 등가 길이(equivalent length) L_{eq} 로 변환을 하여야 한다. 우선 직사각형 덕트에 유체 직경(hydraulic diameter)의 개념을 도입하면 식(3)에 의해서 5.7143mm이다.

$$D_h \equiv \frac{4A}{P} = \frac{4gw}{2(g+w)} = 5.7143\text{mm} \quad (3)$$

여기서 D_h 는 등가 유체 직경, P 는 유체가 단면적의 둘레와 접촉하고 있는 길이(wetted perimeter)이다. 90도 꺾어지는 부분을 마이터 밴드(miter bend)로, 원주 경로를 90도 엘보(elbow)를 통과하는 경우로 고려할 경우, 전체 등가 길이는 이들의 합이 된다. 최대 30Nm의 토크를 발산시키기 위해 극판 양 끝의 압력차(ΔP)는 3MPa이 되어야 한다. 각속도가 12 rad/sec에서 자기장에 의한 압력 강화와 점성으로 인한 압력 강화의 비($\Delta P_v/\Delta P_h$)를 2:1이라고 가정하면, 식(1-1)에 의해서 양 극판 사이의 간극(g)은 3.937mm가 된다. 따라서 간극을 4mm로 선정하였다.

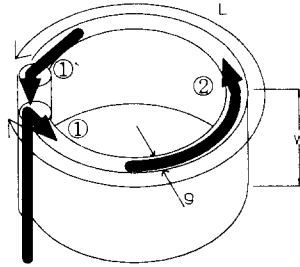


그림 2. 유체 유동에 따른 압력 강화

2.2 실험 장치 및 실험 방법

실험 장치를 구성에 있어 구동 장치는 빠른 반응 시간, 빠른 각속도와 시스템의 감쇠력을 극복할 만큼의 큰 토크를 낼 수 있는 장치로 구성하여 넓은 각속도 범위 내에서 실험이 이루어져야 한다. 실험 장치의 개략도와 실제 모습은 그림(3), (4)과 같다. 감쇠기를 가진시키는 구동 장치는 일정 각도 범위에서 충분한 토크를 공급하기 위하여 공압용 하이 로터를 사용하였고 발산되는 토크를 측정하기 위하여, 축에 스트레인 게이지를 붙였다. 각속도를 측정하기 위해서 하이 로터 축에 엔코더를 연결하였다. 스트레인 게이지에서 출력되는 전압을 앰프를 이용하여 증폭시켜 A/D 컨버터를 통과시켜 토크를 측정하고, 엔코더에서 나오는 펄스 수를 엔코더 카운터 보드를 이용하여 계산하여 각속도를 측정하였다. 실험에서는 코일에 0A, 0.3A, 0.5A, 0.7A, 0.9A, 1.1A, 1.3A의 전류를 흘려 줬을 때, 각속도의 변화에 따른 감쇠기의 소산 토크를 측정하였다.

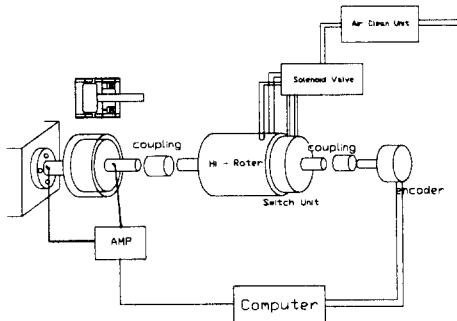


그림 3. 실험 장치의 개략도

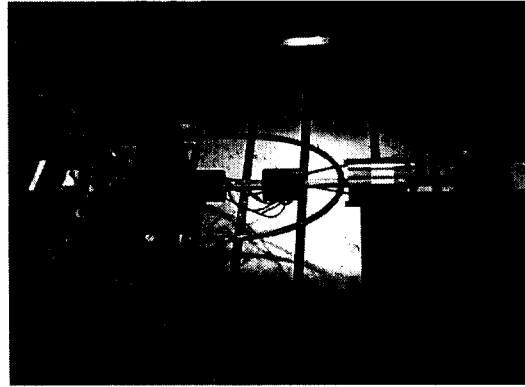


그림 4. 실험 장치의 모습

2.3 실험 결과

전류의 크기와 가진 각속도에 따른 실험 결과는 그림(5)와 같다. 그림에서 시계 방향과 반시계 방향으로 회전 시 모두 빙햄 특성을 보인다.

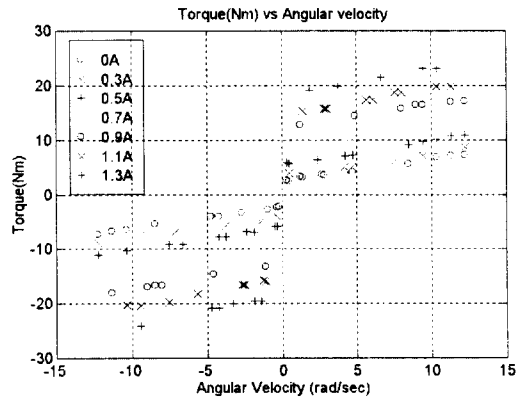


그림 5. 실험에서 얻은 전류, 각속도와 토크와의 관계

2.4 시스템 모델링

스트레인 게이지에서 출력되는 토크는 다음의 세가지 항으로 이루어져 있다.

$$T = T_r + T_\eta + T_{fnc} \quad (4)$$

여기서 T 는 전체 토크, T_r 는 자기장으로 인한 토크, T_η 는 점성으로 인한 토크, T_{fnc} 는 마찰 토크이다. 실험 결과로부터 곡선 맞춤법(curve fitting method)을 사용하면 마찰 토크(T_{fnc})와 입력 전류에 따른 항복 응력(τ), 점성 계수(η_p)를 알 수 있다. 점성 계수는 자기장에 무관하기 때문에 평균을 취하면 $\eta_{ave} = 0.2645$ 이다. 또한 MR 유체의 항복 응력은 일반적으로 다음의 식으로 근사화 가능하다

$$\tau_y \approx \alpha H^x \quad (5)$$

실험 결과를 이용하여 위 식의 파라미터 α , x 를 추정할 수 있다. 솔레노이드 부분을 자기회로로 간략화 하면 그림(6)와 같이 된다. 코일의 권수 N , 코일에 흐르는 전류 I 는 다음의 식으로 표현된다.

$$F = NI = (HL)_{\text{steel}} + (HL)_{\text{MR}} \quad (6)$$

$$= \sum_{i=1}^5 (H_i L_i)_{\text{steel}} + (HL)_{\text{MR}}$$

$$\Phi = (BS)_{\text{MR}} = (B_i S_i)_{\text{steel}} = \text{const} \quad (7)$$

$$B = \mu H \quad (7-1)$$

여기서 F 는 코일에 가해주는 기자력, H_{steel} 은 철에 형성되는 자기장의 세기, H_{MR} 는 MR 유체에 형성되는 자기장의 세기, L 은 자기장이 형성되는 길이, Φ 는 자속, B_{steel} 는 철에서의 자속 밀도, B_{MR} 은 MR 유체가 흐르는 간극 사이에서의 자속 밀도를 나타낸다. S 는 자속이 흘러가는 각 부분의 단면적을 나타낸다. 또한 μ 는 자기 투자율을 나타낸다.

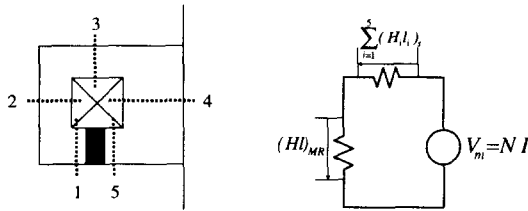


그림 6. 솔레노이드의 모습과 자기 회로

식(6), (7)을 이용하면 다음과 같이 MR 유체에 형성되는 자기장의 세기는 철의 자속 밀도의 항으로 표현되고, 결국 식(6)은 다음의 식으로 간략화 가능하다.

$$NI = \frac{1}{\mu_{\text{MR}}} \times \frac{S_1}{S_{\text{MR}}} \times B_{1\text{steel}} + (L_1 + L_2 \times \frac{S_1}{S_2} + \dots + L_5 \times \frac{S_1}{S_5}) \times H_{1\text{steel}} \quad (8)$$

식(8)을 만족하는 $B_{1\text{steel}}$ 과 $H_{1\text{steel}}$ 을 구하면 된다. 자기장의 세기에 따른 항복 응력 값을 이용하여 곡선 맞춤법을 이용하여 α 와 x 를 구하면, 식(5)는 다음과 같이 근사화 가능하다.

$$\tau_y = 10^{-2.1911} \times H^{1.351} \quad (9)$$

따라서 감쇠기의 소산 토크는 다음의 식으로 모델링 가능하다.

$$T = 0.467 \times \omega + (4.0947 \times 10^{-6} \times H^{1.351} + 2.35) \cdot \text{sgn}(\omega) \quad (10)$$

2.6 실험 결과와 시뮬레이션 비교

실험 결과를 바탕으로 구한 항복 응력의 근사치와 점성 계수를 이용한 모델링은 식(10)와 같다. 그림(7)에서 이를 실제 실험 결과와 비교하였다. 그림에서 실험으로부터 구한 데이터의 기울기와 모델링으로 구한 직선의 기울기가 거의 일치함을 알 수 있다.

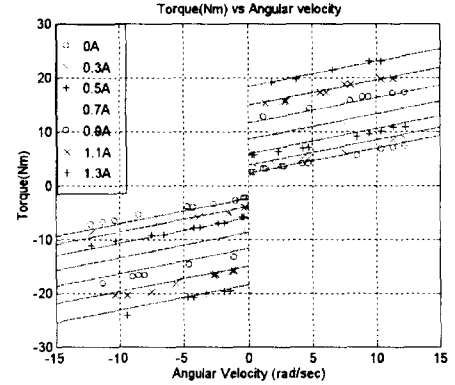


그림 7 실험 결과와 시뮬레이션의 비교

3. 결론

자기 유변 유체를 이용하여 전류를 변화시킴으로써 회전 감쇠력을 조절 가능한, 회전 각도가 제한 되어 있는 회전 감쇠기를 설계, 제작, 실험하였다. 유체가 뉴턴 유체에서 자기장 인가시 점성의 변화로 인한 빙햄 유체로 바뀌는 현상을 확인하였으며 자기장의 세기, 각속도의 증가에 따라 소산되는 토크가 증가하였다. 이러한 실험을 통하여 자기 유변 유체의 점성 계수와 전류에 따른 항복 응력을 구하여 감쇠기를 모형화 하였으며, 실제 실험과 비교하여 모형의 타당성을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] J.D.Carlson, D.M.Catanzarite and K.A.St.Clair, "COMMERCIAL MAGNETO-RHEOLOGICAL FLUID DEVICES", 5th Int. Conf on Electro-Rheological, Magneto-Rheological Suspensions and Associated Technology
- [2] K.D.Weiss, T.G.Duclos, J.D.Carlson "High Strength Magneto- and Electro-Rheological Fluids", SAE TECHNOLOGICAL PAPER SERIES 932451
- [3] United States Patent 5,492,312
- [4] 김정훈, 이종원, "자성유체를 이용한 반응동 마운트 설계, 제작 및 모델링", 한국과학기술원 석사 학위 논문, 1996