

영구자석을 이용한 저전력형 MR 감쇠기의 설계

김정훈* · 오준호**

The design of low-power MR damper using permanent magnet

Jung-Hoon Kim, Jun-Ho Oh

Key Words : MR fluid (자기 유변 유체), Damper (감쇠기), Valve mode (밸브모드), Permanent magnet (영구자석), Semi-active device(반능동 장치)

Abstract

Lots of semi-active control devices have been developed in recent years because they have the best features of passive and active system. Especially, controllable magneto-rheological(MR) fluid devices have received significant attention in these area of research. The MR fluid is the material that reversibly changes from a free-flowing, linear viscous fluid to a semisolid with a controllable yield strength in milliseconds when exposed to a magnetic field. If the magnetic field is induced by moving a permanent magnet instead of applying current to a solenoid, it is possible to design a MR damper consuming low power because the power consumption is reduced at steady state. This paper proposes valve mode MR damper using permanent magnetic circuit that has wide range of operation with low power consumption and small size. To design a MR damper that has a large maximum dissipating torque and a low damping coefficient, a design parameter is adopted. The magnetic circuit, material of choke and choke type are selected experimentally with the design parameter. The behaviors of the damper are examined and torque tracking control using PID feedback controller is performed for step, ramp and sinusoidal trajectories.

1. 서론

기계 장치의 진동감쇠나 에너지 소산(消散, dissipation)을 위한 장치로서 반능동 시스템은 수동형 장치의 신뢰성과 능동형 시스템의 적응성을 결합한 것으로, 기계적 성질이 실시간에 조절될 수 있기 때문에 수동형보다 좋은 동적 성능을 가지며, 제어하는 시스템에 에너지를 입력하지 않기 때문에 능동형보다 적은 제어 에너지를 필요로 한다.⁽¹⁾ 이런 장점으로 인하여 여러 가지 반능동 장치가 개발되었다. 모터나 솔레노이드 밸브를 사용하여 감쇠기의 오리피스(orifice) 크기를 변화 시켜 감쇠 계수를 바꾸는 가변 오리피스 감쇠기가 그 중 하나이다.⁽²⁾ 요즘은 자기 유변 유체(MR 유체 또는 Magnetorheological Fluid)나 전기 유변 유체

(ER 유체 또는 Electrorheological Fluid)와 같은 가제 어성 유체(controllable fluid)를 사용한 반능동 장치에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. 이 중 MR 유체^(3,4)는 자기장에 의해 분극이 가능한 mm 크기의 입자들을 미세알 오일이나 실리콘 오일 용매 속에 분산 시킨 용액이다. 자기장이 가해지면 자기장 방향으로 자기 입자들이 체인(chain)을 형성하면서 자기장 수직 방향의 유동이나 전단력에 저항하게 된다. ER 유체에 비해 최대 항복응력이 높을 뿐만 아니라 유체의 항복응력에 영향을 미칠 수 있는 에너지 원으로서 전기에너지 뿐만 아니라 영구자석을 이용할 수 있는 장점이 있기 때문에 저전력형의 반능동형 감쇠기를 만들 수 있다.

본 논문에서는 소형, 저전력형의 고성능 반능동 장치로서 영구자석을 이용한 밸브모드(valve mode) MR 감쇠기를 제안하였다. 넓은 동작 범위를 나타내는 설계 기준 변수를 제시하여 자기회로와 초오크(choke : 좁고 긴 통로, 압력강하가 점도의 영향

* 한국과학기술원 기계공학과 기계제어연구실

** 한국과학기술원 기계공학과

을 받음) 재질과 초오크 단면 형상을 실험적으로 선정하였다. 또한 완성된 MR 감쇠기의 특성을 분석하였고, PID 제환 제어기를 이용한 토크 추종 제어(torque tracking control)를 하여 추종 성능을 알아보았다.

이와 같은 밸브모드 MR 감쇠기는 소형, 경량 구조로 저속에서 높은 토크를 낼 수 있고, 시스템의 안정성을 보장할 수 있으며 자동차의 반능동 스테빌라이저 바, 전차 포신의 능동 진동 감쇠, 로봇 팔 제어, 감쇠력을 조절할 수 있는 의족의 무릎 관절, 힘 반작용형 원격 조종기 등에 사용될 수 있다.

2. 자기 유변 유체의 성질과 작동모드

MR 유체는 자기장이 가해지지 않을 때 전단 변형률과 응력의 관계가 선형적인 뉴토니안 유체(newtonian fluid)의 성질을 가지며, 자기장이 가해지면 유동이 시작되기 위한 전단력이 추가로 더 필요하다. 일반적으로 다음 식과 같은 빙햄 플라스틱 유체(bingham plastic fluid)로 모델링 된다.

$$\tau = \tau_y(H) \text{sign}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

여기서, τ , $\tau_y(H)$, η , $\dot{\gamma}$ 는 각각 전단응력, 자기장 크기에 의해 가변 가능한 항복응력, 자기장이 없을 때 유체 점도, 전단 변형률이다. 본 실험에서 사용한 유체는 Lord社의 MRF-132LD로서 점도는 0.2~0.3 Pa·s 정도이며 0.9 Tesla의 자기장이 인가되었을 때 전단응력은 약 50 kPa이다. MR 유체의 작동모드는 밸브 모드(valve mode 또는 flow mode), 전단 모드(shear mode), 스퀴즈 필름 모드(squeeze film mode)의 세 가지가 있다.⁽⁹⁾ (Fig. 1) 밸브 모드는 자극이 고정되어있고 그 사이에 유체가 흐르는 것인데 이 때 자기장은 유체 저항(flow resistance)에 영향을 미친다. 전단 모드는 서로 상대운동을 하는 두 자기 극판 사이에 유체를 넣어서 상대운동에 대한 저항력을 발생시키는 것이다. 전단모드를 이용하여 제작한 Lord社의 로타리 브레이크는 1A의 전류 인가 시 약 6.7 N·m의 토크를 소산시킬 수 있는데 이는 최고 12W 정도의 전력이 필요하다.⁽⁹⁾ 자기장을 전류로 인가하지 않고 영구자석을 움직여서 인가한다면 보다 저전력 형태로 설계할 수 있다. 그러나 전단모드의 경우는 자기장을 인가해주는 면이 넓어야 큰 토크를

낼 수 있으므로 영구자석을 이용하여 소형으로 제작하기에는 적합하지 않다. 단위 체적 당 가장 많은 에너지를 소산시킬 수 있는 것은 밸브 모드이다. 밸브 모드 형태로 적용한다면 선형 감쇠기나 로타리형 감쇠기의 초오크에 자기장을 인가하여 초오크 전 후의 압력차를 발생시켜 구할 수 있다.⁽⁹⁾ 이때 자기장을 인가해 주는 초오크에서 큰 압력차만 만들어 낼 수 있다면 소형으로도 큰 에너지를 소산시킬 수 있다. 따라서 공압용 로타리 액츄에이터(rotary actuator)의 두 포트(port)를 연결하여 초오크 유로를 형성시키고 초오크에 자석을 움직여서 자기장을 인가해주는 밸브 모드 형태로 감쇠기를 제작하기로 하였다.

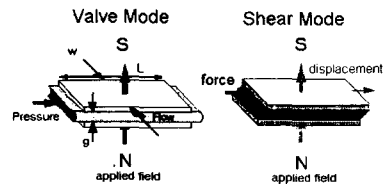


Fig. 1 Operational mode of controllable fluid device⁽⁹⁾

3. MR 감쇠기의 모델

기존의 가변감쇠기는 오리피스 크기를 솔레노이드 또는 아날로그 밸브 같은 기계적 장치로 변화시켜 감쇠계수를 제어하였다. 반면에 MR 감쇠기는 유체의 항복응력을 제어한다. 그 모델은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = cw + \text{sign}(w)\{T_f + T(B)\} \quad (2)$$

여기서, T , w , T_f 는 각각 소산토크, 감쇠기의 각속도, 마찰토크이며, c 는 자기장이 없을 때 감쇠기 내부 유로에서 점성유체의 압력강하로 나타나는 감쇠계수이다. $T(B)$ 는 자기장에 의해 가변 가능한 토크로서 솔레노이드를 이용할 경우에는 전류의 함수이고, 영구자석을 이용하여 움직이는 경우에는 자석의 접근거리의 함수이다.

4. 감쇠기의 설계

공압용 회전 실린더의 원리는 실린더의 한 쪽 포트(port)에 공기를 가압하면 베인(vane)의 면에 압력이 가해져서 축이 회전하는 것이다. 본 실험에서는 회전 실린더 내부에 MR 유체를 채우고 두

포트를 연결하여 유로(流路)를 형성시켜 감쇠기로 개조하였다. 축이 회전하면 유로에서 압력강하가 일어나서 회전력에 저항하게 된다. 구입한 회전 실린더의 체적변위(Volumetric displacement)는 54937mm^3 , 마찰토크는 0.5512Nm 이며, 감쇠기의 소산토크와 압력사이의 관계식에 포함시키면 다음과 같다.^(5,7)

$$T = \frac{\Delta P V_D}{2\pi} + T_f = 8.74 \times 10^{-6} \Delta P + 0.5512 \quad (3)$$

(토크단위는 Nm 압력단위는 Pa)

여기서 압력강하 ΔP 를 초오크에 대해서만 고려한다면, 압력강하는 자기장으로 유도된 유체의 항복응력에 의한 압력강하 ΔP_r 와 Fig. 1과 같은 유로를 지나는 점성 유동(viscous flow)에 대한 압력 강하 ΔP_η 의 두가지로 구성된다.^(3,6)

$$\Delta P = \Delta P_r + \Delta P_\eta \quad (4)$$

$$\Delta P_r = \frac{c_p \tau L}{g} \quad (5)$$

$$\Delta P_\eta = \frac{12\eta QL}{g^3 w_{duct}} \quad (6)$$

여기서, c_p 는 $\Delta P_r / \Delta P_\eta$ 가 1보다 작을 때 2, $\Delta P_r / \Delta P_\eta$ 가 100보다 클 때 3 정도의 값을 갖는 상수이며, τ , L , g , w_{duct} , η , Q 는 각각 유체의 항복응력, 자기장 인가부의 길이, 극간 거리, 사각덕트의 폭, 유체의 점도, 유량(flow rate)이다.

자기장에 의해 가변 가능한 토크는 식 (3)과 식 (5)로부터 다음과 같이 나타난다.

$$T(B) = 8.74 \times 10^{-6} \times \frac{c_p \tau L}{g} \quad (7)$$

압력강하는 자기장 인가부인 초오크에서만 일어나는 것이 이상적이므로, 감쇠기에서 자기장 인가부까지의 압력강하를 최소한으로 줄이기 위해 직경이 큰 원형관을 사용하였다. 시험 제작된 자기장 인가부와 감쇠기의 연결된 모습이 Fig. 2에 나와있다 시험용 초오크는 Fig. 3의 길이 $L=50\text{mm}$, 폭 $w_{duct}=10\text{mm}$, 간극 $g=2\sim 4\text{mm}$ 의 단면이 사각형인 초오크로 만들었으며 간극의 값을 변화할 수 있도록 설계하였다. 또한 초오크가 미로(迷路)모양이라면 유체일 때보다 자기장을 가해준 고체상태에서 더 큰 저항을 발생할 것으로 예상하여, 사각 덕트를 미로 모양으로 만들어 간극을 조절할 수 있게 Fig. 4와 같이 자기장 인가부를 만들었다.

초오크의 상판은 상자성체(paramagnetic material)인 알루미늄($\mu_r=1.00002$)으로, 하판은 강도를 고려하여 비자성체(nonmagnetic material)⁽⁸⁾인 스테인레스강으로 제작하였으며 두께는 각각 2mm로 하였다. 미로형 초오크의 경우, 5개 블록(block)의 재질은 연강인 SS41로 하였다.

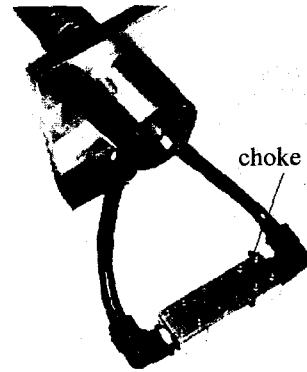


Fig. 2 Damper body and choke

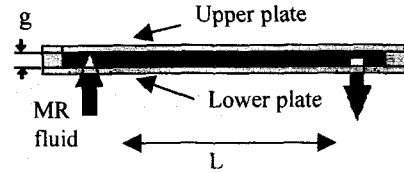


Fig. 3 Rectangular choke (cross sectional view)

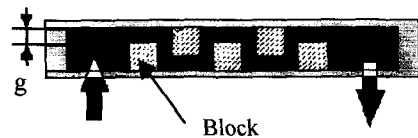


Fig. 4 Labyrinth type choke (cross sectional view)

또한 영구자석과 연강을 이용하여 Fig. 5의 네 가지 자기회로(magnetic circuit)를 만들어 초오크에 자기장을 인가하여 주었다.⁽⁹⁾ 자기회로 (a),(b)는 초오크 상판 위에서 자기장을 가해주는 형태이며, (c),(d)는 자기회로의 자속이 초오크를 관통하는 형태이다. 자기회로 (a),(c)에는 직경 15mm, 두께 10mm의 원형자석을 연결하고 (b),(d)에는 크기가 $10 \times 20 \times 5\text{mm}$ 인 사각막대자석을 연결하여 자석의 단면적과 두께에 차이를 두었다. 실험에 쓰인 영구

자석은 Neo 30 이라고 불리는 물질로 네오뎴, 철, 붕소 등으로 이루어져 있으며, 잔류 자속밀도(residual flux density)는 11000 Gauss, 보자력(coercive force)은 9500 oersted 를 갖는다.

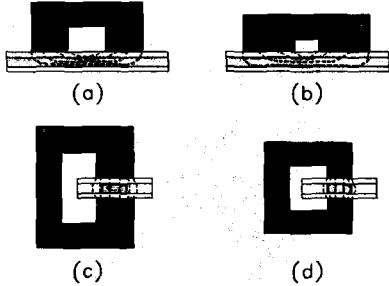


Fig. 5 Magnetic circuits used in the experiment

5. 초오크와 자석회로 선정을 위한 실험

5.1 실험장치의 구성 및 내용

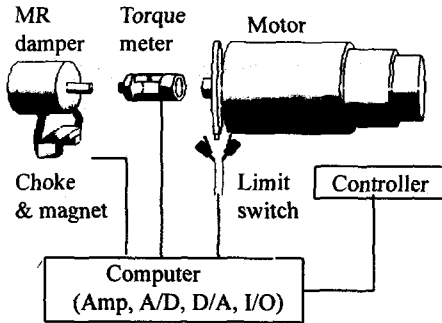


Fig. 6 Experimental setup for testing MR damper

실험장치는 Fig. 6 과 같이 MR 회전 감쇠기와 모터가 토크미터를 사이에 두고 커플링(coupling)으로 연결되어 있다. 리미트(limit) 스위치와 모터제어기를 이용해서 요동각도 100° 이내의 등속 왕복 회전운동을 시키면 감쇠기에서 소산되는 토크량이 토크미터에서 측정된다. 두가지 초오크에 대해서 초오크의 간극(사각 초오크는 2,3,4mm, 미로 초오크는 1,2,3mm) 과 자석회로 배치를 바꿔가면서 T-w 선도(소산 토크 대 각속도 선도)를 구하는 실험을 하였다. 단, 여기서 토크는 속도가 정상상태(steady state)에 이르렀을 때의 값들을 평균을 내어 구했다.

5.2 실험결과

5.2.1 자기회로의 선정

작동범위가 넓은 감쇠기를 설계하는 것이 설계 목표이므로, 감쇠계수 c 값은 작고, 자기장만으로 낼 수 있는 최대 소산 토크량 T_{Bmax} 은 크도록 설계해야 한다. 따라서 T_{Bmax}/c 를 설계 변수로 택하였다. 실험결과를 Table 1로 나타냈으며 회로(a)의 경우가 설계변수값이 나머지 회로보다 크므로 자기회로는 (a)형태로 하기로 하였다.

Table 1. Comparison of T_{Bmax}/c for various magnetic circuit

	회로(a)	회로(b)	회로(c)	회로(d)
미로형 $g=5$	33.6	17.7	16.2	16.4
미로형 $g=6$	54.9	36.0	28.0	24.2
미로형 $g=7$	64.5	42.2	28.7	25.1
사각형 $g=2$	40.5	32.9	25.2	25.6
사각형 $g=3$	48.1	39.3	36.1	34.9
사각형 $g=4$	35.1	27.7	27.2	25.7

5.2.2 초오크의 재질 선정

사각초오크 2mm 간극에 대해서 초오크 하판을 강자성체로 바꾸고 누설 자속을 유도하는 실험을 해본 결과 T_{Bmax}/c 가 36% 증가하였다. 사각초오크에서 하판을 강자성체로 바꾸게 되면 유체 유동방향에 직각방향의 자속밀도가 증가하게 된다. 이로써 MR 유체의 체인결합이 유체 유동에 더 큰 저항력을 갖게 되어 최소소산토크가 증가하게 되는 것이다. 미로초오크에 대해서는 Fig. 7의 자속밀도의 분포를 보면 알 수 있듯이, 하판을 강자성체로 하면 사각 블록들 사이에서 유동방향과 직각을 이루며 형성되고 있던 체인결합을 오히려 약화시켜 최소소산토크값이 감소하게 된다. 따라서 사각 초오크 하판 재질은 강자성체로 하고 미로 초오크 하판은 비자성체로 하였다.

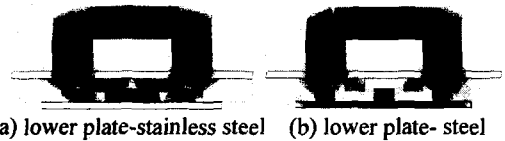


Fig. 7 Magnetic flux density for labyrinth type choke (black color means high density)

5.2.3 초오크 종류 선정

하판의 재질이 철인 사각 초오크와 하판의 재질이 스테인레스 강인 미로 초오크에 대하여 T_{Bmax} 가 23Nm 정도 되는 간극값을 계산하여 각각 1.4mm, 1.8mm 를 얻고 두가지 초오크의 성능을 비교하는 실험을 하였다. 사각 초오크의 경우는 상판의 두께를 좀 더 얇게 할 수 있으므로 1mm의 두께의 경우도 실험해 보았다. Table 2의 실험결과에서 T_{Bmax}/c 의 비율은 유사하였으나, 감쇠계수 c 의 기울기가 미로 초오크 보다 사각 초오크의 경우에 더 선형적이었다. 또한, 같은 조건하 정상 상태에서의 토크 변동율도 사각 초오크가 적은 편이어서 초오크는 간극 1.4mm의 사각 초오크로 결정하였다.

Table 2. Comparison between labyrinth type choke and rectangular type choke

	T_{Bmax}	c	T_{Bmax}/c
1.8mm 미로 초오크 (상판두께 2mm)	23.0	0.503	45.7
1.4mm 사각 초오크 (상판두께 1mm)	25.1	0.486	51.6
1.4mm 사각 초오크 (상판두께 2mm)	21.7	0.486	44.7

5.3 자기회로 구동부의 설계

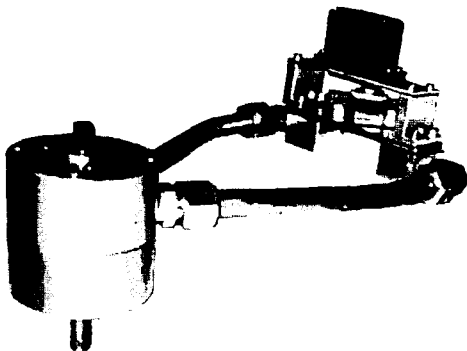


Fig. 8 Appearance of damper system

사각 초오크 상판에서 자기회로를 움직여줄 구동부는 배터리로 구동 가능한 저전력형 소형 경량 모터인 hitec 社의 HS-605BB power servo 를 사용하였다. PWM (pulse width modulation) 신호로 위치가 제어되며 21ms의 반송주파수(carrier frequency)에 사각파형 신호를 넣어주면 펄스 폭에 해당하는 각도로 움직이게 된다. 자기회로의 원활한 움직임을

위해서 자기회로의 중심에 소형 하중 베어링을 장착하였으며 초오크 상판은 유체의 누설이 일어나지 않을 만한 두께의 1.5mm 스테인레스 강으로 하였다. Fig. 8은 최종적으로 완성된 감쇠기의 외관이다. 이 때 초오크와 감쇠기 몸체는 내경 12.7mm의 동관으로 연결하였다.

6. MR 감쇠기의 특성과 토크 추종제어

Fig. 9는 완성된 감쇠기의 소산토크 T 와 감쇠기의 각속도 w 와 자석회로의 각도 θ_{magnet} 간의 관계를 나타낸 그래프이다. 자석회로의 각도와 토크의 관계는 비선형성이 강하며 자석의 각도 70°에서 90°사이 약 17 Nm의 토크가 변동한다.

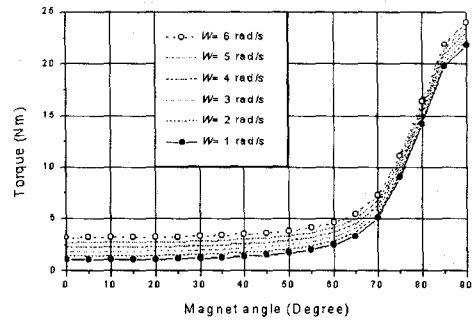


Fig. 9 Relation between magnet angle, torque and angular velocity of damper

6.1 히스테리시스 특성

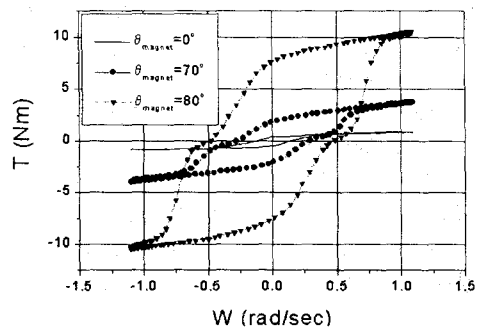


Fig. 10 Hysteresis loops : Torque v.s angular velocity
(0.4 Hz sinusoidal excitation with amplitude of 23°)

θ_{magnet} 을 일정하게 하고 감쇠기를 사인파로 왕복요동 시킬 때 MR 유체의 히스테리시스(hysteresis) 현상을 볼 수 있다. (15) MR 유체가 높은 압력하에

긴 유로를 지나면서 스프링의 역할을 하기 때문에 이러한 현상이 나타난다. Fig. 10은 여러 자석각도에 대한 히스테리시스 루프를 보여준다. 자기장의 세기가 커지면 감쇠기의 내압이 높아져서 유체의 압축량이 증가하며 히스테리시스 루프의 크기가 커진다.

6.2 시간 지연 현상

MR 감쇠기에서 시간 지연은 자기장 유도 장치, 자기장에 의한 항복응력의 변화시간, 자기장이 정상상태까지 도달하는 시간, 자기장을 만드는 코어(core) 등에 의해 발생한다고 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 영구 자석회로를 움직여서 자기장을 가해주는 감쇠기는 저전력 소모의 장점이 있지만, 감쇠기의 응답속도는 서보 모터의 동력학까지 포함되어 시간 지연이 발생한다. 기준토크의 진폭을 10Nm을 중심으로 $\pm 3\text{Nm}$ 로 가진 시키고 open loop 제어를 해보았을 때, cutoff frequency는 2.5Hz 정도로 측정되었다. 또한 자석각도 증가분에 대하여 토크의 증가분이 비례하지 않는 비선형성 때문에 초기위치에 따라서 응답속도의 차이가 많이 난다. 지연 없는 토크의 추종을 위해서는 작동범위를 $60^\circ \sim 90^\circ$ 정도로 한정시키는 것이 좋다.

6.3 PID 궤환 제어기를 이용한 토크 추종 제어

위와 같은 히스테리시스 및 시간지연이 있는 감쇠기에 대해서 응답성능을 향상시키기 위해서 PID 궤환 제어기를 설계하였다. 블록 다이어그램은 Fig. 11과 같다. 실험적으로 구한 시스템의 역모델을 이용하여 토크 단위를 자기회로의 각도 단위로 바꾸어 주었다. 역모델 앞단에는 PID 제어기와 feed forward 입력을 합해서 제어 입력으로 넣어 줌으로써 역모델의 불확실성을 PID 제어기가 보상해 주도록 하였다. PID 제어기로 인하여 각속도 변동에 따른 히스테리시스 현상과 시간 지연 현상에 의한 성능 저하를 줄이게 된다.

Fig. 12~14는 각각 closed loop step, ramp, sinusoidal response를 나타낸다. Fig. 15는 감쇠기 축을 사인파로 요동시킬 때 계단입력을 추종하는 것이다. 각속도 변동에 따른 히스테리시스의 영향으로 역모델의 불확실성이 커짐에도 불구하고, 정상상태의 에러가 0.5Nm 내로 수렴하였다. (단, 각속도가 0이 되는 순간에서 0.3초 정도는 제어를 하지 않고 자석의 위치를 유지함. 그림에서 이때의 에러

는 0으로 표시)

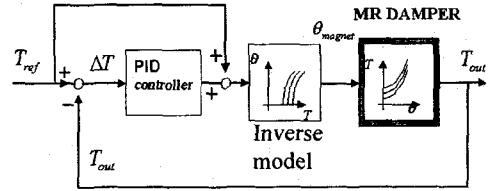


Fig. 11 Closed loop block diagram (PID+feed forward)

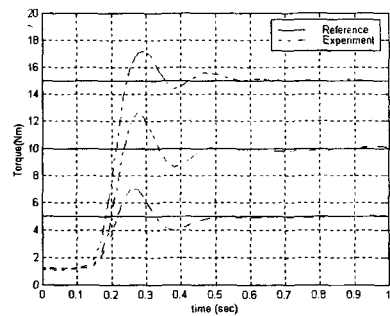


Fig. 12 Closed loop step response
(Initial magnet angle = 30° , $\omega = 1\text{rad/s}$ constant)

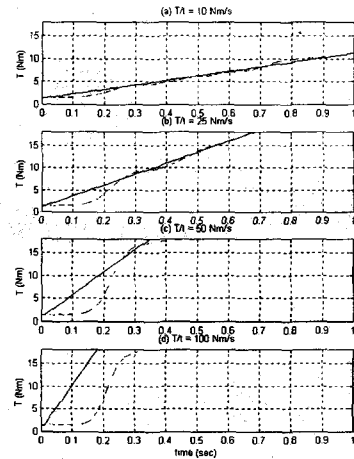


Fig. 13 Closed loop ramp response
(Initial magnet angle = 30° , $\omega = 1\text{rad/s}$ constant)

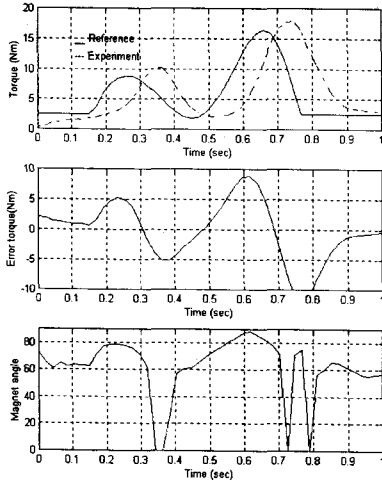


Fig. 14 Closed loop sinusoidal response
(Initial magnet angle = 30° , $\omega = 1 \text{ rad/s}$ constant)

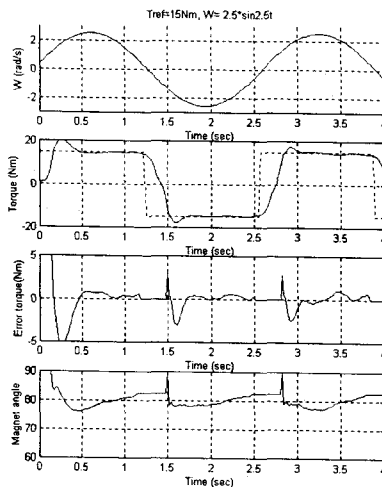


Fig. 15 Closed loop step response for varying angular velocity (0.4 Hz sinusoidal excitation with amplitude of 57.5° , $T_{ref} = 15 \text{ Nm}$)

7. 결론

본 논문에서는 소형, 저전력형의 고성능 반능동 감쇠기로서 영구자석을 이용한 밸브모드 MR 감쇠기를 제안하였고, 그 설계 기준과 방향을 제시하였다. 설계의 목표는 자기장만으로 소산 가능한 최대 토크 T_{Bmax} 는 크고 자기장 비 인가시 감

쇠계수 c 는 작은 고성능 감쇠기를 설계하는 것이므로, 설계변수로 T_{Bmax}/c 를 택하고, 이를 최대화하도록 자석회로와 초오크 재질과 초오크 단면의 형상을 실험적으로 선정하였다. 또, 완성된 감쇠기의 특성 및 히스테리시스 현상과 시간 지연 현상을 확인하였다. 히스테리시스 현상의 원인은 유체가 높은 압력으로 긴 유로를 지날 때에 MR 유체의 압축성으로 인하여 스프링의 효과가 나타났기 때문이며, 시간 지연의 원인은 영구 자석을 움직이는 모터의 응답속도, 자기장 유도 장치, 자기장에 의한 항복 응력의 변화 시간 등에 의한 것이다. PID 케환 제어기를 이용한 토크 추종 제어를 하여 계단, 램프, 사인 입력에 대해서 기준 입력을 추종하는 것을 확인 하였다.

참고문헌

- (1) 1. B. F. Spencer Jr., S. J. Dyke, M.K. Sain, J.D. Carlson, "Phenomenological Model for Magnetorheological Dampers," Journal of engineering mechanics, pp. 230-238, march, 1997
- (2) 2. Masao Nagai, Minoru Onda, Tomohiro Hasegawa, Hidehisa Yoshida, "Semi-active Control of Vehicle Vibration Using Continuously Variable Damper," Third International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 153-158, Chiba, September, 1-6, 1996
- (3) 3. J.D. Carlson, D.M. Catanzarite and K.A. St. Clair, "Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices," International Journal of Modern Physics B, Vol. 10, pp. 2857-2865, 1996
- (4) 4. Carlson. J.D. and Weiss, K.D., "A Growing Attraction to Magnetic Fluids," Machine Design, pp. 61-66, Aug. 8, 1994
- (5) 5. 김상화, "자기 유변 유체를 이용한 각도 제한 회전 감쇠기의 설계 및 응용," 한국과학기술원, 석사 학위 논문, 1998
- (6) 6. R.W. Phillips, "Engineering Applications of Fluids with a Variable Yield Stress," Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley, pp. 16-25, 1969
- (7) 7. Anthony esposito, Fluid Power with applications, Prentice Hall, pp. 233-236, 1993
- (8) 8. B. D. Cullity, Introduction to Magnetic Materials, Addison-Wesley
- (9) 9. M. McCaig, Permanent Magnets in Theory and Practice, Pentech Press, pp. 180-219
- (10) 10. 전도영, 박찬호, 유정열, "MR 댐퍼를 이용한 반능동식 진동제어," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 4 권, 제 1 호, pp. 26-31, 1998