

MR 유체를 이용한 다방향 제진형 마운트의 응답특성

Response Property of Multi-directional Mount Using Magneto-Rheological Fluid

안 영 공† · 신 동 춘*** · 양 보 석* · 이 일 영** · 김 동 조**

Young Kong Ahn, Dong-Choon Sin, Bo-Suk Yang, Il-Young Lee and Dong-Jo Kim

(2003년 2월 27일 접수 : 2003년 5월 6일 심사완료)

Key Words : Mount(마운트), Squeeze Film Damper(스퀴즈필름 댐퍼), Multi-directional Mount(다방향마운트), Magneto-Rheological Fluid(MR유체), Variable Damping(가변 감쇠), Vibration Control(진동제어)

ABSTRACT

This paper presents response property of the squeeze mode type mount using Magneto-Rheological fluid (MR fluid). The MR mount for the isolation of multi-directional vibrations was constructed in this study. Both the mechanism and shape of the mount are the same as squeeze film dampers for a rotor system. In the present work, the performance of the mount was experimentally investigated according to the magnetic field strength. The experimental results present that the MR mount can effectively reduce the vibration in a wide range of frequency by controlling the applied electromagnetic field strength. Viscous damping and stiffness coefficients of the MR mount tend to be changed according to the variation of the applied currents in this study.

1. 서 론

한 방향의 진동제진을 위한 감쇠기 및 마운트가 일반적으로 개발되어져 왔다. 그러나 여러 방향 혹은 비틀림 진동이 복합적으로 발생하는 경우에 진동 제진을 위해서는 다방향 진동 제진용 감쇠기 혹은 마운트가 보다 효과적일 것이다. 종래의 감쇠기 성능향상을 위해서 최근 주목을 받고 있는 MR유체(magneto-rheological fluid)는 부가하는 자기장의 세기에 따라서 걸보기 점도가 변화하는 특성을 나타내고, 이를 이용한 응용연구는 미국을 중심으로 세계적으로 활발하게 진행되고 있다.^(1~6)

MR유체를 이용한 마운트는 점도특성이 변화함으로써 준 능동마운트로 분류된다. 준 능동마운트는 수동형 마운트와 같이 높은 안정성과 신뢰성을 가지며, 또한 능동형 마운트와 같이 감쇠력을 제어할 수 있어서 제진성능이 뛰어나고, 가격이 능동형에 비해서 저렴하다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 이와 같은 준 능동형 다방향 제진용 MR마운트를 제작하여 실험적으로 마운트의 응답특성을 검토하였다. MR 마운트에 부가하는 자기장의 세기를 조절함으로써 폭 넓은 주파수 영역에서 진동을 효과적으로 감쇠시킬 수 있음을 실험적으로 보였다. 본 다방향 제진형 마운트의 형상과 작동개념은 회전체에 사용되는 스퀴즈필름댐퍼와 동일하지만, 스퀴즈필름댐퍼 내부에 설치된 볼 베어링이 없다.

MR유체와 유사한 점도특성을 가진 ER(electrorheological) 유체 혹은 MR유체를 이용한 감쇠기, 마운트, 스퀴즈필름댐퍼 등에 관한 연구가 여러 연구자들에 의해서 이루어 졌으나, 이들 유체를 이용한 요소들의 특성에 대한 이론적 해석 혹은 실험적 평가를

† 책임저자, 정회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : ahn@mail1.pknu.ac.kr
Tel : (051) 620-1618, Fax : (051) 620-1405
* 정회원, 부경대학교 기계공학부
** 부경대학교 기계공학부
*** 부경대학교 대학원 기계공학부

진동형태와 같은 왕복식 전단(shearing)이 발생하는 것과는 차이가 있는 일정 방향의 전단만이 발생하는 점도계로 측정하여 얻어진 Bingham 유체의 특성을 토대로 수행하여왔지만, 이 결과는 실제의 현상과는 차이가 많이 있음을 알 수 있다.^(7~15)

따라서 본 연구에서는 부가하는 전류에 대한 MR마운트의 변화특성을 힘-변위 또한 힘-속도선도를 실험 결과로부터 얻고 이로부터 전류의 변화에 따라서 Bingham 유체의 특성인 쿨롱감쇠(coulomb damping)가 나타나는지 아닌지를 확인하였다.

2. 실험장치

2.1 다방향 제진형 MR마운트

다방향 제진형 MR마운트의 상세구조의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 본 마운트는 회전체의 진동 감쇠장치로서 잘 알려진 스퀴즈필름댐퍼의 작동개념을 이용한 것으로서 마운트의 내측인 스프링 리테이너(retainer)에 마운트의 지지스프링과 질량부의 지지부가 설치되어있고, 또한 전자석 코일이 감겨 있다. 질량부의 지지부는 회전하지 않기 때문에 볼 베어링이 설치되어 있지 않은 것이 기존의 스퀴즈필름댐퍼와 다른 점이다. 모든 반지름방향에 대해서 감쇠효과가 발휘되는 특성이 한쪽 방향의 진동을 제진하기 위한 기존 마운트 기능과의 차이점이다. 댐퍼의 내외측 사이에 MR유체가 채워지게 되며, 고무판을 사용하여 MR유체를 밀봉하였다. 사용된 MR유체는 Lord사의 MRF-126QD이고, MR 마운트의 주요 치수 제원은 Table 1에 나타내었다.

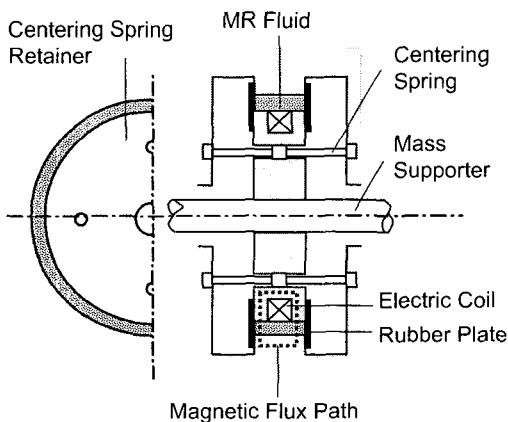


Fig. 1 Schematic of multi-directional mount using MR fluid

Fig. 2에 MR마운트 특성을 실험적으로 검토하기 위한 실험장치의 개략도를 나타내었다. 본 마운트에서 감쇠효과가 발생하는 매커니즘은 모든 반지름 방향에 대해서 동일하기 때문에 한 방향의 특성만을 측정하였다. 따라서 질량부의 상하방향을 제외한 운동을 sliding 베어링 및 sliding 봉을 이용하여 구속하였고, 또한 MR마운트의 가진 장치로서는 유압식 가진기가 사용되었다.

2.2 MR마운트의 응답특성

MR유체를 이용한 마운트의 제진특성을 파악하기 위해 부가하는 전류를 변화시키면서 임팩트해머에 의한 타격실험과 가진기에 의한 가진 실험을 수행하였다. Fig. 3은 타격실험으로부터 얻은 시간에 대한 컴플라이언스를 나타내고 있다. 임팩트해머의 용량에 비해서 지지강성이 높고, 또한 감쇠력이 크기 때문에 충분히 임팩트 가진이 되지 못하여 과감쇠 형태로 나타났지만, 부가 전류가 증가함에 따라서 진동 수렴 시간이 짧아지고, 피크가 작아짐을 알 수 있다. 정상 상태의 응답특성을 측정하기 위하여 가진기로 마운트

Table 1 Principal dimensions of multi-directional mount

Inner damper diameter	80 mm
Electric coil turns	410
Electric coil resistance	6.5 Ω
Electric coil diameter	0.6 mm
Radial clearance	6 mm
Inner damper width	34 mm
Centering spring diameter	2 mm

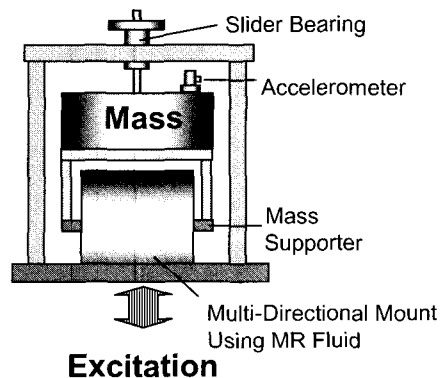
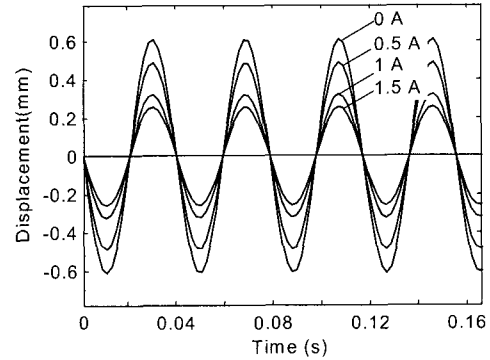


Fig. 2 Experimental apparatus of the multi-directional mount with a mass

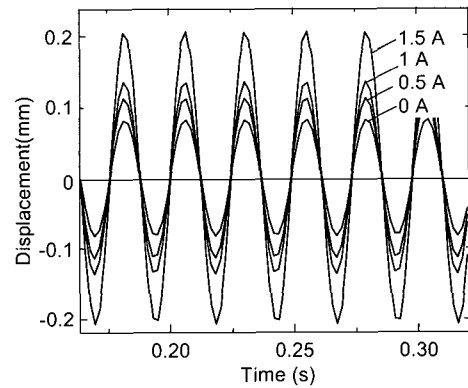
를 가진하고 가속도계로 측정된 질량부의 가속도를 적분하여 얻은 변위를 Fig. 4에 나타내었고, 또한 가진 진폭에 대한 질량부의 진폭비인 전달률을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 4에서 마운트의 피크주파수인 23 Hz로 가진된 경우는 전류가 증가함에 따라서 진폭이 줄어들고 있음을 알 수 있으나, 가진 주파수가 41 Hz인 경우에는 전류를 증가시키기에 따라서 오히려 진폭이 상승한다. 이와 같은 결과를 Fig. 5의 전달률 선도에서도 확인할 수 있는데, 약 32.5 Hz 부근의 주파수 이하에서는 전류가 증가함에 따라서 전달률이 낮아지고, 그 이상의 주파수에서는 오히려 증가한다. 이와 같은 현상은 점성감쇠가 작용하는 1자유도계에서 고유진동수의 $\sqrt{2}$ 배 이상의 주파수에서 감쇠비가 작은 경우에 비해서 큰 경우가 기초가진에 대한 전달률이 오히려 더 높게 나타나는 것과 같다. 하지만, 피크주파수는 감쇠비가 클수록 낮아지는데, 이것은 본 MR유체를 이용한 마운트의 특성과 큰 차이점이다. 본 마운트의 특성을 토대로 제어를 수행할 경우, 최대 부가전류를 1.5 A로 설정을 하고 ON-OFF 제어이론을 이용하여 가진주파수에 따라서 제어를 한다면, 약 32.5 Hz 이하에서는 전류를 ON, 32.5 Hz 이상에서는 전류를

OFF 함으로서 수동 마운트 보다 효율적으로 진동 진폭을 줄일 수 있고, 만약 Skyhook제어 이론으로 제어한다면 보다 효과적으로 진동을 줄일 수 있다.



(a) 23 Hz excitation



(b) 41 Hz excitation

Fig. 4 Response to excitation test with variation of applied magnetic field

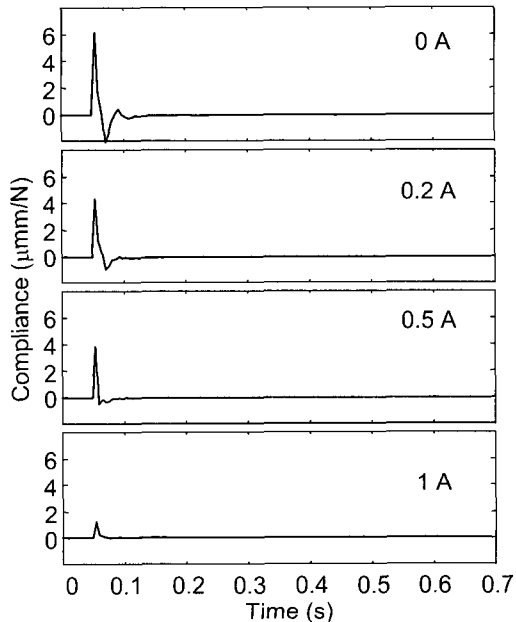


Fig. 3 Response to impact test with variation of the applied magnetic field

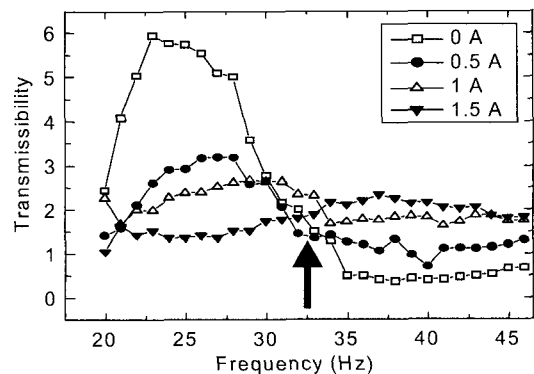
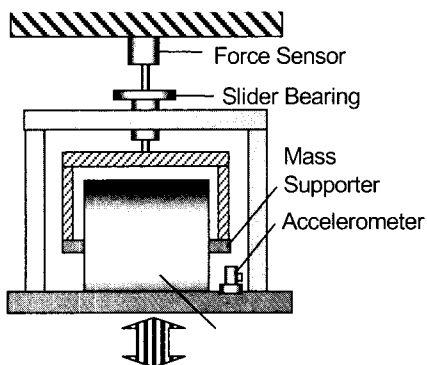


Fig. 5 Transmissibility under various magnetic fields

2.3. MR효과의 특성

전류가 증가함에 따라서 피크주파수가 상승하여 1.5 A의 선과 0 A의 선이 만나는 주파수 이상의 주파수에서 피크주파수가 나타나는 것인데, 일반적으로 MR혹은 ER유체를 이용한 마운트의 경우에 나타나는 현상이다.^(3, 9~13, 16) 그 원인이 일반적으로 알려진 것처럼 MR유체가 Bingham유체의 특징인 쿨롱감쇠의 특성을 나타내기 때문인지, 아니면 다른 원인인지를 검토해야 한다. 한쪽 방향으로 전단이 발생하는 점도계로 측정된 ER혹은 MR유체의 특성은 전장이나 자장이 증가함에 따라서 Bingham유체의 특성이 나타나는 것으로 일반적으로 알려져 있다. 그러나 이 특성은 진동과 같은 왕복운동이 일어날 때의 특성과는 차이가 있지만, 많은 연구자들은 ER혹은 MR유체를 이용한 감쇠기나 마운트에 전장 혹은 자장을 부가하였을 때 쿨롱감쇠가 작용하는 것으로 판단하는 경우가 많이 있다.^(7~12) 따라서 본 연구에서는 실험적으로 본 마운트에 전류를 부가하였을 경우에 어떤 특성이 변화하는지 검토하기 위하여 Fig. 6과 같이 힘과 가속도센서를 이용하여 마운트의 전달력과 가진부의 진폭을 측정하였다. 전류의 변화에 대한 마운트의 특성변화를 보다 명확하게 관찰하기 위해서 마운트의 센터링(centering) 스프링 및 질량을 제거하였다.

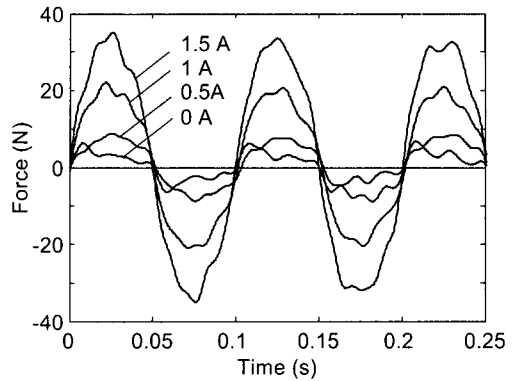
Fig. 7은 주파수 10 Hz, 변위 약 0.2 mm로 가진 하였을 때 얻어진 시간과 힘 파형을 나타내고 있다. 본 실험에 사용된 유압식 가진기는 가진 진폭이 수 cm 용으로 제작된 것이므로, 본 실험에서 수백 μ m로 가진하였기 때문에 기대하는 진폭과 실제 진폭사이 다소 오차가 발생하였다. 부가하는 전류가 증가함에



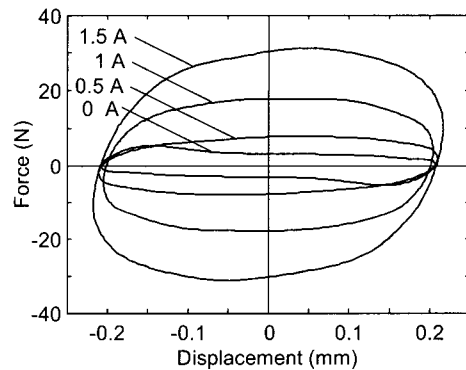
Excitation

Fig. 6 Test setup for MR mount identification

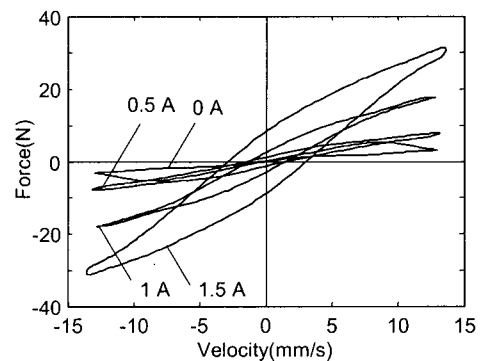
따라서 전달력이 증가하고 있음을 그림 (a)에서 알 수 있고, 힘 파형에 10 Hz 이외의 주파수 성분이 포함 되어져 있는데, 이것이 MR효과에 의한 쿨롱감쇠 아니면 실험장치에 의한 주파수인지 알 수 없다. 따라



(a) Force vs. time



(b) Force vs. displacement hysteric loop



(c) Force vs. velocity hysteric loop

Fig. 7 Experimental measured force for 10 Hz sinusoidal excitation with an amplitude of 0.3 mm

서 그림 (a)의 힘 파형과 가진부의 변위 및 속도파형을 이용하여 그림 (b) 및 (c)와 같이 힘-변위 및 힘-속도선도로 나타내었다. (b)의 힘-변위선도에서 직사각형 형태가 나타나면 쿨롱 감쇠력이 작용하는 것이다. 그러나 타원형태의 히스테리시스 루프이므로 점성 감쇠력과 강성력이 함께 존재하고 또한 전류가 증가함에 따라서 루프의 장축 방향의 기울기가 증가하고, 동시에 종축 방향의 루프내부의 폭이 증가함으로 강성 및 점성 감쇠계수가 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 힘-속도선도에서 힘이 속도의 크기에 무관하고 속도의 방향에만 관계할 때 쿨롱 감쇠력이 작용하는 것으로 판단할 수 있지만, (c)에서는 히스테리시스 루프이므로 점성 감쇠력과 강성력이 함께 존재하고 전류의 세기가 증가함에 따라서 루프의 기울기가 상승하고, 또한 종축방향의 루프내부의 폭이 증

가함으로써 점성 감쇠 및 강성계수가 상승하는 것으로 판단된다.

힘-변위선도에서 루프내부의 면적 A 와 힘-속도선도의 루프내부의 면적 B 를 이용하여 다음과 같이 점성 감쇠계수 C 와 강성계수 K 를 유도할 수 있다.⁽¹⁷⁾

$$C = A / (\pi \omega X^2) \quad (1)$$

$$K = B / (\pi \omega X^2) \quad (2)$$

여기서 ω 는 가진 주파수, X 는 최대 가진 진폭이다. 면적 A 와 B 는 1주기 동안의 점성감쇠에 의한 손실에너지와 강성에 의한 탄성일률과 같다. Fig. 8과 9는 식 (1)과 (2)를 이용하여 Fig. 7의 (b)와 (c)로부터 얻은 점성 감쇠 및 강성계수 값을 나타낸 것인데, 식 (1)과 (2)에 사용된 가진 진폭은 실제로 측정

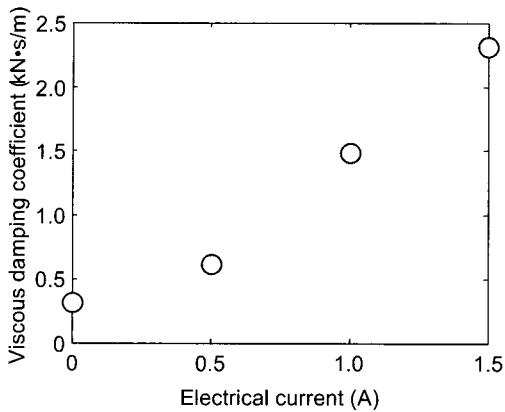


Fig. 8 Viscous damping coefficient vs. electric current

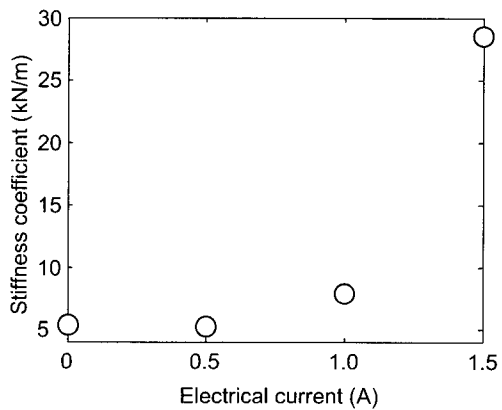
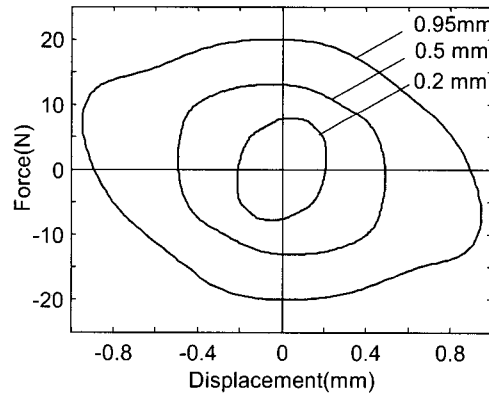
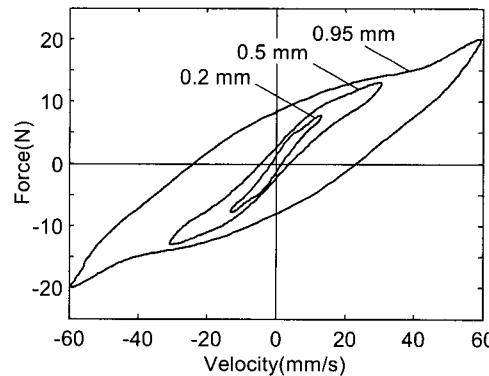


Fig. 9 Stiffness coefficient vs. electric current



(a) Force vs. displacement



(b) Force vs. velocity

Fig. 10 Experimental measured force for 10 Hz sinusoidal excitation with an applied current of 0.5 A

된 진폭을 사용하였다. 전류의 세기가 증가함에 따라서 감쇠계수는 지속적으로 증가하고, 강성계수는 어느 이상의 전류가 부가되었을 때 급격하게 증가함을 알 수 있다. 다음은 마운트의 가진 변위에 대한 MR 유체의 효과를 검토하기 위하여 가진 주파수는 10 Hz, 부가 전류를 0.5 A로 일정하게 유지하면서 가진 변위를 0.2 mm, 0.5 mm, 0.95 mm로 설정하였을 경우에 얻은 힘-변위 및 힘-속도선도를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10의 힘-변위 및 힘-속도선도에서 종축방향의 루프내부 폭이 가진 변위의 증가와 함께 상승하였다. 그 이유는 가진 변위가 증가하면 강성력이 상승하고, 또한 속도진폭은 변위진폭과 가진주파수 w 의 곱으로 이루어져 동일 가진 주파수에서 변위의 증가는 속도의 증가를 의미하므로 점성 감쇠력이 높게 나타난다. 그림 (a)의 힘-변위선도에서 기울기의 변화를 논하기가 어렵지만, (b)의 힘-속도선도의 기울기는 가진 변위, 즉 가진 속도가 클수록 루프의 기울기가 감소하고, 또한 종축방향의 루프내부의 폭이 증가함으로 점성 감쇠계수가 감소하지만 가진변위의 증가로 강성계수는 증가함을 알 수 있다.

Fig. 10으로부터 식 (1)과 (2)를 이용하여 점성 감쇠계수와 강성계수를 구하여 Fig. 11과 12에 나타내었다. Fig. 11에서 변위, 즉 속도가 증가함에 따라서 점성 감쇠계수가 작아지고 있는데, 이 현상은 동일한 가진 주파수에서 진폭이 큰 경우와 동일한 진폭에서 높은 주파수에서 MR유체의 효과가 떨어짐을 의미한다. 이 결과는 점도계에서 측정한 결과와 일치한다.⁽²⁾ 한편 가진 변위가 일정하고 가진 속도가 증가하면

MR효과가 감소하기 때문에 강성계수는 작아질 것으로 추정 된다. 그러나 본 실험에서는 가진 변위가 증가하였기 때문에 가진 속도가 증가하므로 강성계수는 작아지지만 가진 변위의 증가로 강성력이 다시 증가하므로 정확한 강성계수의 변화는 Fig. 12에서 논의 하기가 곤란하다.

본 연구의 실험결과를 토대로 하여 얻은 마운트의 운동방정식을 종래의 운동방정식과 비교하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + f_{MR}(H)\text{sgn}(\dot{x}) = f \quad (3)$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + c_{MR}(H, \dot{x})\dot{x} + k_{MR}(H, x)x = f \quad (4)$$

여기서 m 은 부하질량, x 는 부하질량의 변위, k 는 센터링스프링의 강성계수와 전류를 부가하지 않은 상태의 고무 및 고무의 체적감성계수의 합, c 는 전류를 부가하지 않은 상태의 고무와 점성감쇠계수의 합, F_{MR} , C_{MR} , K_{MR} 은 부가하는 전류의 함수인 자장 H 에 따라서 변화하는 쿨롱감쇠력, 점성감쇠 및 강성 계수이며 또한 C_{MR} 및 K_{MR} 은 부하 질량의 속도 \dot{x} 및 변위 x 의 함수, f 는 가진 입력이고 외부 마찰력은 없다.

식 (3)은 MR유체의 특성을 Bingham 혹은 Herschel-Bulkley 모델⁽¹³⁾로서 표현을 하여 얻은 식으로, f_{MR} 항은 질량부의 속도 크기에는 무관하고 그 부호에만 관계하는 쿨롱감쇠력을 나타내지만 본 실험에서 쿨롱감쇠력은 존재하지 않았고, 반면에 식 (4)와 같이 전류의 변화에 따라서 점성 감쇠력 및 강성력이 변화함을 확인하였다.

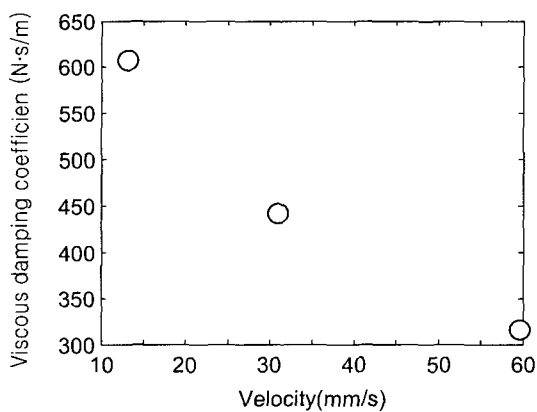


Fig. 11 Viscous damping coefficient vs. displacement

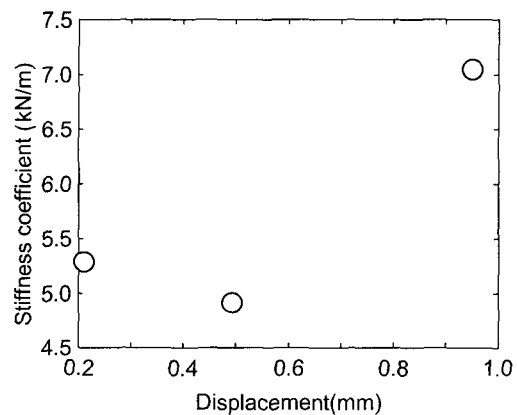


Fig. 12 Stiffness coefficient vs. displacement

3. 결 론

본 논문에서는 MR유체를 이용한 다방향 제진마운트를 개발하여 실험적으로 마운트의 응답특성을 검토하였고, 본 논문의 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트에 부가하는 전류를 조절함으로써 폭 넓은 주파수 영역에서 진폭을 보다 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였다.

(2) MR마운트에 부가하는 전류가 증가함에 따라서 쿨롱 감쇠력이 증가하는 것이 아니고, 점성감쇠력이 증가하고, 또한 강성력이 증가하여 피크주파수가 상승하는 것을 확인하였다.

(3) MR유체의 감쇠효과는 고 주파수 영역에 비해 저 주파수 영역에서 보다 효과적임을 확인하였다.

(4) 본 연구결과는 MR유체를 이용한 스퀴즈필름 댐퍼의 기본특성 파악을 위한 기초자료로서 이용될 가치가 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- (1) Carlson, J. D., 1995, "Multi-degree of Freedom Magneto-Rheological Devices and System for Using Same, US Patent 5492312.
- (2) Lukianovich, A., Ashour, O., Thuston, W. and Rogers, C., 1996, "Electrically-controlled Adjustable-resistance Exercise Equipment Employing Magnetorheological Fluid," SPIE Proceedings, Vol. 2721, pp. 283~291.
- (3) Dyke, S. J., Spencer Jr., B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1996, "Modeling and Control of Magneto-Rheological Dampers for seismic Response Reduction," Smart Materials and Structures, Vol. 5, pp. 565~575.
- (4) Zhu, C., Robb, D. A. and Ewins, D. J., 2002, "Dynamics of Over-hung Rotor with a Disc-type Magneto-Rheological Fluid Damper," IFToMM Sixth International Conference on Rotor Dynamics, pp. 607~614.
- (5) 안영공, 양보석, Morishita, S., 2001, "자기점성유체를 이용한 가변감쇠 마운트의 모델화," 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 1 호, pp. 141~146.
- (6) Simon, D. and Ahmadian, M., 2001, "Vehicle Evaluation of the Performance of Magneto Rheological Dampers for Heavy Truck Suspensions," ASME Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 123, pp. 365~375.
- (7) 정시영, 최상규, 강덕형, 1997, "무한 소폭 전기유변 스퀴즈 필름 댐퍼에 관한 이론적 근사해," 한국운활학회지, 제 13 권, 제 2 호, pp. 60~67.
- (8) 정시영, 김창호, 이용복, 2000, "슬롯 링을 장착한 전기유변 스퀴즈필름 댐퍼의 감쇠성능 해석," 한국운활학회지, 제 16 권, 제 2 호, pp. 75~83.
- (9) 정우진, 정의봉, 홍성룡, 최승복, 2002, "200 kg급 압착모드형 ER마운트의 진동제어성능 고찰," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 11 호, pp. 882~889.
- (10) Nikolajsen, J. L. and Hoque, M. S., 1988, "An Electroviscous Damper for Rotor Applications," Transactions of the ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 112, No. 3, pp. 440~443.
- (11) 임승철, 채정재, 박상민, 윤은규, 2002, "ER유체 감쇠기를 이용한 유연 회전축계의 진동제어," 한국소음진동공학회논문집, 제 12 권, 제 5 호, pp. 365~373.
- (12) 이현희, 최승복, 2001, "MR유체를 이용한 엔진마운트의 진동제어," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, pp. 213~228.
- (13) Kim, J. H., Lee, C. W. and Lee, S. K., 1996, "Modeling of Magneto-Rheological Fluid Based Semi-active Mount," 3rd International Conference On Motion and Vibration Control, Japan, pp. 164~169.
- (14) Kamath, G. M. and Wereley, N. M., 1997, Modeling the damping Mechanism in Electro-Rheological Fluid Based Dampers, Mechanics and Mechanisms of Material Damping, American Society of Testing and Materials, ASTM STP, Vol. 1304, 1997, pp. 331~348.
- (15) Lee, D. Y. and Norman, Werely, N. M., 2000, "Analysis of Electro- and Magneto-Rheological Flow Mode Dampers Using Herschel-bulkley Model," Proceeding of SPIE, Vol. 3989, pp. 244~255.
- (16) Carlson, J. D. and Spencer Jr., B.F., 1997, "Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-active Seismic Control," Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, September 1-6, Chiba, Japan, III, 35~40.
- (17) Rao, S. S., 1995, "Mechanical Vibrations with Disk(3rd Edition)," Addison-wesley, New York, pp. 152~157.