

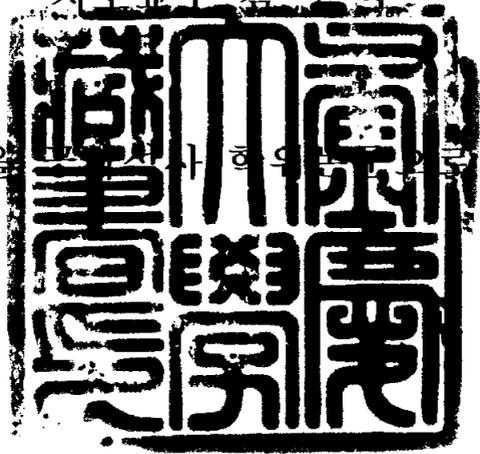
100 of  
43  
72

공학석사 학위논문

# MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트에 관한 연구

지도교수 김 동 주

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함



2003년 2월

부경대학교 대학원

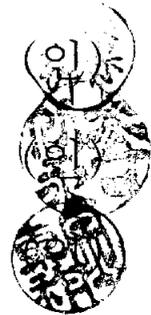
기계설계학과

신 동 춘

# 신 동 춘의 공학석사 학위논문을 인준함

2002년 12월

주 심 공학박사 양 보 석  
위 원 공학박사 이 일 영  
위 원 공학박사 김 동 조



# 목 차

Abstract .....	2
1. 서 론 .....	3
2. MR 유체 .....	5
2.1 MR 유체의 특성 .....	5
2.2 MR 유체를 이용한 감쇠기의 동특성 .....	9
3. 다방향 제진형 마운트의 감쇠 특성 해석 .....	10
3.1 기본 방정식 .....	10
3.2 계산 결과 .....	16
4. 다방향 제진형 마운트의 모델링 .....	19
5. 실험 .....	30
5.1 실험장치의 설계 및 제작 .....	30
5.2 실험 방법 및 계측 방법 .....	34
5.3 실험 결과 및 고찰 .....	36
6. 결론 .....	52
참고문헌 .....	53
감사의 글 .....	55

# **A Study on the Multi-Directional Mount Using Magneto-Rheological Fluid**

**Dong-Choon Sin**

*Department of Mechanical Design Engineering,  
Graduate School  
Pukyong National University*

## Abstract

This paper presents the property of the Multi-Directional Mount using Magneto-Rheological fluid (MR fluid). When the MR fluid is applied to a mount that can effectively reduce vibrations in a wide range of frequency by control of the applied magnetic field strength. The shape of the mount is the same as squeeze film damper(SFD). The damping property of the SFD for a flexible rotor system vary according to vibration mode. MR fluid is known as a functional fluid with controllable apparent viscosity of the fluid by applied magnetic field strength. But until now the damping property of the SFD using MR fluid was not clarified correctly. So this investigation is useful to detail the damping property of SFD using MR fluid that the Multi-Directional Mount to support one mass was constructed and its performance was experimentally investigated in the present study. In this study, Multi-Directional Mount modeling was separated to viscous damping by Newtonian fluid and Coulomb friction by Bingham fluid. And then theoretical models were compared with its experimental result.

In this study, Multi-Directional Mount using MR fluid is proposed, and the response properties of the mount were theoretically and experimentally investigated. The Multi-Directional Mount using MR fluid can effectively reduced vibrations in a wide range of excitation frequency by control of the applied magnetic field strength.

# 1. 서론

감쇠기나 마운트는 일반적으로 한 방향의 진동을 줄이기 위해서만 사용된다. 그러나 경우에 따라서는 여러 병진 혹은 비틀림진동이 복합적으로 일어나는 경우가 발생하므로, 다방향진동 제진을 위한 마운트를 필요로 하는 것은 당연하다. 또한 마운트의 성능향상을 위해서 최근 주목을 받고 있는 MR유체(magneto-rheological fluid)는 부가하는 자장의 자기장의 세기에 따라서 점도특성이 변화는 특성을 나타낸다.

본 다방향 제진형 마운트의 형상은 스퀴즈 막 감쇠기(squeeze film damper, SFD)와 유사하나, 스퀴즈 막 감쇠기 내부에 설치된 볼베어링이 없는 것이 차이점이다. 따라서 본 연구의 결과는 MR유체를 이용한 스퀴즈필름 댐퍼의 응답특성에 대한 기초연구로도 이용될 수 있다.

스퀴즈 막 감쇠기는 유연지지된 회전체의 휘돌림 진동을 감소시키기 위한 감쇠기로서 잘 알려져 있고, 지지부의 볼베어링 바깥부분에 설치하여 회전체의 감쇠특성을 개선하고, 주 운전주파수에서 회전체의 안정성을 높이는 작용을 함으로 항공기용 터보 엔진 등에 장착되고 있다.<sup>1)~6)</sup>

MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트는 자기장의 세기를 변화시킴으로써 유체의 걸보기 점도를 제어할 수 있는 마운트로 준 능동형로 분류된다. 준 능동형은 수동형 마운트와 같이 높은 안정성과 신뢰성을 가지고, 또한 능동형과 같이 감쇠력을 제어할 수 있어서 제진성능이 뛰어나고, 가격이 능동형에 비해서 저렴하다는 장점을 가지고 있다.<sup>1)</sup>

따라서, MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트를 제작하고, 실험적으로 이의 특성평가를 수행하여 MR유체형 SFD의 감쇠특성에 응답특성 또한 알 수가 있다.

본 연구에서는 자기장의 변화에 따라서 MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트의 특성이 Bingham 유체의 특성을 나타내는지를 파악하고자 한다.

왜냐하면 MR유체를 이용한 마운트 내부에 외부적인 마찰이 없는 경우에는 자기장을 부가함에 따라서 Coulomb 마찰의 특성은 보이지 않고, 점성감쇠의 특성이 지배적으로 나타난다는 연구보고가 있기 때문이다.<sup>7)~9)</sup> 이를 위해서 마

운트 모델링은 점성감쇠 모델과 **Bingham** 모델 두 종류로 나누고, 이에 대한 변위전달률을 구하여 그 특성을 파악하였다.

실험은 자기장의 세기에 따른 MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트의 응답특성은 충격 햄머에 의한 타격실험 및 가진기를 이용한 가진실험과 load cell로 감쇠력을 측정하여 실험적으로 검토되었고 등가 점성 감쇠와 등가 강성을 구하여 전류의 변화에 따른 등가 점성 감쇠의 변화와 등가 강성의 변화를 확인하였다.

## 2. MR 유체(Magneto-Rheological Fluid)

### 2.1 MR 유체의 특성

자기장(magnetic field)을 부과하였을 때, 유체가 가지는 항복응력을 변화시킬 수 있는 기능성유체인 MR 유체는 1948년 Jacob Rabinow에 의해 최초로 보고되었다.<sup>10)</sup>

즉, MR유체는 낮은 투자율(permeability)의 용매에 상자성(paramagnetic) 입자를 분산시킨 유체로 MR 유체 입자의 크기가 수 마이크로미터( $\mu m$ ) 정도이다. 분산된 미립자에 자기장을 가하면 입자들이 N극과 S극의 극성을 가지게 되어 사슬(chain)구조를 형성하게 된다. 이 사슬구조가 유체의 흐름을 방해하게 되어 겔보기 점도가 증가하고 유체의 유동 저항이 증가된다. 자기장이 가해지지 않을 때에는 입자가 자유롭게 운동을 하는 Newton 유체와 같은 거동을 나타내지만, 자기장이 부가시에는 N극과 S극으로 사슬구조를 형성하여 전단속도(shear velocity)가 일정하게 작동하는 전단모드가 일어나는 회전식 점도계에서 MR유체는 항복응력이 자기장의 세기에 따라 바뀌는 다음식과 같은 Bingham 유체의 특성이 나타난다.<sup>9),11),12)</sup>

$$\tau = \tau_0(H) + \mu \dot{\gamma} \quad (2.1)$$

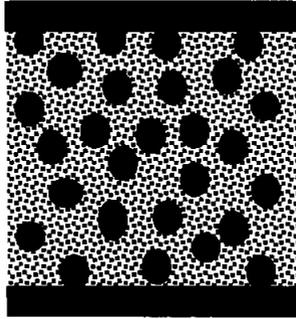
여기서  $\tau$ 는 유체의 전단응력을 나타내고,  $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비이며,  $\mu$ 는 유체의 절대점도를 나타낸다.  $\tau_0(H)$ 는 유체의 항복응력을 나타내며,  $H$ 는 유체에 부과된 자기장이다. MR유체의 항복응력이 변화하는 메커니즘은 Fig. 2.1에서 보이는 것처럼 ER유체와 아주 유사하고, 자장과 전장이라는 점이 다를 뿐이다.<sup>9)</sup> 발생하는 항복응력의 크기에 관해서는 분산계 ER유체에 비해 MR유체가 100배 정도이고, 고전압을 이용할 필요가 없는 점이 MR유체의 적용가능성이 높게 평가되는 근거로 알려져 있다. 기본점도는 ER유체의 경우가 폭넓게 설정 가능한 것으로 생각된다. 또한 ER유체는 한 쌍의 전극만을 설치하면 그 특성을 이용할 수 있다는 간편성을 가지고 있으나, 높은 전압을 부가해야 하는 단점을 가지고 있다. 응답특성은 ER유체의 경우가 양호하다는 것을 고려하면 ER유체와 MR유체는 용도에 의해 각각 응용 가능성이 남아 있는 것으로 생

각된다.<sup>5)</sup>

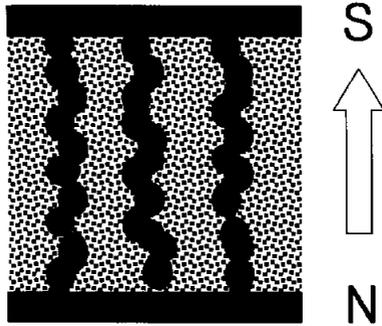
외부에서 자장을 부과하면 MR유체 내부의 철 분말입자가 자계방향으로 사슬모양의 클러스터(cluster)가 형성되고 자장의 세기에 따라서 클러스터의 밀도가 변화한다. 이러한 MR유체의 유동 특성은 자극과 유체의 상대운동에 따라서 Fig. 2.2와 같은 형태로 분류할 수 있다. 그림(a)와 같이 전장을 부과하지 않았을 경우, 유체내부의 미립자는 불규칙적으로 분산되어 있다.

자기장을 부과하였을 경우에 그 미립자들은 사슬구조를 형성하여 그림(a)의 전단모드(shear mode)는 평행한 두개의 평판 중 한쪽의 평판은 고정되어 있고, 다른 한쪽이 회전이나 이동을 하는 형태이다. 그림(b)의 유체 유동모드(flow mode)는 두 평판은 고정되어 있고, 고정된 평판 사이로 유체가 이동하는 형태이다. 그림(c)의 스퀴즈모드(squeeze mode)는 유체의 유동과 평판의 움직임이 수직한 방향으로 일어나 저항하는 모습을 나타내고 있다.<sup>4)</sup>

또한 실제 응용장치에 MR유체를 적용하기 위해서는 유체의 전단응력, 전단속도비, 점도 등의 역학적 특성에 관한 거시적인 실험 연구가 매우 중요한 부분이다. MR유체는 자기장의 무부가시에는 Newton 유체의 특성을 나타내지만, 부가되는 자기장의 크기에 따라 유체의 항복응력이 증가하는 특성을 보이고 MR 유체는 외부에서 부가되는 자기장에 대하여 함수관계를 갖기 때문에 용매와 입자 사이의 투과율(permeability)의 차이, 입자의 결정구조 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.<sup>12)-17)</sup> 본 연구에 사용된 MR유체는 미국 LORD 사의 MRF-126QD이다. MRF-126QD의 밀도는  $2.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 이고, 점도는  $0.47 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ 이다.



( a ) Without magnetic field

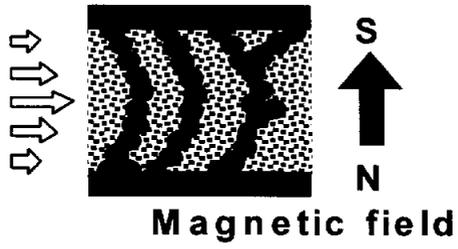


( b ) Magnetic field applied

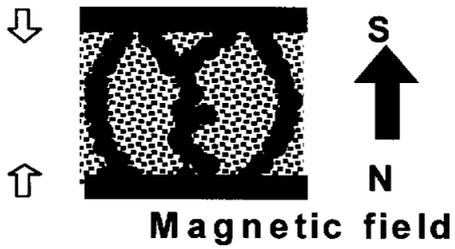
Fig. 2.1 MR effect



(a) Shear mode



(b) Flow mode



(c) Squeeze mode

Fig. 2.2 Modes of MR fluid

## 2.2 MR 유체를 이용한 감쇠기의 동특성

가능성 유체로서 잘 알려진 MR유체와 ER유체는 부가하는 자기장이나 전장의 변화에 따라서 유체의 항복응력이 변화하는 Bingham 유체의 특성을 나타낸다.<sup>7)</sup> Bingham 유체의 특성을 가진다는 것은 MR유체 및 ER유체에 자장이나 전장이 증가함에 따라서 Coulomb 마찰이 증가한다는 것을 의미한다.

이들 유체를 이용한 감쇠기의 특성에 Coulomb 마찰의 특성이 지배적으로 나타난다는 보고가 있다.<sup>18),19)</sup> 그러나 이들 논문에서는 감쇠기 내부에는 기본적으로 실(Seal)의 마찰과 실린더 벽면과 피스톤 가이드 사이에서 마찰이 일어나고 있으나, 이들 마찰력에 대한 정확한 평가 없이 자장 및 전장변화에 대한 마찰력의 증가는 이들 MR유체 및 ER유체의 특성변화에 의한 것으로만 간주하고 있다. 즉, 유체의 항복응력이 변화하여 Coulomb 마찰이 작용하는 것으로 간주하고 있다. 그러나 ER유체를 이용한 SFD 및 MR유체를 이용한 마운트 내부에 외부적인 마찰이 없는 경우이므로 자장을 부가함에 따라서 Coulomb 마찰의 특성은 보이지 않고, 점성감쇠의 특성이 지배적으로 나타난다는 보고가 있다.<sup>7),9)</sup>

### 3. 다방향 제진형 마운트의 감쇠 특성 해석

#### 3.1 마운트의 기본방정식

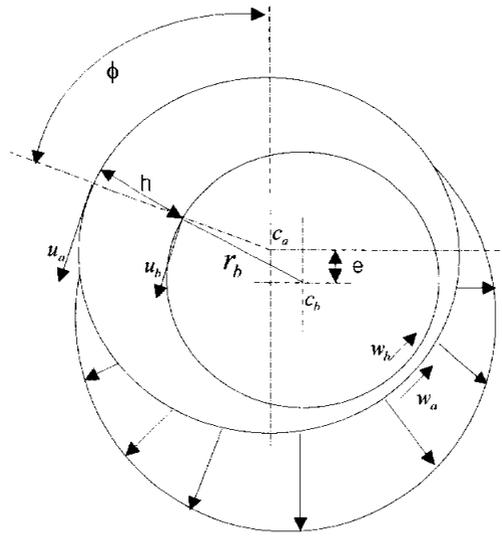
다방향 제진형 마운트 내에 형성되는 압력 분포는 윤활 유체의 유동상태를 나타내는 일반적인 레이놀즈(Reynolds)의 편미분 방정식을 통해서 얻을 수 있다. 이 방정식은 Navier-stokes 방정식과 연속방정식으로부터 아래와 같은 가정을 통해 서술된다.

- 1) 유체의 관성력은 무시된다.
- 2) 유막의 두께간에 압력 변화는 없다.
- 3) 유체는 뉴턴 유체이고 비압축성이며 층류유동이다.
- 4) 점성은 유막에 걸쳐서 일정하다.
- 5) 벽과의 미끄럼은 없다. (유체-고정경계부 사이)

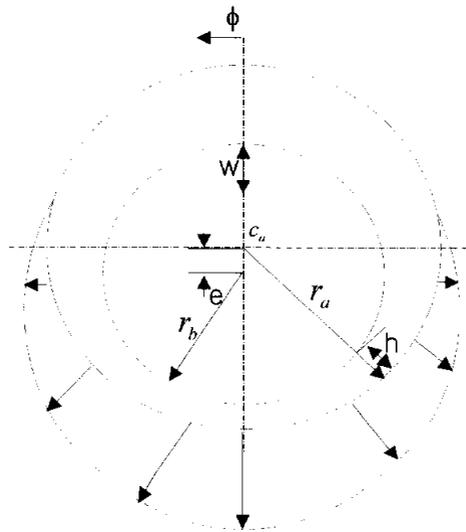
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu U \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) + 12\mu \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) \quad (3.1)$$

식(3.1)에 있어서 우변 항의 물리적인 의미는 유체 윤활의 압력 발생의 원인들을 나타낸다. 첫째 항은 Fig. 3.1(a) 쐐기형 유막효과(wedge action)을 나타낸 것으로 자전하는 내륜의 편심으로 인해 형성된 좁아지는 윤활 틈새에 의해 형성되는 압력이다.

둘째 항은 Fig. 3.2(b) 압착 효과(squeeze action)를 나타내는 것으로 내륜 중심이 외륜에 반경방향 속도로 접근하게 되어 윤활 매체를 압착시킴으로 생기는 압력이다.



(a) Wedge action



(b) Squeeze action

Fig. 3.1 Geometry of multi-directional mount

다방향 제진형 마운트는 Fig. 3.2의 (a)와 같이 옆면 형상을 갖는데, 이것은 마운트의 내측인 스프링 리테이너(retainer) 역할을 하는 내륜에 마운트의 지지 스프링과 질량부의 지지보가 설치되어있고, 또한 전자석 코일이 감겨 있다. 지지스프링은 반지름방향에 대해서 대칭으로 이루어져 있으므로 모든 방향에 대해서 같은 강성과 감쇠력을 갖는다. 마운트의 내, 외측 사이에 MR유체가 채워지게 되며, 고무판을 이용하여 MR유체를 밀봉하였다. 내부 마운트가 운동함으로써 유막 틈새는 변화되고, 이로 인해 유막 틈새 내에 압력이 형성된다. 내륜의 회전이 제한되고 스퀴즈 현상만을 고려하며 이때, 축방향으로의 유출이 없다고 가정하면 경계조건은 아래와 같이 나타낼 수 있고 극좌표로 변환하면 식(3.1)은 식(3.2)로 나타낼 수 있다. 식(3.1)에서 내륜의 회전이 없고( $U=0$ ) 축방향은 고무판으로 실링되어 있기 때문에 축방향의 유출이 없으며 따라서 축방향의 압력 변화가 없다. 내륜의 중심이 하우징과 일치하였을 때( $\varepsilon=0$ )에는 압력이 발생하지 않는다( $p=0$ ) 따라서 식(3.1)로부터 다방향 제진형 마운트의 기본 방정식을 다음과 식과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial \phi} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \phi} \right) = 12r^2 \mu \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.2)$$

여기서  $h$ 는 유막의 두께이다. 식(3.2)는 본 연구에 사용된 다방향 제진형 마운트의 해석을 위한 기본식으로 이용된다.

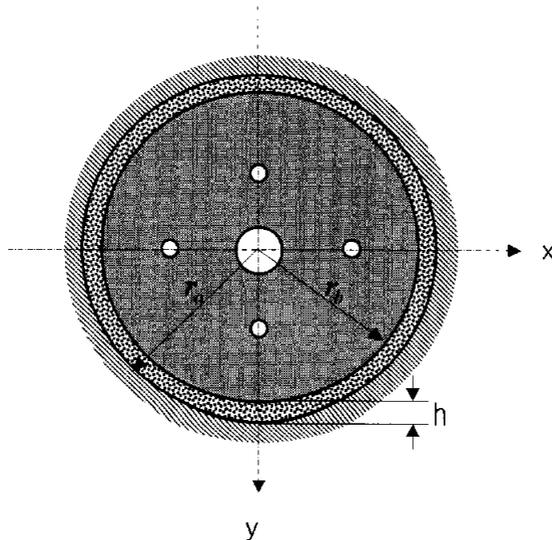


Fig. 3.2 The side of multi-directional mount

외륜과 내륜에 의한 틈새  $h$ 는 다방향 제진형 마운트의 형상을 그림 Fig. 3.3에서 보여지는대로 유막의 두께가 가장 작은 부분에서  $\phi=0$ 으로 하면, 유막 간격은 다음과 같이 식(3.3)으로 표현될 수 있다.

$$h = c(1 - \varepsilon \cos \phi) \quad (3.3)$$

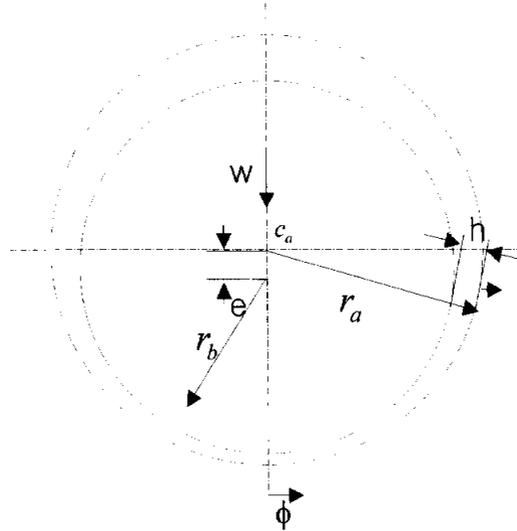


Fig. 3.3 Coordinate system

여기서  $c$ 는 초기유막의 두께이고,  $\varepsilon (= \frac{e}{c})$ 는 편심율이다.

식(3.3)을 식(3.2)에 대입하여 나타내면 식(3.4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial \phi} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \phi} \right) = -12r^2 \mu \frac{\partial e}{\partial t} \cos \phi \quad (3.4)$$

식(3.4)에서  $(w = \frac{\partial e}{\partial t})$ 를 적용하면 식(3.5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial \phi} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \phi} \right) = -12r^2 \mu w \cos \phi \quad (3.5)$$

식(3.5)를  $\phi$ 로 적분을 하면 다음 식(3.6)과 같이 된다.

$$\frac{\partial p}{\partial \phi} = -\frac{12r^2 \mu w \sin \phi}{h^3} + \frac{A}{h^3} \quad (3.6)$$

내륜의 중심이 외륜과 일치( $\varepsilon=0$ ) 하였을 때에는 압력이 발생하지 않기에  $A=0$ 가 된다.

$$\frac{\partial p}{\partial \phi} = -\frac{12r^2 \mu w \sin \phi}{h^3} \quad (3.7)$$

식(3.7)에  $h = c(1 - \varepsilon \cos \phi)$ 를 대입하면 식(3.8)과 같이 된다.

$$\frac{\partial p}{\partial \phi} = -\frac{12r^2 \mu w \sin \phi}{c^3(1 - \varepsilon \cos \phi)^3} \quad (3.8)$$

다시  $\phi$ 에 대하여 적분하면 식(3.8)은 식(3.9)와 같이 나타내어진다.

$$p = \frac{6\mu r^2 w}{\varepsilon c^3(-1 + \varepsilon \cos \phi)^2} + B \quad (3.9)$$

편심률이 0에 접근( $\varepsilon \rightarrow 0$ )하면 압력이 발생되지 않는다. ( $p=0$ ) 식(3.9)의 B는 다음과 같이 된다.

$$B = -\frac{6\mu r^2 w}{\varepsilon c^3} \quad (3.10)$$

식(3.10)을 식(3.9)에 대입하여 정리하면 아래와 같다.

$$p = \frac{6\mu r^2 w}{c^3} \frac{\cos \phi (2 - \epsilon \cos \phi)}{(-1 + \epsilon \cos \phi)^2} \quad (3.12)$$

압력을 회전방향과 축 방향에 대하여 적분하여 감쇠력  $F_d$ 을 구하면, 아래와 같다.

$$F_d = 2 \int_0^\pi \int_0^b p \cos \phi dz r d\phi \quad (3.13)$$

여기서  $b$ 는 축 방향의 길이이다. 식(3.13)을 축 방향에 대하여 적분하면 감쇠력은 식(3.14)와 같다.

$$F_d = \frac{12\mu r^3 w}{c^3} b \int_0^\pi \frac{\cos^2 \phi (2 - \epsilon \cos \phi)}{(-1 + \epsilon \cos \phi)^2} d\phi \quad (3.14)$$

다시 식(3.14)을 회전방향  $\phi$ 에 대하여 적분하면 식(3.15)와 같다.

$$F_d = \frac{12\mu r^3 w b}{c^3} \frac{-\pi}{(-1 + \epsilon) \sqrt{\frac{1 - \epsilon}{1 + \epsilon} (1 + \epsilon)^2}} \quad (3.15)$$

감쇠력의 분모를 정리하면 식(3.15)을 식(3.16)과 같이 된다.

$$F_d = \frac{12\pi\mu r^3 w b}{c^3 (1 - \epsilon^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.16)$$

감쇠계수는 아래와 같이 표현되어진다.

$$C_d = \frac{F_d}{w} = \frac{12\pi\mu r^3 b}{c^3 (1 - \epsilon^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.17)$$

### 3.2 계산결과

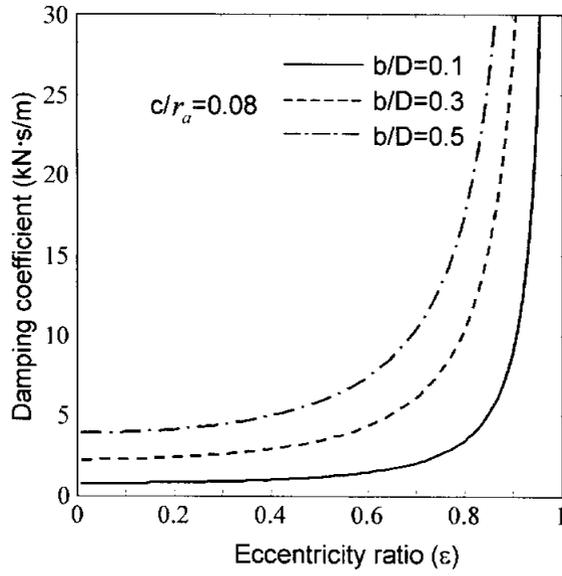
위의 수식의 유도과정을 이용하여 각 설계 변수에 대하여 감쇠계수를 구하였다. 계산시에 상대 편심률  $\epsilon$ , 진폭비  $b/D$ , 내륜의 반지름과 틈새의 비  $c/r_o$ 를 이용하였다. 각각의 계산은 내륜의 지름  $D=80\text{mm}$ 는 고정된 상태에서 내륜의 편심과 마운트의 틈새에 대한 상대 편심률  $\epsilon=0\sim 0.99$ 에 따라 수행되어 그래프를 나타내었다.

Fig. 3.4는 내륜의 반경에 대한 틈새비  $c/r_o$ 에 대하여 편심률  $\epsilon$ 에 따른 감쇠계수  $C_d$ 를 계산한 결과이다.

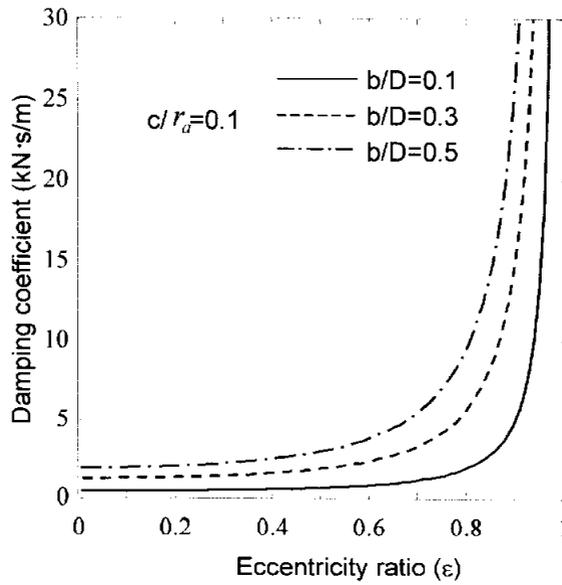
Fig. 3.4에서처럼 편심률  $\epsilon$ 이 작은 범위에서는 거의 선형적으로 감쇠계수의 값이 증가하나 편심률  $\epsilon$ 이 0.8 이상의 값을 갖을 경우에는 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

내륜과 외륜의 틈새가 커질수록 감쇠계수는 점점 낮아짐을 볼 수 있으며 이것은 스퀴즈 현상을 일으키는 윤활유의 변화량이 감소하는 것으로 인한 것이라 판단된다. 또한 진폭비  $b/D$ 가 커질수록 감쇠계수  $C_d$ 는 증가한다. 본 논문에서는 설계된 다방향 제진형 마운트는 내륜의 지름이  $D=80\text{mm}$ 이고 폭이  $b=34\text{mm}$  이기에  $b/D=0.45$ 에 해당된다.

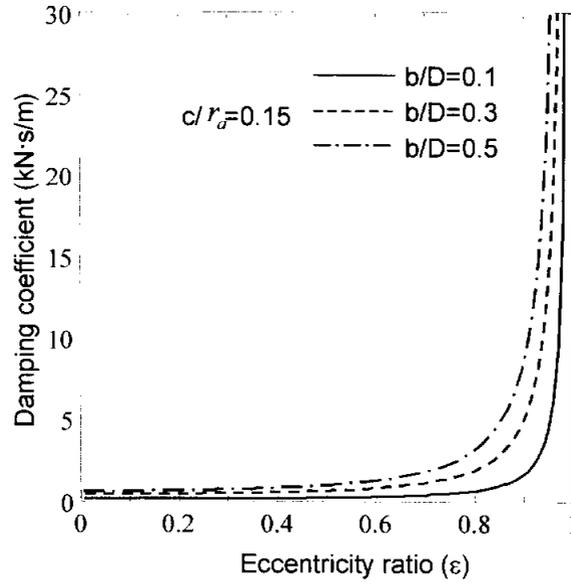
만약 감쇠계수를 높이고자 한다면 내륜의 폭을 넓히고 마운트 틈새는 줄이면 된다. 하지만 내륜의 상하 행정을 고려하여 여기서는 틈새  $c$ 는  $6\text{mm}$ 를 선택하였다.



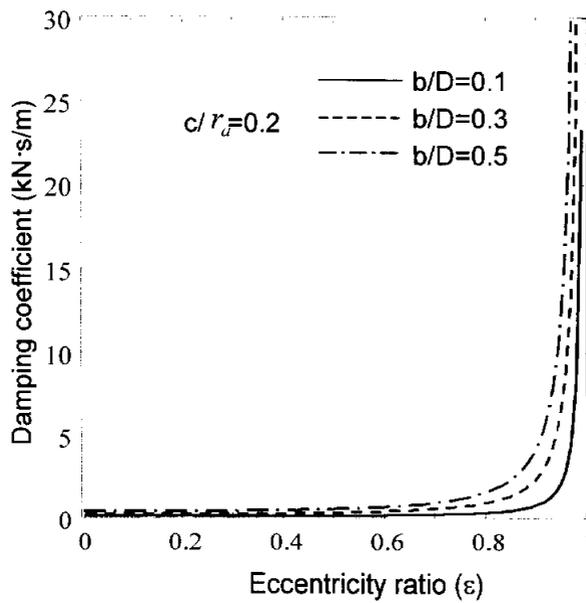
(a)  $c/r_a = 0.08$



(b)  $c/r_a = 0.1$



(c)  $c/r_a = 0.15$



(d)  $c/r_a = 0.2$

Fig. 3.4 Damping coefficient according to eccentricity ratio

## 4. 다방향 제진형 마운트의 모델링

MR유체(Magneto-Rheological fluid)는 자기장의 세기를 변화시킴으로써 유체의 겔보기 점도를 제어할 수 있는 기능성유체로 잘 알려져 있다. 수동형 마운트에 사용되는 윤활유대신에 MR유체를 적용함으로써 폭 넓은 주파수 범위에서 진동을 감소 시키는 것이 가능하게 된다.

본 연구에서는 자기장의 변화에 따라서 MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트의 특성이 어떠한지 알아 보기 위해 2가지 모델링에 대한 응답 특성을 파악하고자 한다. 따라서, 하나의 질량만을 지지하는 다방향 제진형 마운트로 모델링하고 평가하였다. 일반적으로 유체의 점도를 측정하는 형식의 회전식 점도계로 ER 혹은 MR유체의 점도를 측정하면 그림과 같이 전단속도에 대해서 전단응력을 나타내면 전단속도가 0인 지점의 전단응력 즉 항복응력이 증가하는 것으로 나타난다. 이와 같은 유체를 Bingham 유체라고 한다. 이는 ER유체를 이용한 SFD 및 MR유체를 이용한 마운트 내부에 외부적인 마찰이 없는 경우는 자기장을 부가함에 따라서 Coulomb 마찰의 특성은 보이지 않고, 점성 감쇠의 특성이 지배적으로 나타난다는 보고가 있다.<sup>7),9),10),18)</sup>

MR이나 ER유체에 부가하는 자장이나 전장이 증가함에 따라서 Coulomb 감쇠력이 크지는 것으로 모델링하는 경우가 많다. 따라서 MR유체나 ER유체를 이용한 마운트의 특성이 Bingham 유체특성이 나타나는 것으로 가정을 하고 이론적 해석을 하시는 분들이 대부분이다. 그런데, 실제로 MR유체나 ER유체를 이용한 마운트의 특성이 Bingham유체의 특성이 나타나는 경우는 단지 Suspension의 경우를 제외하고는 거의 없는 것으로 판단하고 있다. 참고로, 마운트에 Bingham유체가 사용되었다는 것은 마운트의 특성은 Coulomb 감쇠특성을 나타나게 된다. Suspension의 경우에는 기본적으로 Seal에 의한 큰 마찰력이 작용하기 때문에 MR유체에 부가하는 자장을 증가시키면 Coulomb 감쇠특성이 지배적으로 나타나게 된다. 그 외의 MR이나 ER유체를 이용한 마운트나 SFD의 경우에는 Coulomb 감쇠특성이 확실하게 나타나는 경우가 없음에도 불구하고 MR이나 ER유체에 부가하는 자장이나 전장이 증가함에 따라서 Coulomb 감쇠력이 크지는 것으로 모델링하는 경우가 많이 있다.

따라서 1 자유도계에 대하여 자기장이 변화함에 따라 Coulomb 마찰이 변화하는 Bingham 모델과 등가 강성과 등가 점성감쇠가 변화하는 모델을 이용하여 전달률의 변화를 시뮬레이션 했다. 이는 본 다방향 제진 마운트내에 squeeze mode에서의 MR유체에 자기장을 가함에 따른 MR유체의 특성을 예측할 수 있다.

Fig. 4.2에  $M$ 은 질량,  $K$ 는 강성계수,  $C_d$ 는 감쇠계수 그리고  $F_d$ 는 Coulomb 마찰력을 나타낸다. Fig. 4.2(a)는 마운트에 자기장  $H$ 을 부가함에 따라 강성  $K$ 과 점성  $\mu(H)$ 가 변화하는 모델이다.

$$F = \mu(H) \dot{\gamma} + K(H)\gamma \quad (4.1)$$

Fig. 4.2(b)는 마운트에 자기장  $H$ 을 부가함에 따라 점성  $\mu$ 은 변화하지 않고 항복응력  $\tau_0(H)$ 이 변화하는 모델이다.

$$F = \tau_0(H) + \mu \dot{\gamma} \quad (4.2)$$

하나의 질량의 진동을 제진하기위한 MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트 장치의 개략도를 Fig. 4.1에 나타내었다.

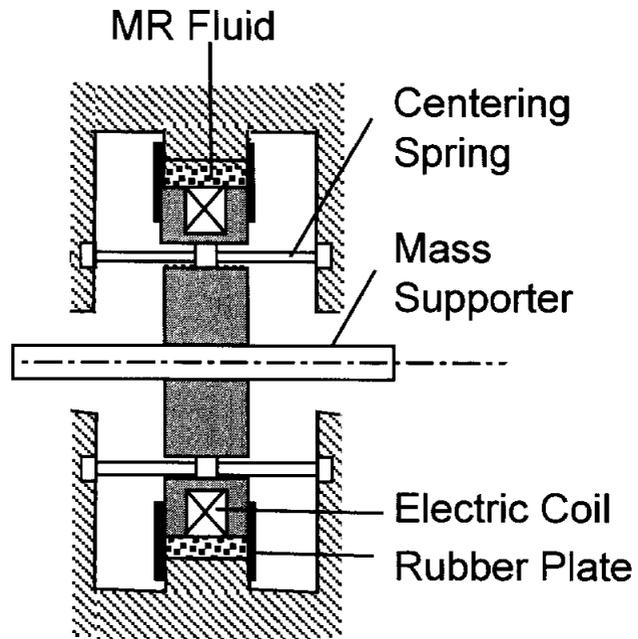
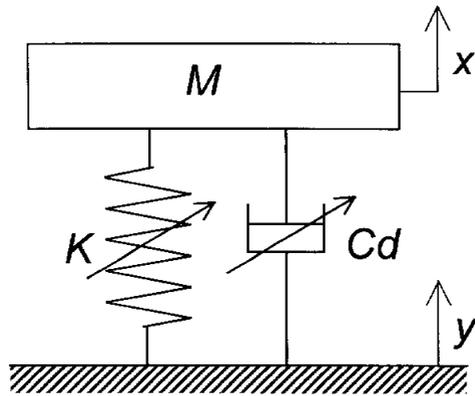
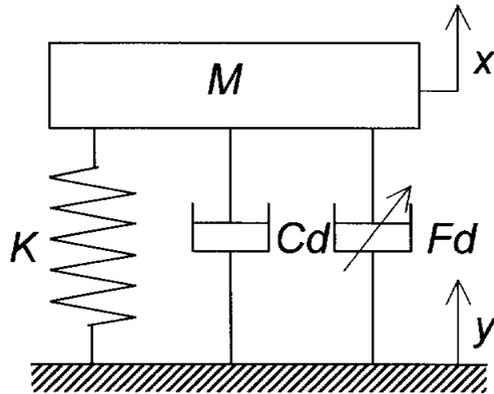


Fig. 4.1 Schematic of multi-direction mount using MR fluid



(a) Various stiffness and various viscous damping model



(b) Bingham model

Fig. 4.2 Equivalent model of multi-directional mount using MR fluid

Fig. 4.1에 하나의 질량에 점성 감쇠력이 작용하고, 그리고 외륜이 외부구조물에 고정된 것으로 가정하면 Fig. 4.2(a), (b)와 같이 1자유도계로 모델링하여 나타낼 수 있다.

Fig. 4.2(a)에서 부가되는 자장의 변화에 따라 등가 점성감쇠와 등가 강성이 변화한다고 가정하면, 1자유도계를 Newton의 운동법칙을 이용하여 계의 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C_d(H)(\dot{x} - \dot{y}) + K(H)x = 0 \quad (4.3)$$

$$M\ddot{x} + C_d(H)\dot{x} + K(H)x = C_d(H)\dot{y} + K(H)y \quad (4.4)$$

식(4.4)을 이용하여 변위 전달률을 구하기 위하여 기저 가진 입력변위  $y$ 와 응답변위  $x$ 의 해를 다음과 가정한다.

$$x = Xe^{j\omega t} \quad (4.5)$$

$$y = Ye^{j\omega t} \quad (4.6)$$

여기서  $\omega \left( = \sqrt{\frac{K}{M}} \right)$ 는 고유진동수이고,  $X, Y$ 는 조화가진 입력의 크기를 나타내며,  $j$ 는  $\sqrt{-1}$ 이다. 식(4.5)과 식(4.6)을 식(4.4)에 대입을 하면 식(4.7)과 같이 된다.

$$(-\omega^2 M + j\omega C + K)X = (C\omega j + K)Y \quad (4.7)$$

식(4.7)에서 변위 전달률  $\left( -\frac{X}{Y} \right)$ 을 좌변에 두고 우변을 실수와 허수로 정리한다.

$$\frac{X}{Y} = \frac{K(K - m\omega^2) + (C\omega)^2}{(K - m\omega^2)^2 + (\omega C)^2} - j \frac{\omega^3 C m}{(K - m\omega^2)^2 + (\omega C)^2} \quad (4.8)$$

식(4.8)의 우변의 실수 항을  $Re$ 라 하고 허수 항을  $Im$ 이라고 하면

$$Re = \frac{K(K - m\omega^2) + (C\omega)^2}{(K - m\omega^2)^2 + (\omega C)^2} \quad (4.9)$$

$$Im = \frac{\omega^3 Cm}{(K - m\omega^2)^2 + (\omega C)^2} \quad (4.10)$$

변위 전달률은 식(4.11)과 같다.

$$\left| \frac{X}{Y} \right| = \sqrt{Re^2 + Im^2} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}{(1 - (\omega/\omega_n)^2)^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}} \quad (4.11)$$

식(4.11)에 따른 변위 전달률을 Fig. 4.4(a)에 나타내었다. 계산에 사용된 변수는 Table 4.1에 나타내었다.

Table 4.1 Parameters used in model of Fig. 4.2(a)

Description	Value
mount mass $M$	5 kg
spring coefficient of mount $K_1$	$2.8 \times 10^9$ N/m
$K_2$	$3.0 \times 10^5$ N/m
$K_3$	$3.5 \times 10^5$ N/m
$K_4$	$5.0 \times 10^5$ N/m
$K_5$	$6.0 \times 10^5$ N/m
damping ratio of mount $\zeta = C_d / \{2(MK)^{1/2}\}$	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3

Fig. 4.2(b)에서  $C_d$ 는 자장이 부가되지 않을 때에 질량에 작용하는 점성감쇠 계수(damping coefficient),  $F_d$ 는 마운트에 자기장의 변화에 따라서 발생하는 마운트의 쿨롱마찰력(Coulomb friction force)을 나타낸다. 식(4.12)와 (4.13)은 비선형 미분 방정식이므로 수치해석을 이용하여 각 주파수에 대한 변위응답의 최대값을 입력변위로 나누어 마운트 내부에 쿨롱마찰의 변화에 따른 질량의 전달률을 Fig. 4.4(b)에 나타내었다. 계산에 사용된 매개 변수는 Table 4.2에 나타내었다. 매개 변수 값은 실험 결과를 이용하여 결정하였으며 수치해석은 Newmark  $\beta$ 법을 사용하였고 실행방법은 Fig. 4.3에 나타내었다. Newmark  $\beta$ 법에  $\beta$ 의 값은 1/4이고,  $\delta t$ 는 시간간격,  $u(t)$ 는 변위,  $\dot{u}(t)$ 는 속도,  $\ddot{u}(t)$ 는 가속도를 의미한다.

이와 같은 1자유도계를 Newton의 운동법칙을 이용하여 계의 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + C_d(\dot{x} - \dot{y}) + F_d \cdot \text{sgn}(\dot{x} - \dot{y}) + K(x - y) = 0 \quad (4.12)$$

$$M\ddot{x} + C_d\dot{x} + Kx = C_d\dot{y} + Ky - F_d \cdot \text{sgn}(\dot{x} - \dot{y}) \quad (4.13)$$

Table 4.2 Parameters used in Bingham model

Description	Value
Mount mass $M$	5 kg
Spring coefficient of mount $K$	$2.8 \times 10^3$ N/m
Damping ratio of mount $\zeta (= C_d/2(MK)^{1/2})$	0.1
Coulomb friction force $\mu (= F_d/(C_d\omega))$	0 ~ 4

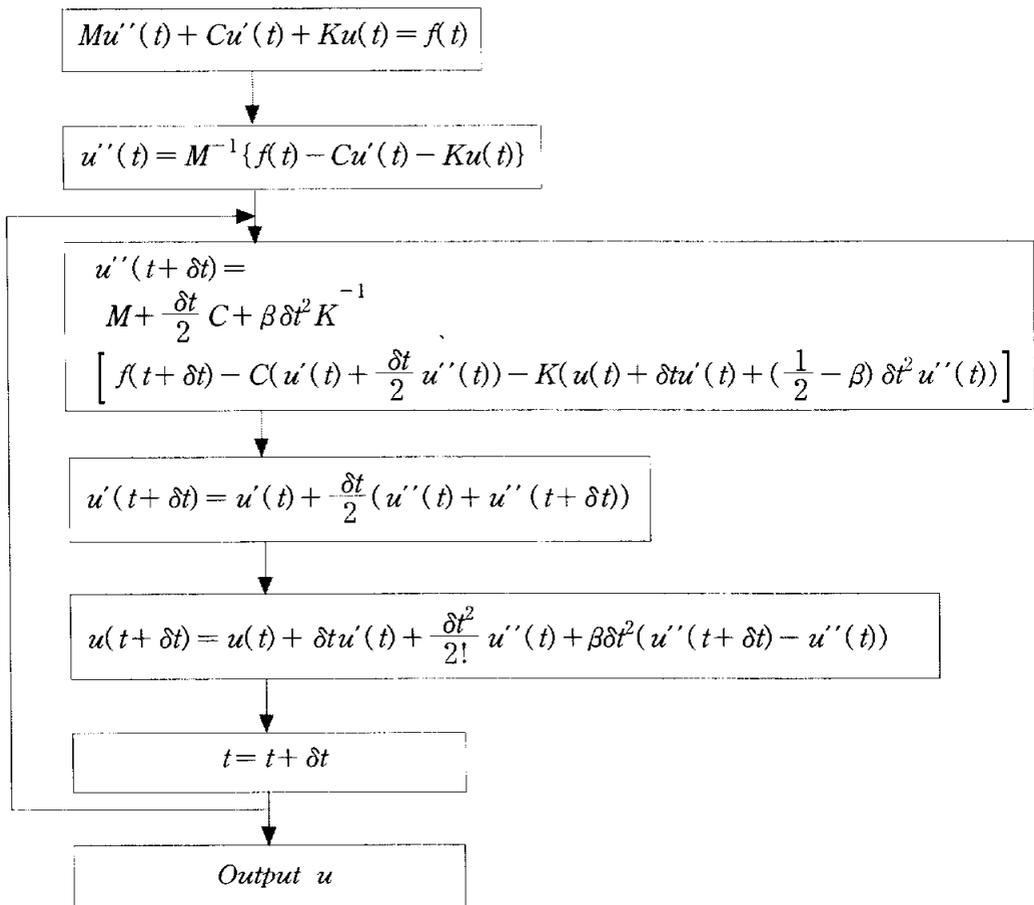
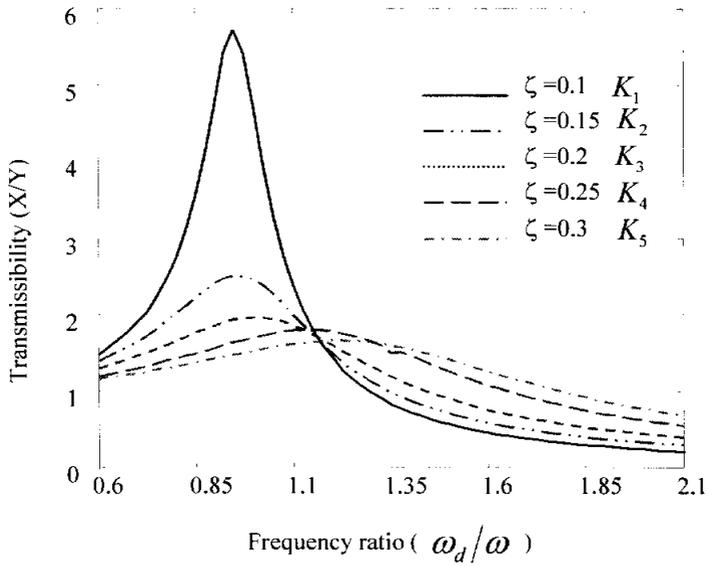
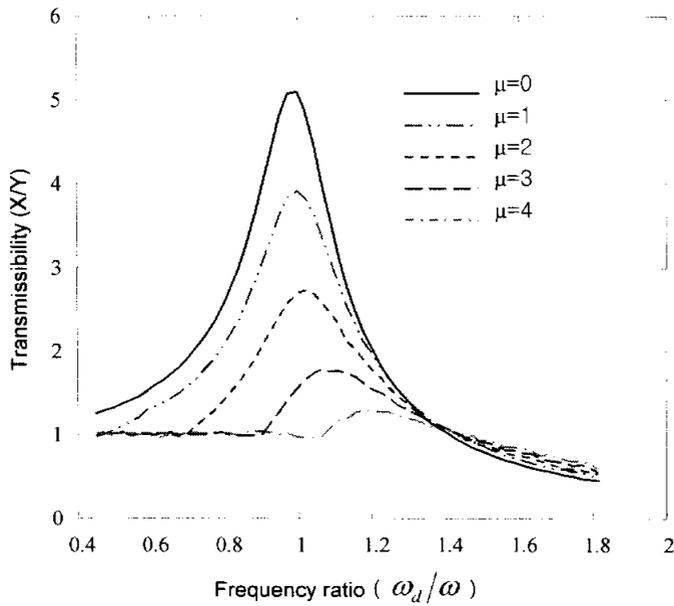


Fig. 4.3 Newmark  $\beta$  method for numerical solution



(a) Various stiffness and various viscous damping model



(b) Bingham model

Fig. 4.4 Transmissibility

Fig. 4.4(a)와 Fig. 4.5(b)에서  $\omega_d$  는 베이스의 가진 주파수(rad/s),  $\omega$  ( $= (K/M)^{1/2}$ )는 마운트의 고유 진동수,  $\mu (= F_d / C_d)$ 는 마운트의 점성감쇠계수에 대한 쿨롱마찰력의 비를 나타낸다.

이상에서는 방정식에 의해 두가지 모델에 대하여 각각의 전달률에 관하여 이론적 평가를 수행하였다. Fig. 4.4(a)은 등가 점성 감쇠와 등가 강성이 증가함에 따라 공진 주파수의 피크 값이 낮아지고 주파수는 높아지는 현상이 생긴다. 또한 Fig. 4.4(b)의 Bingham 모델의 전달률 그래프에서는 마찰력이 증가할수록 공진주파수의 피크 값이 상승하며<sup>10)</sup>, 전달률이 주파수비  $\sqrt{2}$ 에서 역전한다. 이는 마찰력에 의해서 공진 주파수 피크가 높아짐에 기인한 것으로 보여진다.

특이할 만한 현상은 전류가 증가 함에 따라서 공진주파수가 증가하고 있음을 확인할 수 있다. 차이점은 Bingham 모델의 경우에는 마찰력이 증가하면 공진 피크가 점차 작아져서 주파수비  $\sqrt{2}$  이상에서는 피크가 나타나지 않지만, 등가 점성 감쇠와 등가 강성이 변화하는 모델은 주파수비  $\sqrt{2}$  이상에서 공진 피크가 나타난다는 점이다. 따라서 MR유체를 적용한 마운트에서 두 번째 모델링과 같은 응답 특성이 나타난다면 MR유체의 거동을 단지 마찰력의 변화만으로 간주하기는 어렵다.

가진주파수의 변화에 따라 그리고 자기장 세기의 변화에 따라 감쇠특성이 변화함으로 수동형 마운트에 비해 보다 효과적으로 진동을 감쇠 시킬 수 있음을 이론적으로 확인할 수 있다.

## 5. 실험

### 5.1 실험장치의 설계 및 제작

본 연구에서는 자기장의 변화에 따라서 MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트가 squeeze mode로 작동하며 자기장의 변화에 따른 제진 성능이 우수함을 알기위해 하나의 질량만을 지지하는 MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트를 설계 및 제작하였다.

MR 유체를 이용한 다방향 제진형 마운트의 상세구조의 개략도를 Fig. 5.1에 나타내었고, 실물의 사진을 Fig. 5.3에 나타내었다. 마운트의 내륜에 마운트의 지지스프링과 질량부의 지지 보가 설치되어있고, 또한 전자석 코일이 감겨 있다. 지지스프링은 반지름 방향에 대해서 대칭으로 이루어져 있으므로 모든 방향에 대해서 같은 강성과 감쇠력을 갖는 것이 한 방향의 진동을 제진하기 위한 기존 마운트의 기능과의 차이점이다. 마운트의 내, 외측 사이에 MR유체가 채워지게 되며, 고무판을 이용하여 MR유체를 밀봉하였다. MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트의 주요 치수를 Table 5.1에 나타내었다.

Table 5.1 Principal dimensions of multi-direction mount

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

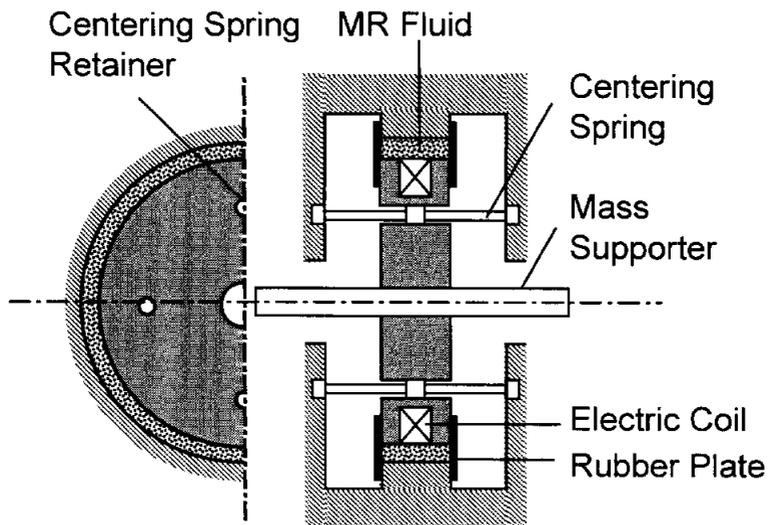
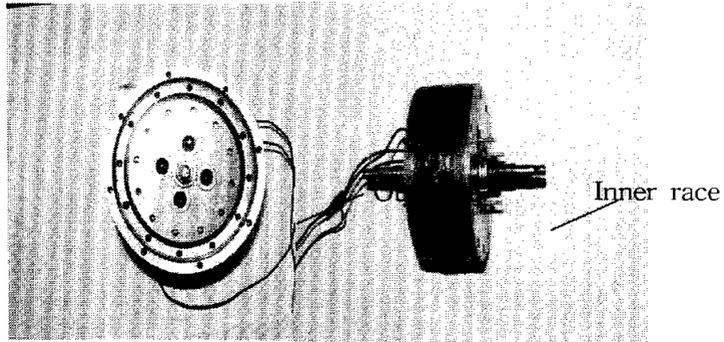
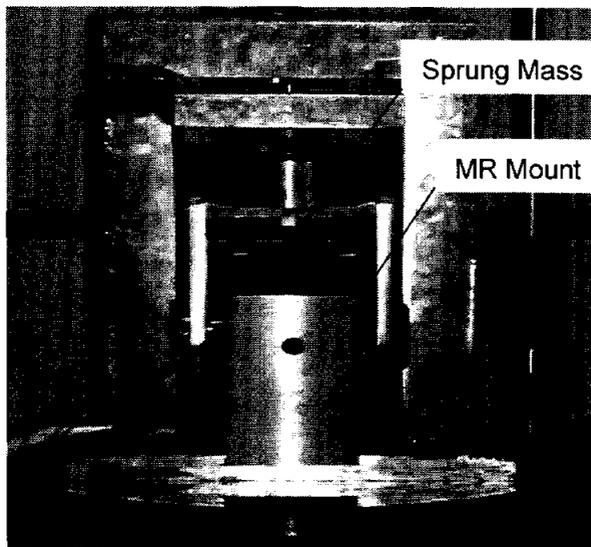


Fig. 5.1 Schematic of multi-directional mount using MR fluid





(a) Mount of out race and inner race



(b) Multi-directional mount with a mass

Fig. 5.3 Experimental apparatus of multi-directional mount

## 5.2 실험 방법 및 계측 방법

MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트의 제진특성을 파악하기 위해 부가하는 전류를 변화시키면서 충격햄머에 의한 타격실험과 가진기에 의한 가진실험을 수행하였다. 마운트의 실험을 용이하게 하기 위하여 질량부에 sliding bearing을 설치하여 상하 방향으로만 진동하게 하였고, 전원 공급장치를 이용하여 전류를 0A~1.5A까지 변화시키면서 실험을 하였다. 타격실험은 충격햄머 이용하여 질량부를 타격하여 얻은 충격햄머의 힘과 변위센서로부터 질량부의 변위를 측정하였으며, 질량부의 변위를 측정하였고, 측정된 힘과 변위파형으로부터 계산된 컴플라이언스를 구하였다. 마운트 질량부 시간응답을 측정하기 위하여 실험에 사용된 충격햄머는 변위센서는 미국 bently nevada사의 모델 02B00ZB8을 사용하였으며, 출력되는 신호를 A/D변화기와 신호 분석기를 사용하여 저장 및 분석하였다. 가진시험은 가진기를 이용하여 가진 변위를 0.1mm로 하여 가진 주파수와 부하되는 전류를 변화시키면서 실험을 수행하여 각 조건에 따른 가진진폭에 대한 가속도계로 측정된 질량부의 진폭비인 전달률 계산하여 마운트의 성능을 평가하였다. 사용된 가속도 센서는 독일의 B&K사의 모델 4371을 사용하였으며, upper frequency limit는 12.6kHz이고, 공진 주파수는 42kHz이다. 신호 분석기는 ZONIC FFT 분석기를 사용하였고, 한 frame당 2048 데이터를 선택하였고, 충격시험시 창함수는 exponential 함수를 사용하였다. 그리고 측정하고자 하는 주파수 범위를 200Hz로 설정하였다.

실험에 사용된 가진기의 구성도를 Fig. 5.4에 나타내었다. 가진기는 frame부, 유압구동 가진부, 유압구동 active suspension 제어 장치 그리고 데이터취득 및 컴퓨터 제어부로 구성되어 있다. 유효 행정은  $\pm 30\text{mm}$  이고, 최고 속도 ( $v = A\omega \sin \omega t$ )는  $1\text{m/s}$  ( $= A\omega$ ) 이다. Servo valve의 정격 유량은  $70\ell/\text{min}$ 이며, 정격 압력은  $20\text{ N/m}^2$ 이다. 제어 방식은 PID제어방식을 사용하고 있으며 위치 센서가 2개와 Load cell 1개가 부착되어 있다. 데이터 취득 컴퓨터 CPU는 586이고 데이터 취득 Card는 A/D가 16channel이고 D/A가 2 channel이다.

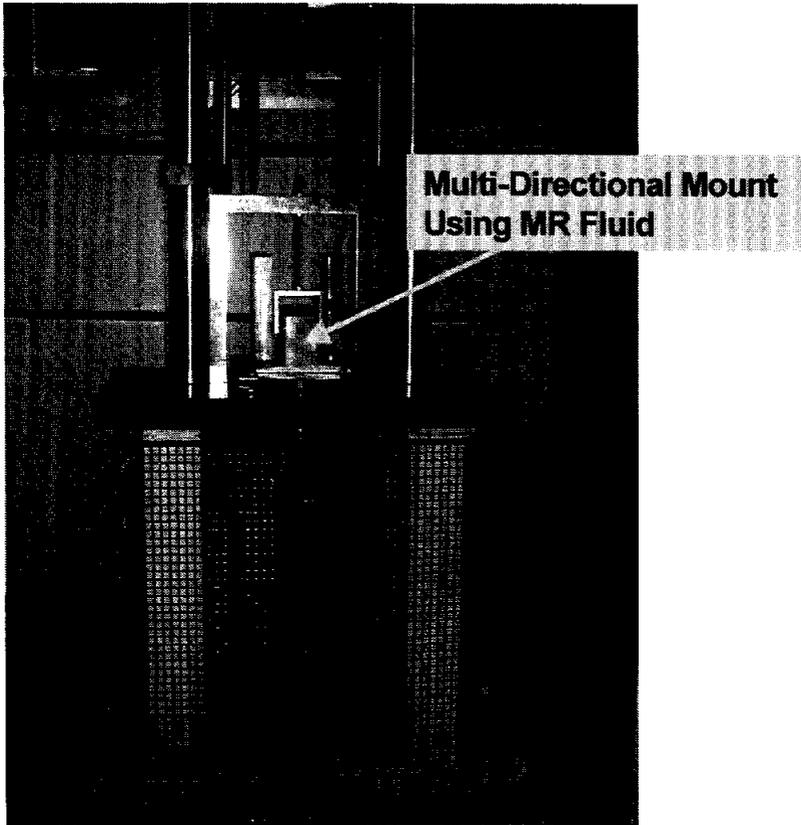


Fig. 5.4 Apparatus of hydraulic type exciter

### 5.3 실험 결과 및 고찰

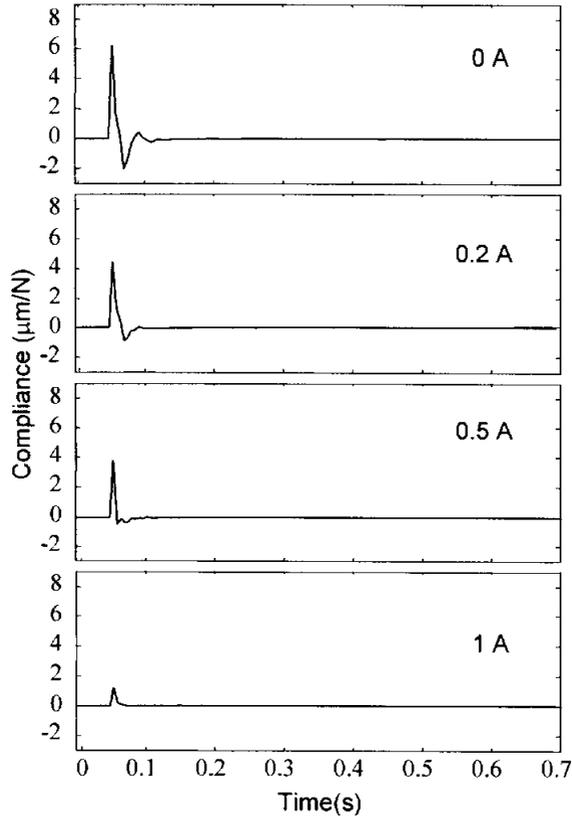
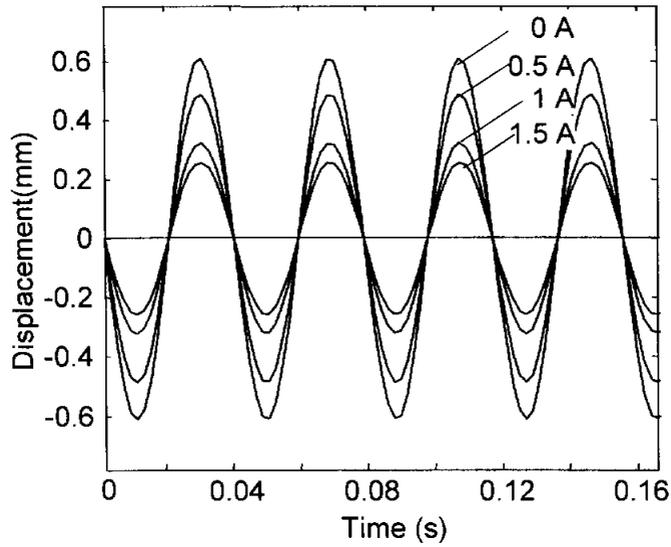


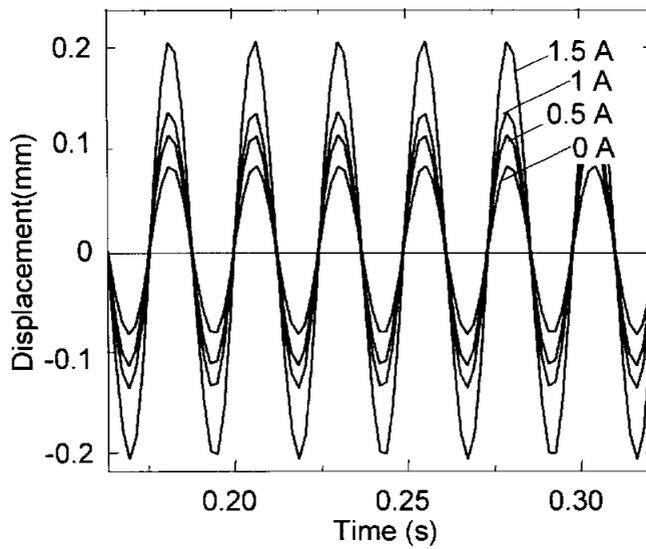
Fig. 5.5 Response to impact test with variation of applied magnetic field

Fig. 5.5는 Impact Hammer에 의한 타격실험으로 부터 얻은 시간에 대한 Compliance를 나타내고 있다. Impact Hammer 용량에 비해서 지지강성이 높고 또한 감쇠력이 크기 때문에 제대로 Impact가진이 되지 못하여 과감쇠 형태로 나타난 것으로 생각된다. 그러나 부가한 전류가 증가함에 따라서 진폭이 작아 짐을 알 수 있다.

Fig. 5.6은 가진기를 이용하여 23Hz와 41Hz로 다방향 제진형 마운트를 가진하고 가속도계로 측정된 질량부의 시간응답을 나타내었다.



(a) 23Hz



(b) 41Hz

Fig. 5.6 Response to excitation test with variation of applied magnetic field

Fig. 5.6은 자장을 부가하지 않았을 경우에 비해 23 Hz의 경우는 부가하는 전류를 증가시켰을 경우에 진폭이 줄어들고 있음을 알 수가 있고, 41Hz에서는 전류가 증가함에 따라서 오히려 진폭이 증가하고 있다. 그 이유는 진동수비가  $\sqrt{2}$ 배 보다 높은 주파수이기 때문이다.

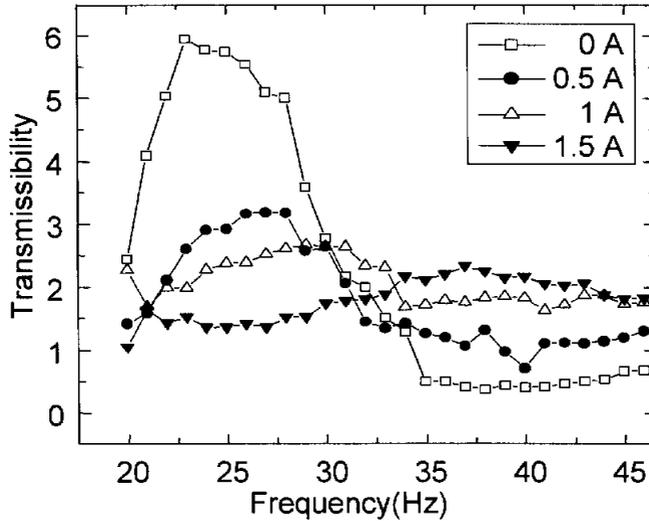


Fig. 5.7 Transmissibility under various magnetic fields

가진부의 최대진폭에 대한 질량부의 최대진폭비를 주파수에 대해서 나타내면 Fig. 5.7과 같다. Fig. 5.6과 같이 32.5 Hz 이하에서는 부가하는 전류가 증가함에 따라서 전달률이 감소하지만, 32.5 Hz 이상에서는 오히려 전달률이 상승한다. 따라서 본 마운트를 제어할 한다면, ON-OFF제어의 경우는 32.5 Hz 이하에서는 전류를 ON, 32.5 Hz 이상에서는 전류를 OFF함으로서 수동의 마운트보다 효율적으로 진동진폭을 줄일 수 있고, 만약 Skyhook제어 이론을 사용하여 제어하면 보다 전달률은 낮출 수가 있다. 또한, 전류가 증가함에 따라서 공진주파수가 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 전류가 증가함에 따라 공진 주파수가 증가하는 현상을 보다 명확히 파악하기 위하여 자장의 크기와 가진 변위의 변화에 따른 힘을 측정했다. 전달력의 특성을 보다 명확하게 관찰하기 위해서 마운트의 Centering Spring을 제거하고 상부에 Force Sensor를 설치하여 힘을 측정했다.

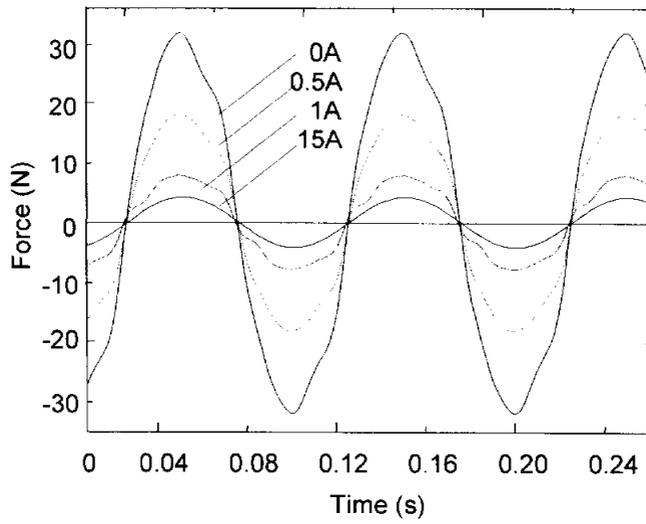


Fig. 5.8 Relation between damping force and time

가진주파수 10Hz, 가진변위 0.3mm로 가진하였을 때 Fig. 5.8의 시간파형이 얻어진다. 위 그림에서 전류의 값이 증가할수록 힘 센서에서 측정된 힘이 증가함을 알 수 있다. 하지만 이것이 마찰에 의한 것인지 감쇠와 강성에 의한 것인지를 위의 그림에서는 판별하기가 어렵다. 이를 위해서 힘-변위 선도 힘-속도 선도로 표현하였다.

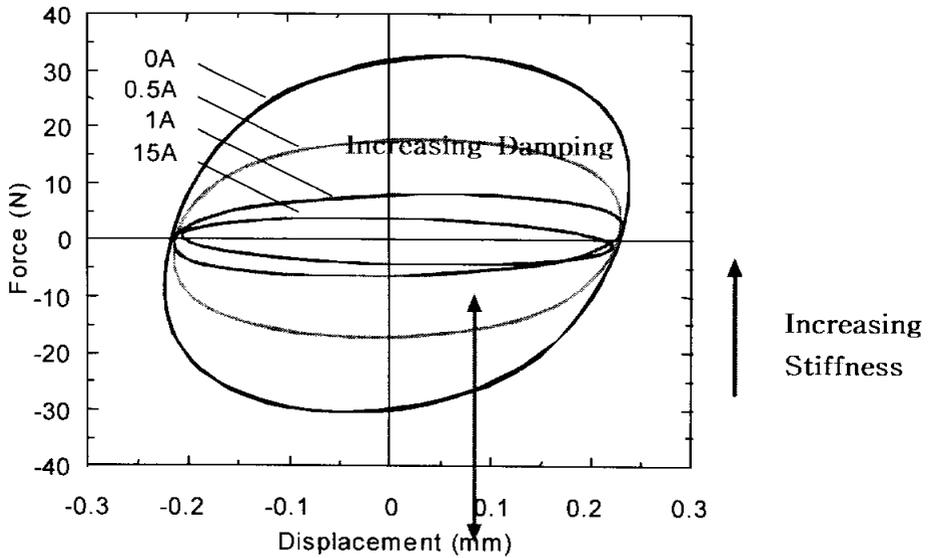


Fig. 5.9 Relation between force and displacement

Fig. 5.9는 가진변위에 대한 힘 선도이다. 이 기울기는 강성의 크기를 나타내고 있고, 직선이 나오지 않는 것은 감쇠력이 존재한다는 것을 의미한다. 따라서 본 선도에서 자장이 증가함에 따라 기울기가 증가하고 loop의 폭이 증가하므로 강성과 감쇠값이 증가함을 알 수 있다. 만약 Coulomb 감쇠력이 지배적이면 사각형의 형태가 나타나야 하지만, Coulomb 감쇠력의 증가는 확인할 수가 없었다.

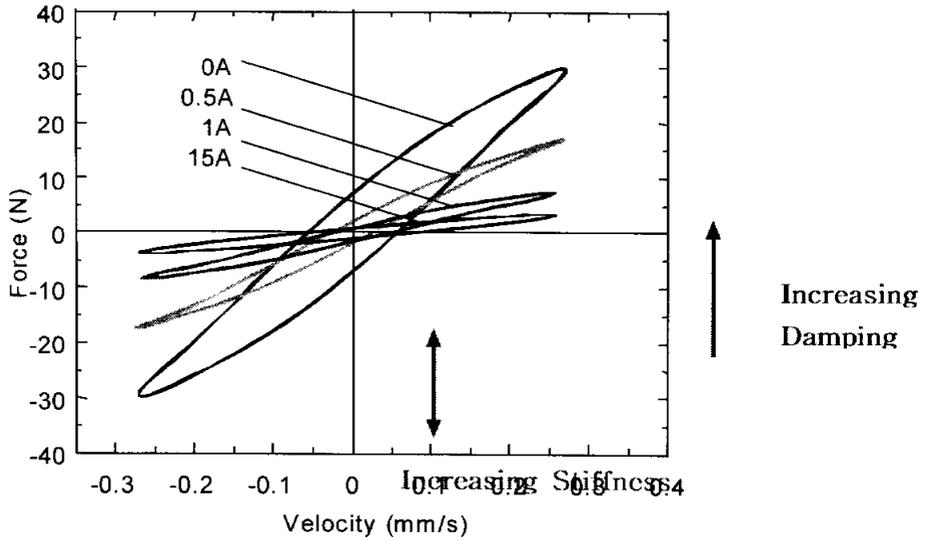


Fig. 5.10 Relation between force and velocity

Fig. 5.10은 가진 속도에 대한 힘 선도이다. 전류가 증가함에 따라 기울기가 증가하고 있고 또한 히스테리시스의 폭이 증가하기 때문에 따라서 점성 감쇠와 강성 값이 증가함을 알 수 가 있다. 그러나 Coulomb 마찰력은 확인하기가 곤란하다. 물론 Coulomb 마찰력이 0 이라고는 하기 어렵지만, 아주 적은 것으로 판단이 된다.

자장의 변화에 따른 MR유체를 이용한 마운트의 감쇠력을 명확히 파악하는 것은 현 시점에서 어렵기에 Fig. 5.11과 같이 등가 점성 감쇠, 등가 강성의 형태로 모델링하였다.

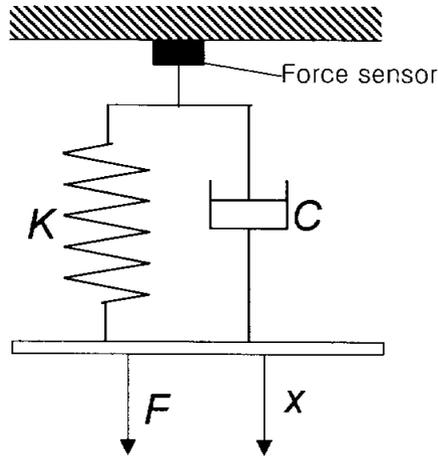


Fig. 5.11 Experimental modeling

위의 모델링과 같이 힘 센서에 작용하는 힘에 대하여 방정식을 세우면 아래 식과 같다.<sup>20)</sup>

$$F = -c(H) \dot{x} - k(H)x \quad (5.1)$$

식(5.1)로부터 1 주기동안 작용하는 소산 에너지(dissipated energy)  $W_d$  는 아래 식으로 표현된다.

$$W_d = \oint F dx = \int_0^{2\pi/\omega} (-c \dot{x} - kx) dx \quad (5.2)$$

여기서  $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ ,  $\dot{x}dt = dx$  이므로

$$W_d = \int_0^{2\pi/\omega} (-c\dot{x} - kx)\dot{x}dt \quad (5.3)$$

정상상태에서  $x = X\sin\omega t$ ,  $\dot{x} = \omega X\cos\omega t$  이므로, 식(5.3)은

$$W_d = \int_0^{2\pi/\omega} (-kX\sin\omega t - cX\omega\cos\omega t)(\omega X\cos\omega t)dt \quad (5.4)$$

식(5.4)와 같이 되고 적분 항을 두 개로 분리하면 아래와 같이 된다.

$$W_d = -c\omega^2 X^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2\omega t dt - k\omega X^2 \int_0^{2\pi/\omega} \sin\omega t \cos\omega t dt \quad (5.5)$$

식(5.5) 우변의 첫번째 항에 대하여 삼각함수의 곱의 공식  $\cos^2\alpha = \frac{1 + \cos 2\alpha}{2}$  을 대입하면

$$-c\omega^2 X^2 \int_0^{2\pi/\omega} \cos^2\omega t dt = -c\omega^2 X^2 \int_0^{2\pi/\omega} \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} dt \quad (5.6)$$

식(5.6)과 같이 되고 이를 적분하면 아래 식(5.7) 및 (5.8)과 같이 된다.

$$-c\omega^2 X^2 \int_0^{2\pi/\omega} \frac{1 + \cos 2\omega t}{2} dt = -c\omega^2 X^2 \left( \left[ \frac{\pi}{\omega} \right]_0^{2\pi/\omega} + \left[ \frac{\sin 2\omega t}{4\omega} \right]_0^{2\pi/\omega} \right) \quad (5.7)$$

$$-c\omega^2 X^2 \left( \frac{\pi}{\omega} + 0 \right) = -\pi c\omega X^2 \quad (5.8)$$

식(5.5)의 우변 두 번째 항에서  $\sin \alpha \cos \alpha = \frac{1 + \sin 2\alpha}{2}$  이므로, 아래와 같이 된다.

$$-k\omega X^2 \int_0^{2\pi/\omega} \sin \omega t \cos \omega t dt = -k\omega X^2 \int_0^{2\pi/\omega} \frac{1 + \sin 2\omega t}{2} dt = 0 \quad (5.9)$$

따라서  $W_d$ 는 아래와 같이 된다.

$$W_d = -\pi c\omega X^2 \quad (5.10)$$

식(5.10)은 1 주기 동안의 면적을 의미한다. 실험을 통해서 얻어지 힘-변위 선도의 1 주기 동안의 면적과 같다. 따라서

$$\pi c_{eq} \omega X^2 = A \quad (5.11)$$

식(5.11)에서  $c_{eq}$ 는 등가 점성감쇠계수이고,  $A$ 는 힘-변위 선도에서 1 사이클 동안의 면적이다.  $c_{eq}$ 에 대해 풀면 식(5.11)는

$$c_{eq} = \frac{A}{\pi\omega X^2} \quad (5.12)$$

등가 강성이 외부에 한일  $W_{ds}$ 는

$$W_{ds} = \oint F dv = \int_0^{2\pi/\omega} (-c \dot{x} - kx) dv \quad (5.13)$$

식(5.13)에서  $\ddot{x} = \frac{dv}{dt}$  에서  $\ddot{x}dt = dv$  이기에 식은 다음과 같이

$$W_{ds} = \int_0^{2\pi/\omega} (-c \dot{x} \ddot{x} - kx \ddot{x}) dt \quad (5.14)$$

식(5.14)로 주어진다. 정상상태에서  $x = X \sin \omega t$ ,  $\dot{x} = \omega X \cos \omega t$   
 $\ddot{x} = -\omega^2 X \sin \omega t$ 이므로 식(5.14)은 식(5.15) 및 (5.16)으로 쓸 수 있다.

$$W_{ds} = \int_0^{2\pi/\omega} (-kX \sin \omega t - cX\omega \cos \omega t)(-\omega^2 X \sin \omega t) dt \quad (5.15)$$

$$W_{ds} = \int_0^{2\pi/\omega} c\omega^3 X^2 \cos \omega t \sin \omega t dt + \int_0^{2\pi/\omega} k\omega^2 X^2 \sin^2 \omega t dt \quad (5.16)$$

식(5.16)의 첫 번째 항에  $\cos \alpha \sin \alpha = \frac{1 + \sin 2\alpha}{2}$  공식을 적용하면

$$\int_0^{2\pi/\omega} c\omega^3 X^2 \cos \omega t \sin \omega t dt = c\omega^3 X^2 \int_0^{2\pi/\omega} \frac{1 + \sin 2\omega t}{2} dt = 0 \quad (5.17)$$

식(5.16)의 두 번째 항에 삼각함수의 곱의 공식  $\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2}$  을 적용하면  
 식(5.18)과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_0^{2\pi/\omega} k\omega^2 X^2 \sin^2 \omega t dt = k\omega^2 X^2 \int_0^{2\pi/\omega} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt \quad (5.18)$$

식(5.18)을 적분하면, 식(5.19)와 같이 된다.

$$k\omega^2 X^2 \left( \left[ \frac{t}{2} \right]_0^{2\pi/\omega} \left[ \frac{\sin 2\omega t}{4\omega} \right]_0^{2\pi/\omega} \right) = k\omega^2 X^2 \left( \frac{\pi}{\omega} - 0 \right) = \pi k\omega X^2 \quad (5.19)$$

따라서

$$W_{ds} = \pi k\omega X^2 \quad (5.20)$$

실험에 의해서 얻어진 힘-속도 선도에서 1 사이클 동안의 면적을 식(5.20)과 같다고 두면 식(5.21)을 얻는다.

$$\pi k_{eq} \omega X^2 = B \quad (5.21)$$

식(5.21)에서  $k_{eq}$ 는 등가강성계수이고,  $B$ 는 힘-속도 선도에서 1 주기 동안의 면적이다. 따라서  $k_{eq}$ 는 아래와 같다.

$$k_{eq} = \frac{B}{\pi\omega X^2} \quad (5.22)$$

식(5.12)와 (5.22)을 이용하여 실험 결과로 얻어진 Fig. 5.9와 Fig. 5.10에서 나타난 점성감쇠와 강성의 값을 구하여 Table 5.2와 Fig. 5.13 그리고 Table 5.3과 Fig. 5.14에 나타내었다. Fig. 5.13에서 전류 값이 증가할수록 즉, 자기장의 세기가 증가할수록 등가 점성 감쇠가 증가함을 알 수 있다.

Table 5.2 Equivalent viscous damping according to electrical current

Electrical current (A)	0 A	0.5 A	1 A	1.5 A
Area (N · m)	0.0027	0.0052	0.0121	0.0214
Equivalent viscous damping (N · s/m)	342.2315	664.7112	$1.5246 \times 10^3$	$2.7048 \times 10^3$

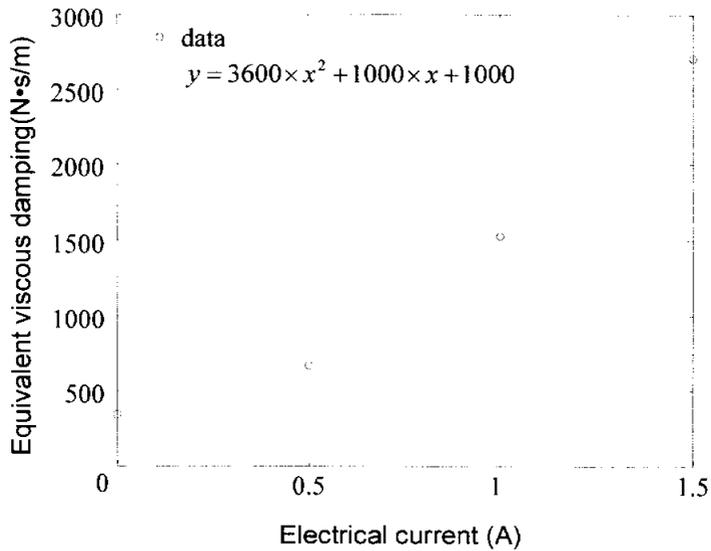


Fig 5.13. Equivalent viscous damping according to electrical current

Fig 5.14에서 전류 값이 증가할수록 등가 강성 값이 증가함을 알 수 있다.

Table 5.3 Area according to electrical current from F-V figure

Electrical current (A)	0 A	0.5 A	1 A	1.5 A
Area (N · m/s)	0.0447	0.0449	0.0623	0.2626
Equivalent stiffness (N/m)	$5.6625 \times 10^3$	$5.6834 \times 10^3$	$7.8870 \times 10^3$	$3.3259 \times 10^4$

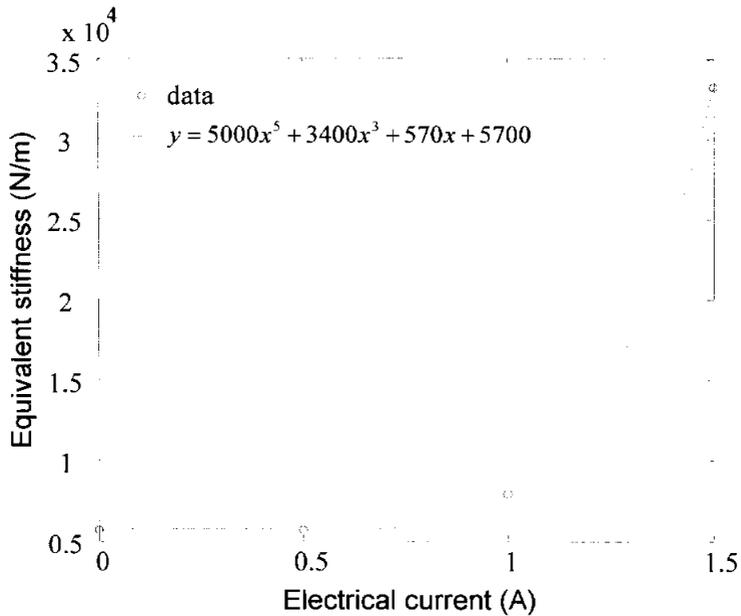


Fig. 5.14. Equivalent stiffness according to electrical current

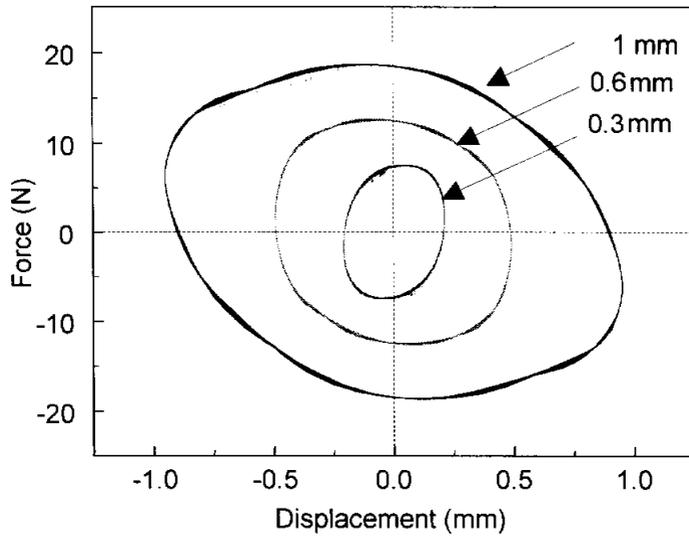


Fig. 5.15 Relation between force and displacement

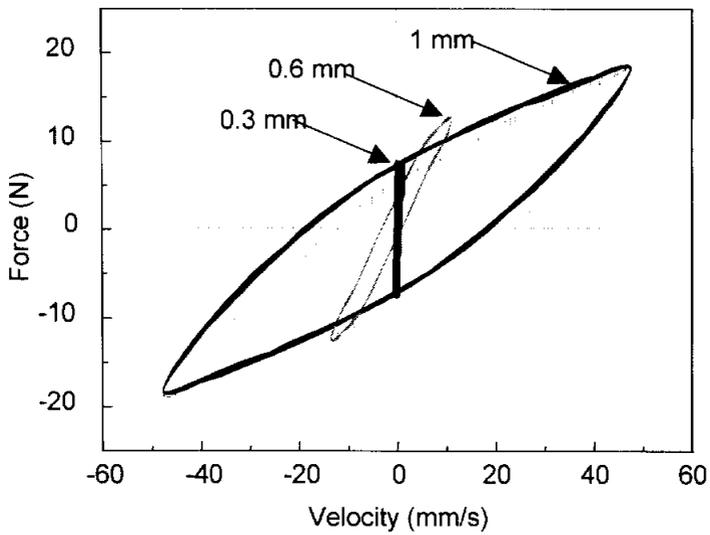


Fig. 5.16 Relation between force and velocity

Fig. 5.15는 가진변위에 대한 힘-변위 선도인데 가진 주파수를 10Hz으로 하고 전류를 0.5A 부가한 상태에서 가진 변위를 0.3mm, 0.6mm, 1mm로 하여 가진한 결과를 힘-변위 선도로 그린 것이다. 이 기울기는 강성의 크기를 나타내고 있다. 하지만 강성과 감쇠가 증가하는지 줄어드는지 알아보기 힘들다. 따라서 등가점성감쇠를 구하였다. Table 5.4와 Fig. 5.17은 등가점성감쇠의 변화를 나타내고 있다. 가진 변위가 증가할수록 즉, 속도가 증가할수록 등가점성 감쇠는 줄어드는 경향을 보인다. 이와 같은 특징은 회전식 점도계로서 MR유체를 측정했을 때 Shear ratio가 증가할수록 겔보기 점도가 줄어드는 특징과 일치한다. MR유체는 속도에 의존적인 제진 특성을 보인다.

Fig. 5.16은 가진 진폭의 변화에 따른 MR유체의 응답특성을 나타낸 힘-속도 선도이다. 가진 변위가 증가할 때, 그 기울기가 작아짐으로 등가점성감쇠 값은 작아짐을 확인할 수 있다. Fig. 5.16에서 가진 변위를 바꾸어 실험한 결과를 1 주기 동안의 면적을 구하여 등가강성을 구하였고 Table 5.5와 Fig. 5.18에 나타내었다. 변위가 증가할수록 등가강성의 변화를 보면 강성은 속도에 따라 그 변화가 작다. 이는 등가강성이 속도에 영향을 받지 않는다고 볼 수 있다.

Table 5.4 Equivalent viscous damping according to excitation displacement

Electrical current (A)	0.5 A		
Excitement frequency (Hz)	10 Hz		
Excitation displacement (mm)	0.3	0.6	1.0
Area (N · m)	0.0052	0.0210	0.0559
Equivalent viscous damping (N · s/m)	602.6585	432.416	313.6830

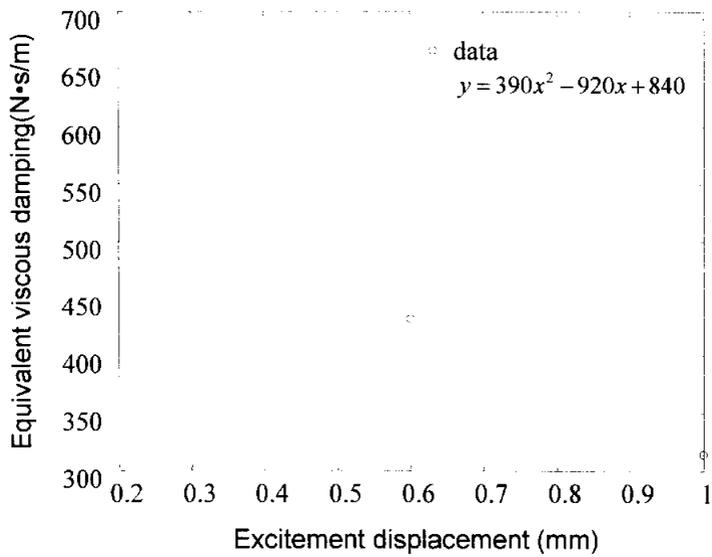


Fig 5.17. Equivalent viscous damping according to excitation displacement

Table 5.5 Equivalent stiffness according to excitation displacement

Electrical current (A)	0.5 A		
Excitement frequency (Hz)	10 Hz		
Excitation displacement (mm)	0.3	0.6	1
Area (N · m)	0.0449	0.2336	1.2587
Equivalent stiffness (Ns/m)	$5.1528 \times 10^3$	$4.8906 \times 10^3$	$7.06 \times 10^3$

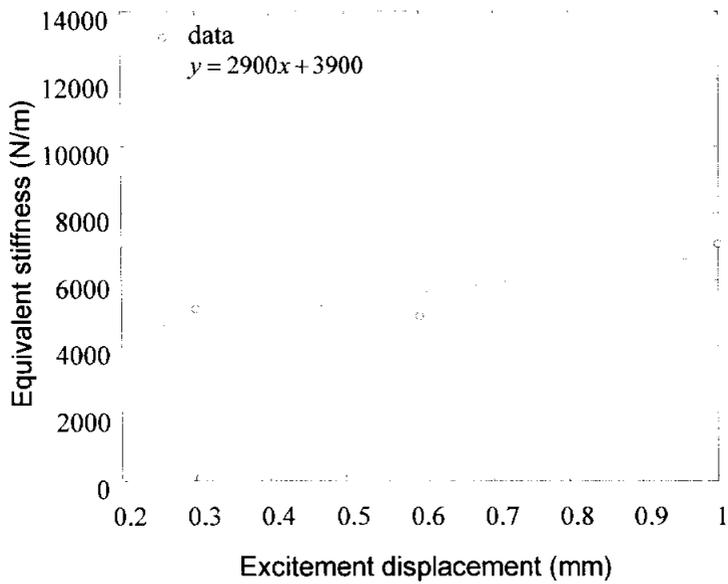


Fig 5.18 Equivalent stiffness according to excitation displacement

## 6. 결 론

본 논문에서 MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트를 개발하기 위한 기초 연구에 대한 결과를 나타내었다. 가진 주파수에 따라서 MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트에 부가하는 전류를 조절함으로써 폭 넓은 주파수 영역에서 제진 대상의 진동을 효과적으로 줄일 수 있음을 실험적으로 확인하였고 부가전류가 증가함에 따라서 마운트의 공진 주파수가 증가하는 원인은 일반적으로 부가하는 자장이 커질수록 Coulomb 마찰력이 커지는 것으로 알려져 있지만, 본 실험 결과에서 전달력과 속도에 대한 그래프에서 등가 강성과 등가 점성 감쇠가 같이 증가하였다.. 마찰력의 변화는 아주 적어 무시할 만한 것으로 보여진다.

본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. MR마운트에 부가하는 전류를 조절함으로써 폭 넓은 주파수 영역에서 제진 대상의 진동을 보다 효과적으로 줄일 수 있음을 실험적으로 확인하였다.
2. MR마운트에 부가하는 전류가 증가함에 따라서 마운트의 등가 강성력과 등가 점성 감쇠력은 증가하지만, Coulomb 감쇠력의 증가는 무시할 정도였다.
3. MR유체의 등가 점성 감쇠력의 효과는 가진속도에 의존하는 특성이 있음을 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) 안 영공, 양 보석, Morishita, S., 2001, ER유체를 이용한 이방성 스퀴즈 필름 댐퍼의 특성, 한국소음진동학회지, Vol. 11, No. 2, pp.301~306.
- (2) Carlson, J. D., 1995, Multi-Degree of Freedom Magneto-Rheological Devices and System for Using Same, US Patent 5492312.
- (3) 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.
- (4) 안 영공, 양보석, Morishita, S., 2001, 자기점성유체를 이용한 가변감쇠 마운트의 모델화, 한국소음진동학회지, Vol.11, No.1, pp.141~146.
- (5) 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.
- (6) Mark R. Jolly, Jonathan W. Bender, and J. David Carlson, "Properties and Applications of Commercial Magnetorheological Fluids," SPIE 5th Annual Int Symposium on Smart Structures and Materials, San Diego, CA, March 15, 1998.
- (7) Hoque, M. S., 1988, Experimental Investigation of an Electroviscous Damper for Rotordynamics Applications, Master thesis, Mechanical Engineering Department, Texas A&M University.
- (8) 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.
- (9) 안영공, 신동춘, 양보석, 김동조, 2001, MR유체를 이용한 비틀림진동 감쇠기, 한국소음진동학회 춘계학술논문집, pp.313~317.
- (10) Rabinow, J., 1948, The Magnetic Fluid Clutch, AIEE Transactions, Vol. 67, pp.1308-1315.
- (11) Weiss, K. D., Duclos, T. G., 1994, Controllable Fluids: The Temperature Dependence of Post-Yield Properties, International Journal of Modern Physics B, Vol. 8, No. 20 and 21, pp.3015~3032.
- (12) Dyke, S. J. Spencer Jr., B. F., Sain, M. K. and Carlson, J. D., 1996, Modeling and Control of Magnetorheological Dampers for seismic Response

Reduction, Smart Materials and Structures, Vol. 5, pp.565-575.

- (13) Shulman, Z. P., Kordonsky, V. J., Zaltsgendler, E. A., Prokhorov, I. V., Khusid, B. M. and Demchuk, S. A., 1986, Structure, Physical Properties and Dynamics of Magnetorheological Suspension, *Int. J. of Multiphase Flow*, Vol.12, No.6, pp.935-955.
- (14) Carlson, J. D. and Spencer Jr., B.F., 1997, Magnetorheological Fluid Dampers for Seismic Control, *Proceedings of DETC'97, ASME Design Eng. Technical Conf., DETC97/VIB4124*.
- (15) Laun, M. H., Kormann, C. and Eillenbacher, N., 1996, Rheometry on Magnetorheological (MR) Fluids. *Rheologica Acta*, Vol.35, No.5, pp.417-432.
- (16) Teng, X. and Conrad, H., 1996, Quasistatic Measurements on a Magnetorheological Fluid, *J. of Rheology*, Vol. 40, No. 6, pp.1167-1178.
- (17) Böter, R. and Janocha, H., 1997, Design Rules for MR Fluid Actuators in Different Working Modes, *Proc. of the International Society for Optical Eng. (SPIE)*, Vol. 3045, pp.148-159.
- (18) S. Y. Jung and S. B. Choi, 1995, Analysis of a Short Squeeze Film Damper Operating with Electro-Rheological Fluids, *Tribology Transaction*, Vol. 38, pp.857~862.
- (19) J. E. Ruzicka and T. F. Derby, 1971 Influence of Damping in Vibration Isolation, *The shock and Vibration Information Center United States Department of Defense*
- (18) Carlson, J. D. and Spencer Jr., B. F., 1996, Magneto-Rheological Fluid Dampers for Semi-Active Seismic Control, *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, pp.35~40.
- (19) N. M. Wereley, L. Pang, 12~14 May 1997. Nondimensional Analysis of Semi-Active Electro-rheological Dmapers Using Approximate Parallel Plate Models, *11th VPI&SU Symposium on Structural Dynamics and Control*
- (20) Singiresu S. Rao, 1995, *Mechanical Vibration*, 3th edition, pp.138, 152~153

## 감사의 글

본 논문이 완성되기까지 지속적인 관심과 사랑으로 부족한 저를 이끌어 주신 모든 분들께 진심으로 감사드립니다.

항상 바른 가르침으로 이끌어 주시고 사랑을 베풀어주신 양보석 교수님과 사모님에게 진심으로 감사드립니다. 늘 부족한 제자를 사랑으로 지도해 주신 지도교수 김동조 교수님에게 감사드립니다. 그리고 본 논문을 완성하기까지 시종 아낌없는 지도와 격려를 해주신 안영공 교수님, 심사과정에서 많은 조언과 충고를 해 주신 이일영교수님께 진심으로 감사드립니다.

졸업하기까지 많은 도움을 주신 모든 선후배님들에게 감사드립니다. 많이 부족한 저에게 자상하게 많은 것을 가르쳐 주신 김영찬 선배님, 김용환 선배님, 송진대 선배님께 감사를 드리고, 그리고 졸업하여 실무에서 열심히 일하고 계시는 모든 선배님들에게 감사를 드립니다.

이번에 같이 졸업을 하는 용수와 호일이 그 동안 여러모로 도와주었던 점 고맙게 생각을 한다. 앞으로 졸업해서도 멋진 모습으로 살아가는 너희들의 소식을 들었으면 좋겠다.

MR유체를 연구하는 종룡이에게 많은 도움만 받고 떠나는 것 같아서 미안하다. 앞으로 더 좋은 연구 결과가 있기를 바란다. 나에게 좋은 말로 격려해준 한찬이, 말은바 일을 충실히 잘하는 광진이, 우정이 돈독한 형은이, 원우, 상일이, 실험 할 때 언제든지 힘이 되어주던 종덕와 민찬이, 아침마다 일찍와서 공부하는 병일이 그리고 막내 지의 모두에게 감사드립니다.

묵묵히 못난 아들을 믿고 힘주시는 부모님에게 감사를 드립니다.