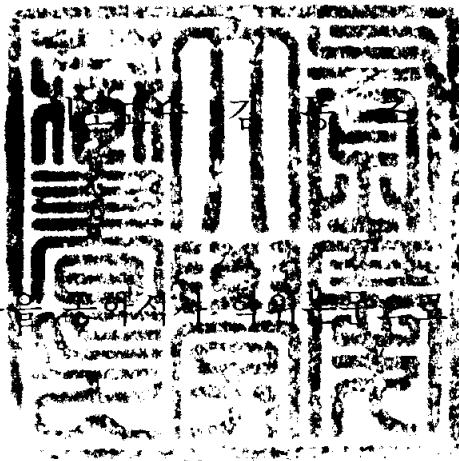


공학석사 학위논문

MR유체를 이용한 스퀴즈 모드형 마운트의 동특성



이 논문을 공학석사 학위논문 제출함

2003年 12月

부경대학교 대학원

기계설계학과

하 종 룡

하중룡의 공학석사 학위논문을 인준함

2003년 12월

주 심 공학박사 양 보 석



위 원 공학박사 김 동 조



위 원 공학박사 안 영 공



목 차

ABSTRACT	2
1. 서 론	3
2. MR 유체	5
2.1 자기점성 유체	5
2.2 MR 유체의 역학적 특징	9
2.3 일반적인 MR 장치에 발생하는 압력과 힘	10
2.4 활성 유체체적과 장치 종횡비	11
2.5 MR 유체의 장점의 정량화	12
3. 기초가진에 대한 제어시스템	14
3.1 기초가진	14
3.2 수동제어	20
3.3 능동제어	20
3.4 반능동제어	22
4. 실험장치의 설계 및 제작	25
4.1 스퀴즈 모드형 MR 마운트	25
4.2 실험결과 및 분석	27
5. 결 론	38
참고문헌	39
감사의 글	42

Dynamic Properties of Squeeze Type Mount Using Magneto-Rheological Fluid

Jong-Yong Ha

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

ABSTRACT

Magneto-rheological (MR) fluids are materials that respond to an applied magnetic field with a change in rheological behavior. MR fluids can provide simple, quiet, rapid-response interfaces between electronic controls and mechanical systems.

This paper presents investigation of damping characteristics of squeeze mode type mount using an MR fluid. Since damping property of an MR fluid is changed by the variation of the applied magnetic field strength, squeeze mode type MR mount proposed in this study has variable damping characteristics.

In the present work, the performance of the mount was experimentally investigated according to the magnetic field strength and exciting frequency. The experimental results present that the MR mount can effectively reduce the vibration amplitude in a wide frequency range by controlling the field strength. Viscous damping and stiffness coefficients of the MR mount tend to be changed according to the variation of the applied current in this study and MR effect is reduced by increasing the exciting frequency.

1. 서 론

마운트(mount)는 차량용 엔진 및 정밀기기 등의 진동 제진을 위한 기계요소로서 산업전반에 널리 사용되고 있다. 마운트는 내부에 유체가 있는 경우와 없는 경우로 크게 두 종류로 대별된다.⁽¹⁾ 유체가 충전된 마운트의 경우가 없는 경우에 비해서 공진주파수에서의 감쇠특성이 우수하고, 이와 같은 마운트의 성능을 더욱 향상시키기 위해서 마운트 설계변수의 최적화 연구⁽²⁾ 혹은 유체의 점도 특성을 변화시킴으로써 마운트의 감쇠력을 조절하여 제진 성능을 향상시키고자 하는 연구 등이 이루어져왔다.^(3, 4)

외부에서 부가하는 전장(electric field)과 자장(magnetic field)에 따라서 유체의 점도 특성이 변화하는 유체인 ER유체(Electro-Rheological Fluid; 전기점성유체)와 MR유체(Magneto-Rheological Fluid; 자기점성유체)는 진동제진 소재로서 잘 알려져 있다.⁽⁵⁾ ER유체를 이용한 반능동 마운트는 수동형 유체봉입 마운트보다 성능이 우수할 뿐만 아니라, 기계 요소가 사용되지 않고 감쇠력(damping force)조절을 위해 전기장을 가하기 위한 전극판 만을 첨가시키면 되므로 장치의 단순화, 경량화, 소형화가 가능하며 가격도 저렴하고 고장의 가능성이 현격히 줄어드는 이점이 있다.⁽⁶⁾ 그러나 현재까지 개발된 ER 유체는 발생할 수 있는 최대항복 전단응력이 3 kPa로 비교적 낮고 제조 시 또는 운용 시 유입되는 불순물에 취약하다는 단점이 있다. 그리고 전기장을 가하기 위한 고전압 장치가 필요하고, 재료의 특성이 온도에 따라 민감하게 변한다는 단점도 가지고 있다. 특히 MR 유체는 ER유체에 비해서 점도특성의 변화 폭이 크고, 또한 내구성이 우수하여 산업계에 적용 가능성이 높은 유체로 평가되어 MR 유체를 이용한 응용연구가 국내·외에서 활발히 진행되고 있다.^{(3)~(12)}

최근, 자동차의 전자화가 급속하게 진전되고 있고, 전자화의 핵심적인 정밀기기에는 제어용 컴퓨터, 지도정보용 DVD플레이어, 음악용 CD플레이어 등이 있다. 이들 자동차 탑재용 전자기기에 의해 주행 중에 다양한 정보처리가 이루어지고 있다. 이들 전자장치의 작동 신뢰성을 향상시키기 위해, 노면의 굴곡에 의한 저주파수 진동, 엔진에 의한 고주파수 진동 등의 폭넓은 주파수 범위에서의 진동전달을 억제하는 것이 필요하다.⁽⁴⁾

진동 제진성능의 향상과 폭넓은 운전주파수에서도 높은 제진 효과를 유지함은 물론, 불규칙한 충격 가진으로부터 기계장치 및 구조물을 보호하기 위해 능동형 및 반능동형 마운트의 개발이 시도되고 있으나, 제진성능과 높은 신뢰성을 동시에 만족시킨다는 점에서는 반능동형이 주목을 받고 있다. 반능동형은 수동형 마운트와 같이 높은 안정성과 신뢰성을 가지고, 또한 능동형과 같이 감쇠력을 제어할 수 있어서 제진성능이 뛰어나고, 가격이 능동형에 비해서 저렴하다는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 외부자장에 의해 유동학적 특성을 변화시키는 것이 가능한 기능성유체로서 알려진 MR 유체를 이용하여, 외부자장의 세기에 의해 감쇠특성이 변화하는 스퀴즈 모드형 마운트를 제작하여 진동 제진성능에 관하여 실험적인 평가를 수행하였다. 또한 MR 유체를 이용한 스퀴즈 모드형 마운트의 특성이 자장의 변화에 따라서 Bingham 유체의 특성을 나타내는지 조사하였다. 왜냐하면 MR 유체를 이용한 마운트 내부에 외부적인 마찰이 없는 경우에는 자기장을 부가함에 따라서 Coulomb 마찰의 특성은 보이지 않고, 점성감쇠의 특성이 지배적으로 나타난다는 연구보고가 있기 때문이다.^{(13, 14), (32)} 이를 위해 전달력-변위, 전달력-속도선도를 실험적으로 나타낸 후, 등가 점성 감쇠계수와 등가 강성계수를 구하여 부하자장에 따른 선도로써 확인하였다.

2. MR 유체(Magneto-Rheological Fluid)

가제어성 유체는 부가하는 자기장 또는 전기장에 응답하여 그들의 유동거동(rheological behavior)이 변화하는 재료이다. 전형적으로, 이 변화는 부가하는 자기장의 세기에 거의 비례하여 생성되는 항복응력이 있을 때 발생한다. 이러한 재료들은 대개 전기점성(ER)유체와 자기점성(MR)유체로 알려져 있다. 가제어성 유체에 관한 관심은 유체가 전기제어와 기계시스템사이에서 간단하고, 조용하며, 빠른 응답통로를 제공할 수 있는 특성 때문이다.⁽¹⁵⁾

2.1 자기점성(MR) 유체

MR 유체는 외부자장에 의해 유체가 가지는 항복응력을 변화시킬 수 있는 기능성유체로 알려져 있다.⁽⁴⁾ 일정한 용매에 높은 투자율(permeability)을 가진 직경 1~수십 μm 의 철 분말을 분산시킨 용액이다. 외부에서 자장을 부가하면 MR 유체 내부의 철 분말입자가 자계방향으로 사슬모양의 클러스터(cluster)가 형성되어 유체의 유동저항이 증가되고, 매크로적으로 보면 유체의 항복응력이 증가하게 된다. 다시 말해서 겔보기상의 점도가 증가한다고 표현할 수 있다. Fig. 2.1(a)는 자기장을 부가하지 않았을 때 MR유체 내부의 미립자들이 불규칙적으로 분산되어 있는 형태를 나타낸 것이고, (b)는 자기장을 부가하였을 경우에 그 미립자들이 사슬구조를 형성한 것을 나타내었다.

MR 유체는 1948년에 Rabinow에 의해 최초로 보고된 것으로 알려져 있고, 그 문헌에는 몇 개의 응용 예가 실려져 있다.⁽¹⁶⁾ 또한 그 문헌에는 ER 유체의 초기의 연구자로서 알려진 Winslow의 이름이 있고, 전장에 응답하는 유체에 관한 보고를 한 것으로 보인다. 그 후 ER 유체의 연구에 종사하던 러시아의 연구자가 주목하고⁽¹⁷⁾ 또한 미국의 한 기업이 응용연구에 적극적으로 전념하여⁽¹⁸⁾ 현재에는 기본특성에 관한 검토^{(19)~(21)}에서부터 응용 액추에이터의 모델화^{(8),(14)}까지 다양한 연구가 수행되고 있다. 자장에 응답하는 유체로서 잘 알려진 자성유체도 기본적으로는 MR유체와 같은 조성(組成)을 가지고, 또한 자장에 반응한다는 의미에서는 같은 특징을 가진다.⁽²²⁾ 그러나 입자의 크기가 자성유체는 겨우 수십 나노미터(nm)인 것에 비해 MR유체는 수 마이크로미터(μm)정도로 훨씬 크고, 아울러 MR 유체의 특성은 자성유체와 크게 다르다. 자성유체는

뉴턴 유체적인 특성을 나타내지만, MR 유체는 소성유체(Bingham 유체)의 특성을 가지고 있다.

전형적인 MR 유체는 20~40% 체적의 비교적 순수하고, 부드러운 철 분말입자를 포함한다. 이러한 입자들이 광유, 합성유, 물이나 글리콜에 분산된 것이다. 상업용 윤활유에서 발견되는 것과 같은 여러 종류의 첨가제는 가라앉음을 방지하고, 입자의 분산을 향상시키며, 윤활을 강화하고, 점도를 개선하며, 마모를 막기 위하여 첨가된다. MR 유체의 극한강도(ultimate strength)는 분산된 입자의 포화자화의 제공에 따라 달라진다. 강한 MR유체의 비결은 큰 포화 자화를 가진 입자를 선택하는 것이다. 이용 가능한 최선의 입자는 약 2.4 테슬라(tesla)의 포화자화를 가지는 철과 코발트를 합성한 것이다.⁽²⁴⁾ 불행히도, 이러한 합성물은 실제로 응용되기에는 매우 고가이다. 실용적으로는 2.15 테슬라의 포화자화를 가지는 철분말 입자가 최선의 방법이다. 사실상 모든 다른 금속, 합금, 그리고 산화물들은 철보다 훨씬 낮은 포화자화를 가지므로, 약한 MR 유체로 된다.

전형적으로, 자성입자의 직경은 $3\sim5\mu\text{m}$ 이다. 기능성 MR 유체는 더 큰 입자로 만들어질 수도 있지만, 그 크기가 커질수록, 입자의 분산이 더욱 더 어려워진다. 또한, 더 쉽게 분산하는 더 작은 입자가 사용될 수 있지만, 그러한 입자의 제조는 어렵다.

부가자장에 대한 MR 유체의 응답은 다양한 재료특성으로부터 관찰되어질 수 있다. 유동(탄성, 소성, 점도), 자기, 온도, 음향, 그리고 다른 기계적이며 물리적인 특성들은 지금까지 관찰되어져 왔다. 그러나 세밀하게 연구되어진 응용의 대부분은 MR 유체의 가제어 유동 특성에 근거를 둔다.

MR 유체는 충격과 진동 제어에 잘 사용될 수 있는 독특한 가제어 유동특성(수동, 준능동 및 능동)을 나타낸다. MR 유체에 근거한 장치의 이점들 중에는

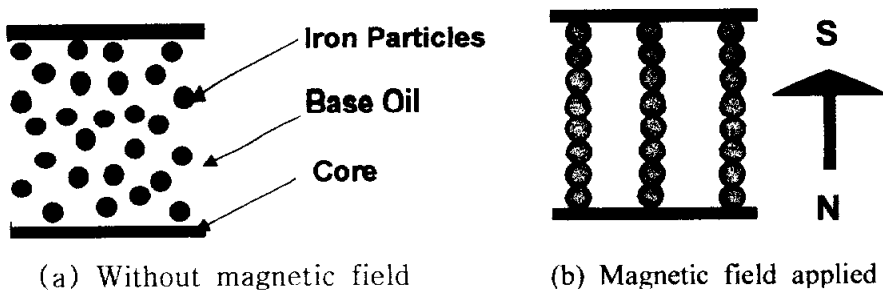
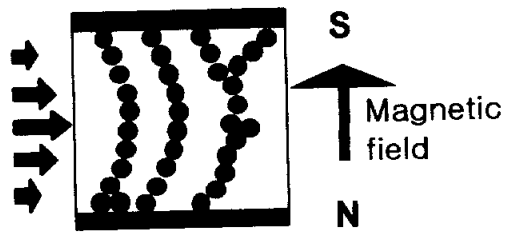
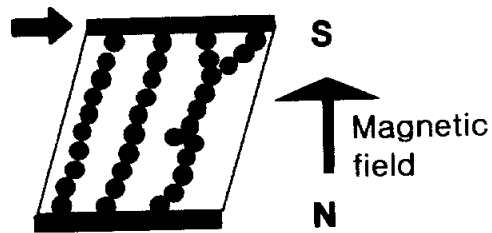


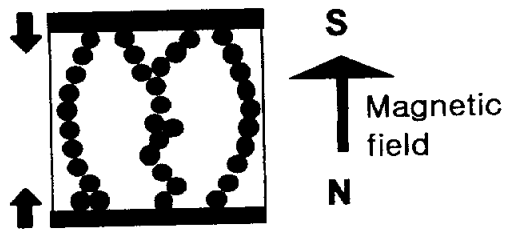
Fig. 2.1 MR effect



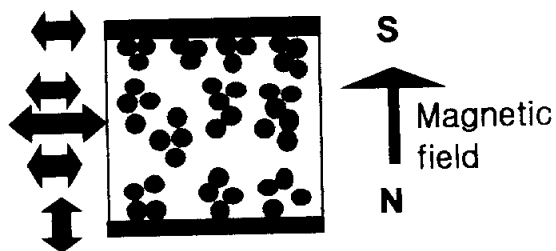
(a) Flow mode



(b) Shear mode



(c) Squeeze mode



(d) Vibration mode

Fig. 2.2 Modes of MR fluid

전기적으로 기계장치를 제어함과 결과적으로 움직이는 부분들이 더 적거나 거의 없어지므로 마모를 줄이고 수명을 높인다. 또한 MR 유체는 낮은 초기 점도, 최대부가자장에서의 높은 전단응력, 낮은 히스테리시스, 낮은 전력소모, 온도 안정성, 그리고 빠른 응답시간 등의 모든 중요한 응용 조건들을 만족시킨다. 게다가, MR 유체에 근거를 둔 충격과 진동제어 설계는 급격히 변하는 외부환경에 대하여 시스템의 특성을 조절할 수 있으므로 비가변(non-variable) 수동 시스템으로 얻을 수 있는 진동의 정도와 범위를 훨씬 향상시킨다.

MR 유체의 미시적 거동에 관한 연구는 확실한 이론 정립이 안 되어 있는 상태이다.⁽²³⁾ 따라서, 이들 유변 유체에 대한 거시적인 해석방법은 유체의 작동 모드에 따라서 세 가지 형태로 분류할 수 있다. Fig. 2.2는 이러한 각각의 작동 모드에 대한 개략도로서 첫 번째 형태는 Fig. 2.2(a)와 같이 두 전극은 고정되어 있고, 고정된 자극 사이로 유체가 이동하는 형태로 유동 모드(flow mode)라 한다. 이 형태는 밸브, 댐퍼 혹은 엔진마운트 등과 같이, 일반적으로 유체가 흐르는 관내에서 유체의 압력 변화와 유량 변화가 동시에 일어나는 형태이다. 두 번째 형태는 Fig. 2.2(b)와 같은 전단 모드(shear mode) 혹은 회전 전단모드(rotational shear mode)로서 평행한 두 개의 평판 중 한쪽의 자극(magnetic pole)은 고정되어 있고, 다른 한쪽이 회전이나 이동을 하는 형태이다. 유체의 이동과 자극의 움직임이 평행하게 일어나는 클러치, 브레이크 시스템, 척(chucking) 및 잠금장치(locking device) 등이 이 형태에 속한다. 세 번째 형태는 Fig. 2.2(c)와 같이 유체의 유동과 자극의 움직임이 수직한 방향으로 일어나는 압착모드(squeeze mode)이다. 이 형태는 자극과 유체의 유동은 매우 적게 일어나지만, 엔진마운트, 스마트 구조물 등에 응용하려는 연구가 수행되고 있다.

MR 유체의 특성을 측정하기 위하여 일반적으로 전단모드인 전단속도의 방향이 일정한 회전식 점도계가 이용되고, 측정된 MR 유체의 특성은 겔보기 점도가 전단속도의 변화에 지수 함수적으로 변화하지만, Bingham유체의 특성이 나타난다. 하지만 MR 유체를 이용한 감쇠기에 실 링(seal ring)이 삽입된 경우 쿨롱마찰 특성이 나타나는데, 이 특성은 실 링의 마찰이 기본적으로 작용하기 때문에 단순히 항복응력의 변화에 의한 효과로 규정짓기는 어렵다.⁽⁴⁾

최적 감쇠조건이 고려되어 선정된 MR 유체를 이용한 감쇠기에 왕복식의 전단, 유체유동, 스쿼즈작용이 일어나면 Fig. 2.2의 (d)와 같이 진동모드, 즉 MR 유체 내부의 미립자들은 덩어리를 형성하지만 사슬구조를 유지하지 못하고, 불규칙하게 분산되어질 것으로 간주된다. 이러한 원인으로 감쇠기의 응답은 Bingham유체의 특성을 나타낸 회전식 점도계로 측정된 결과와는 달리 뉴턴 유체(Newtonian fluid)의 특성을 나타낸다.

2.2. MR 유체의 역학적 특성

본 논문에서 사용되는 자성유체는 미국 Lord사의 MRF-126QD이다. MRF-126QD의 밀도는 2.7 g/cm^3 이고, 점도는 $470 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$ 이다. MR 유체의 경우 자기장 부가시 자극에서 발생하는 전단응력은 유체의 점성에 의한 전단응력과 자기장 부가에 의하여 연속적으로 변화되는 MR유체의 항복응력의 합으로 나타낼 수 있다. 이러한 거동은 빙햄 모델(Bingham model)로써 표현되고 이를 수학적으로 표현하면 다음과 같다.⁽¹⁶⁾

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y(H), \quad \tau_y(H) = \alpha(H)^\beta \quad (2.1)$$

여기서 τ 는 유체의 전단응력을 나타내고, $\dot{\gamma}$ 는 전단속도비이며, η 는 유체의 점도를 나타낸다. $\tau_y(H)$ 는 유체의 항복응력을 나타내며, H 는 유체에 부가된 자기장이다. α 와 β 는 유체 용매의 종류, 입자의 종류, 입자 중량비와 용매의 점성 등 유체의 조성 조건 및 사용 조건에 영향을 받는 유체의 고유상수이다.

MR 유체는 자기장이 부가될 경우, 소요되는 전류밀도(J)를 측정하여 전력소모량을 예측할 수 있는데, 이러한 전류밀도는 부가되는 자기장에 대하여 다음

Table 2.1 Typical MR fluid properties⁽¹⁷⁾

Property	Typical value
M	
Maximum yield strength, $\tau_{y(field)}$	50 ~ 100 kPa
Maximum field	~250 kA/m
Plastic viscosity, η_p	0.1 ~ 1.0 Pa · s
Operable temperature range	-40 to 150°C (limited by carrier fluid)
Contaminants	unaffected by most impurities
Response time	< milliseconds
Density	3-4 g/cm ³
$\eta_p / \tau_{y(field)}^2$	$10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ s/Pa}$
Maximum energy density	0.1 J/cm ³
Power supply (typical)	2 ~ 25 V @ 1 ~ 2 A (2 ~ 50 watts)

식과 같이 함수적으로 비례하는 것으로 알려져 있다.

$$J = \alpha_1 H^{\beta_1} \quad (2.2)$$

여기서 α_1 과 β_1 은 MR 유체의 용매 종류, 입자 종류, 입자 중량비와 용매의 점성 등 MR 유체의 조성 조건 및 사용 조건에 영향을 받는 MR유체의 고유 상수이다. 그리고 식에서 나타난 바와 같이 MR 유체는 외부에서 부가되는 자기장에 대하여 함수 관계를 갖기 때문에, 전하나 이온의 이동에 영향을 미치는 입자의 결정 구조, 용매와 입자 사이의 투자율(permittivity)의 차이, 입자 내의 불순물 및 입자 내의 수분 함유량과 사용온도 등에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

Table 2.1은 전형적인 MR 유체의 기본특성을 요약하여 나타내었다.

2.3 일반적인 MR 장치에 발생하는 압력과 힘⁽²⁵⁾

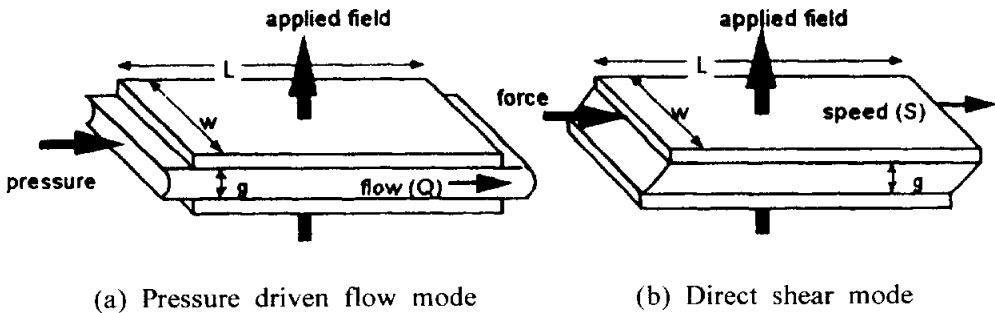


Fig. 2.3 Basic operational modes for controllable fluid devices

Fig. 2.3(a)의 유동모드에 기초한 장치에서 생성되는 압력강하(pressure drop)는 일반적으로 자기장에 독립적인 점성요소 ΔP_η 와 부가하는 자기장에 의존하는 항복응력(field dependent induced yield stress) 요소 ΔP_τ 의 합이다. 이 식은 근사적으로 다음과 같이 될 것이다.

$$\Delta P = \Delta P_\eta + \Delta P_\tau(H) = \frac{12\eta QL}{g^3 w} + \frac{c\tau_y(H)L}{g} \quad (2.3)$$

여기서 L, g, w 는 각각 고정된 극 사이의 흐름 통로(flow channel)의 길이(length), 간격(gap) 및 폭(width)이다. Q 는 체적유량, η 는 무 자장(no applied field)하에서의 점도, τ_y 는 부가한 자장(applied field) H 에 의해 발생한 항복응력이다. 파라미터 c 는 유동속도 형상의 함수(a function of the flow velocity profile)이고 그 값은 최소 2($\Delta P_r/\Delta P_\eta$ 이 대략 1보다 작을 때), 최대 3($\Delta P_r/\Delta P_\eta$ 이 대략 100보다 클 때)의 값을 가진다. 유사한 방법으로, Fig. 2.3.(b)의 직접 전단 장치(direct-shear device)에 발생한 힘은

$$F = F_\eta + F_r(H) = \frac{\eta SA}{g} + \tau_y(H)A \quad (2.4)$$

여기서 S 는 상대 극 속도(relative pole velocity), $A(=Lw)$ 는 전단(극, pole) 면적이다.

2.4 활성 유체체적과 장치 종횡비(aspect ratio)⁽²⁵⁾

식 (2.3)과 (2.4)는 확실히 가제어 유체장치의 설계에서 유용하지만, 다양한 파라미터의 중요성에 대한 통찰력을 제공하지는 않는다. 최소 활성유체 체적(minimum active fluid volume)을 구하기 위하여 대수적으로 위의 식을 정리하는 것이 필요하다.

$$V = k \left(\frac{\eta}{\tau^2} \right) \lambda W_m \quad (2.5)$$

여기서 k 는 상수이고 $V(=Lwg)$ 는 필요한 가제어 기계적 동력 레벨(controllable mechanical power level) W_m 에서 원하는 제어비(control ratio) λ 에 도달하기 위하여 필요한 활성 유체체적으로 간주할 수 있다. 유동 모드(flow mode)에 대하여 $k=12/c^2$, $\lambda=\Delta P_r/\Delta P_\eta$ 그리고 $W_m=Q\Delta P_r$. 직접 전단에 대하여는 $k=1$, $\lambda=F_r/F_\eta$ 그리고 $W_m=F_r S$ 이다. 양쪽 모두의 경우에 있어서 최소 활성유체체적은 다음 세 항의 곱에 비례한다.

- 유체재료 특성의 함수인 항(η/τ^2)
- 원하는 제어비 또는 동적 범위(dynamic range) λ

· 구해진 제어되는 기계적 동력 분산(mechanical power dissipation) W_m

양쪽의 형상에서 $V = Lwg$ 를 주목하여, 식 (2.5)를 정리하면 다음과 같다.

$$wg^2 = \frac{12}{c} \left(\frac{\eta}{\tau} \right) \lambda Q \quad (\text{유동모드}) \quad (2.6)$$

$$g = \left(\frac{\eta}{\tau} \right) \lambda S \quad (\text{전단모드}) \quad (2.7)$$

이 두 식은 MR 유체의 특성에 기초한 MR 장치에 대한 형상적 구속조건 (geometric constraints)과 필요한 종횡비(aspect ratio), 원하는 제어비 또는 동적 범위, 그리고 장치속도(또는 흐름)를 제공한다. 활성유체 체적이 점도에 대한 항복응력의 제곱의 비(η/τ^2)에 따라서, 그리고 형상구속조건은 비 η/τ 에 비례 한다는 것이 흥미로운 점이다.

2.5 MR 유체의 장점의 정량화(figures of merit)⁽²⁵⁾

MR 장치의 기계적 동력 밀도와 전력 밀도(electric power density)는 아래와 같이 주어진다.

$$\widehat{W}_m = \tau \dot{\gamma} \quad (2.8)$$

$$\widehat{W}_e = \frac{BH}{2t_c} \quad (2.9)$$

여기서 $\dot{\gamma}$ 는 전단비(fluid shear rate)(또는 정규화된 유속(normalized flow rate), 즉, $\dot{\gamma} = S/g$), B 와 H 는 자속밀도(magnetic flux density)와 유체내의 자기장 세기이며, t_c 는 유체 내에서 자기장의 형성을 위한 특성시간(characteristic time)이다. 유체 효율(fluid efficiency)은 주어진 것처럼 기계적 동력밀도와 전기적 동력밀도의 비로서 정의될 수 있다.

$$\alpha = \frac{\widehat{W}_m}{\widehat{W}_e} = 2(\dot{\psi}) \frac{\tau}{BH} \quad (2.10)$$

여기서 τ 와 B 는 일반적인 H 에서 정의된다.

위의 전개로부터, 장점의 정량화(figures of merit) 몇 가지 얻어질 수 있다. 첫째는 활성유체체적에 근거한다.

$$F_1 = \frac{\tau^2}{\eta} \quad (2.11)$$

이것은 최소활성유체체적 V 에 역비례하고 Pa/s의 단위를 가진다. 이 장점의 크기를 최대화하는 것은, $W_e = \widehat{W}_e V$ 의 관계식이 성립하므로 장치크기와 전력 소모를 최소화한다. 주어진 활성유체 체적에 대하여, F_1 이 증가할수록 λ 또한 증가할 것이므로(식 2.5), 이 장점의 크기는 또한 특정유체에 근거한 장치의 동적범위를 반영한다. 무게에 민감한 적용에 대하여, 이 장점의 크기는 큰 유체밀도 ρ 를 변화시키기 위하여 다음과 같이 변형될 수 있다.

$$F_2 = \frac{\tau^2}{\eta\rho} \quad (2.12)$$

이것은 최소활성유체질량에 반비례하고 m²/s³의 단위를 가진다. 마지막으로, 높은 대역폭(bandwidth)의 응용에서는, 무차원에 의한 장점의 크기는 동력효율(식 2.10)에 근거하여 다음과 같이 주어진다.

$$F_3 = \frac{\tau}{BH} \quad (2.13)$$

이 장점의 크기를 최대화하는 것은 원하는 대역폭에서 주어지는 기계적 전력에 대하여 MR 장치의 전력 소모량을 최소화할 것이다.

이들 세 개의 수치는 다양한 MR 유체에 공칭거동(nominal behavior)을 비교하는 일반적인 수단을 제공한다. 안정성과 내구성 및 온도범위와 같은 다른 요소들은 특정한 응용에 대하여 MR 유체의 적합성에 중대한 영향을 가진다.

제 3 장 기초가진에 대한 제어시스템

스프링-질량-감쇠기로 이루어진 1자유도 시스템의 조화가진 응답은 하나의 진동수를 갖는 사인형태의 외력이 시스템에 가해지는 것을 말하며, 기계나 구조물에 가해지는 외력의 매우 흔한 형태이다.⁽²⁶⁾ 선풍기, 진동기, 왕복기관과 같은 회전기계는 인접 요소에 사인함수형태로 변화하는 힘을 전달하게 된다. 또한 푸리에 정리(Fourier theorem)에 의하면, 다양한 형태의 힘을 나타내는 함수를 조화항의 무한급수로 나타낼 수 있다. 선형운동방정식에서 급수의 각 항에 대한 응답을 알 때 전체에 대한 응답은 각 항들의 응답의 합으로 나타낼 수 있고 이를 중첩의 원리(principle of superposition)라고 한다. 이러한 방법으로 하나의 조화입력에 대한 응답을 알면 다른 다양한 형태의 주기적 외란(disturbance)에 대한 응답을 계산할 수 있다.

조화입력에 대한 1자유도 시스템의 응답은 진동 측정은 물론 원치 않는 진동으로부터 기계를 보호하기 위한 기기의 설계와 진동을 측정하기 위한 변환기(transducer)의 설계에 있어서 기초가 된다. 조화가진은 감쇠와 강성특성을 연구하는 데 있어서 매우 유용하다.

3.1 기초 가진⁽²⁶⁾

종종 기계나 기계의 부품들은 스프링이나 감쇠기로 모델링될 수 있는 탄성마운트(elastic mounting)를 통해 조화가진을 받는다. 예를 들어 자동차의 현가장치는 노면의 가진력이 충격흡수기를 통해 들어와 가진되며, 그 충격흡수기는 병렬로 연결된 선형 스프링과 선형 감쇠기로 모델링할 수 있다. 다른 예는 자동차 엔진의 진동을 프레임으로부터 혹은 비행기 엔진의 진동을 날개나 꼬리 부분으로부터 분리시키는 고무마운트(rubber mount)를 들 수 있다. 이러한 경우는 시스템이 지지대의 운동에 의해 가진이 되는 것으로 생각하여 모델링할 수 있다. Fig. 3.1.은 기초가진 혹은 지지대 운동(support motion) 분제를 나타낸다.

질량 m 에 관계된 힘들을 합하면(즉, 관성력 $m\ddot{x}$ 는 m 에 작용하는 두 개의 힘의 합과 같고, 중력은 스프링의 정적 변위와 균형을 유지한다) Fig. 3.1로부터

터 다음 식을 얻는다.

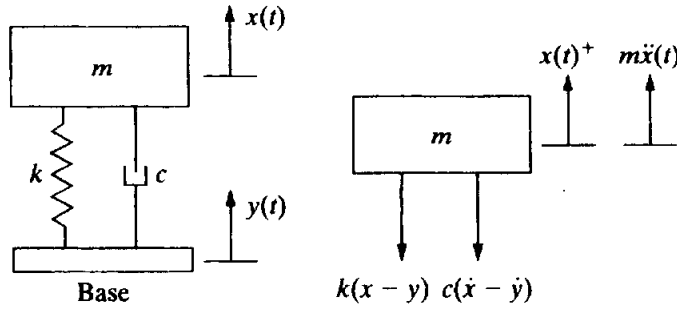


Fig. 3.1 Base excitation problem models

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (3.1)$$

기초 가진문제에 있어서 기초(base)는 조화적으로 움직이는 것으로 가정한다. 즉,

$$y(t) = Y \sin \omega_b t \quad (3.2)$$

여기서 Y 는 기초운동의 진폭을 나타내며, ω_b 는 기초진동의 진동수를 나타낸다. 식 (3.2)의 $y(t)$ 를 식 (3.1)의 운동방정식에 대입하고 정리하면

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = cY\omega_b \cos \omega_b t + kY \sin \omega_b t \quad (3.3)$$

를 얻는다. 이 식은 두 개의 조화입력이 있는 스프링-질량-감쇠기 시스템을 나타낸다고 할 수 있다. 해를 구하는 방법은 운동방정식의 선형성을 이용한다. 즉, 입력을 $cY\omega_b \cos \omega_b t$ 라고 가정함으로써 얻은 특수해 $x_p^{(1)}$ 와 입력을 $kY \sin \omega_b t$ 라고 가정함으로써 얻은 특수해 $x_p^{(2)}$ 의 합을 구하면 된다.

식 (3.3)을 m 으로 나누고 감쇠비와 고유진동수의 정의를 이용하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = 2\zeta\omega_n\omega_b Y \cos \omega_b t + \omega_n^2 Y \sin \omega_b t \quad (3.4)$$

따라서 $f_0 = 2\zeta\omega_n\omega_b Y$ 를 조화가진을 받는 1자유도 점성감쇠 시스템의 응답에 대입하면, 특수해 $x_p^{(1)}$ 는

$$x_p^{(1)} = \frac{2\zeta\omega_n\omega_b Y}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2}} \cos(\omega_b t - \theta_1) \quad (3.5)$$

이며

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{2\zeta\omega_n\omega_b}{\omega_n^2 - \omega_b^2} \quad (3.6)$$

가 된다. $x_p^{(2)}$ 를 계산하기 위해서 미정계수법을 조화입력 $\omega_n^2 Y \sin \omega_b t$ 에 대해 다시 적용하여 식을 계산할 때 이용한 순서를 따르면 다음을 얻는다.

$$x_p^{(2)} = \frac{\omega_n^2 Y}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2}} \sin(\omega_b t - \theta_1) \quad (3.7)$$

여기서 가정한 특수 해는 $x_p^{(2)} = X \sin(\omega_b t - \theta_1)$ 이다. θ_1 은 위상각이 가진 진폭과는 무관하기 때문에(즉, ζ , ω_n , ω_b 는 변하지 않음), 식 (3.6)에서 주어진 것과 같다. 두 특수해 사이의 위상차는 사인과 코사인 해에서 고려되어 있다. 두 특수해의 변수가 $(\omega_b t - \theta_1)$ 으로 같으므로 삼각 관계식을 이용하여 쉽게 더할 수 있다.

선형 시스템에 대한 중첩의 원리로부터 전체 특수해는 식 (3.1)과 (3.3)의 합(즉, $x_p^{(1)} + x_p^{(2)}$)이 된다. 해 (3.1)과 (3.3)을 합하면

$$x_p(t) = \omega_n Y \left[\frac{\omega_n^2 + (2\zeta\omega_b)^2}{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2} \right]^{1/2} \cos(\omega_b t - \theta_1 - \theta_2) \quad (3.8)$$

가 되며

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{\omega_n}{2\zeta\omega_b} \quad (3.9)$$

이 된다. 특수해 $x_p(t)$ 의 진폭을 X 라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$X = Y \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad (3.10)$$

여기서, 진동수비 $r = \omega_b / \omega_n$ 이다. 마지막 식을 기초운동의 진폭 Y 로 나누면 다음과 같다.

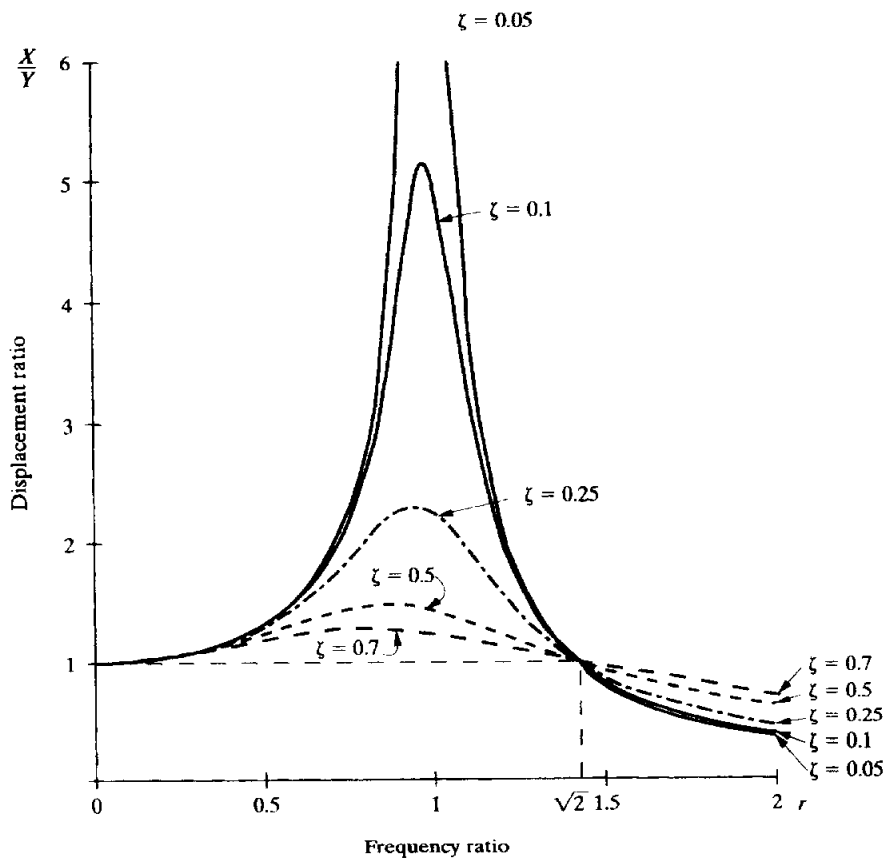


Fig. 3.2 Displacement transmissibility as a function of the frequency ratio

$$\frac{X}{Y} = \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad (3.11)$$

이 식은 응답의 최대진폭과 입력변위진폭의 비를 나타낸다. 이 비를 변위 전달률(displacement transmissibility)이라고 부르며, 기초로부터의 운동이 질량으로 얼마나 전달되었는가를 진동수비 ω_b/ω_n 의 함수로 나타낸다. 이 비는 Fig. 3.2에 도시한 것과 같다. 주목할 것은 $r = \omega_b/\omega_n = 1$ 근처 혹은 공진에서, 기초운동의 최대량이 질량의 변위로 전달된다는 점이다.

Fig. 3.2에서 $r < \sqrt{2}$ 일 때는 전달률이 1보다 커지며, 이러한 시스템변수 (ω_n)와 기초진동수 (ω_b)의 값에 대해서 질량의 운동이 기초의 운동보다 커진다. 또한 주어진 r 값에 대해서 감쇠비 ζ 가 진동이 증폭되는 정도를 결정한다. 특히 ζ 가 클수록 전달률은 작아진다. $r > \sqrt{2}$ 일 때는 전달률이 1보다 작아지며, 모든 ζ 에 대해 질량의 운동은 기초운동의 진폭보다 작다(그러나 ζ 가 증가할수록 증가한다).

기초가진 문제에서 질량에 전달되는 힘은 스프링과 감쇠기를 통해서 전달된다. 따라서 질량에 전달되는 힘은 스프링에서의 힘과 감쇠기에서의 힘의 합이며, 자유물체도를 고려하면 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$F(t) = k(x - y) + c(\dot{x} - \dot{y}) \quad (3.12)$$

이 힘은 질량 m 의 관성력과 평형을 이루므로

$$F(t) = -m\ddot{x}(t) \quad (3.13)$$

가 된다. 정상상태의 경우, x 에 대한 해는 식 (3.8)로 주어진다. 식 (3.8)을 두 번 미분하고 식 (3.13)에 대입하면 다음과 같이 된다.

$$F(t) = m\omega_b^2\omega_n Y \left[\frac{\omega_n^2 + (2\zeta\omega_b)^2}{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2} \right]^{1/2} \cos(\omega_b t - \theta_1 - \theta_2) \quad (3.14)$$

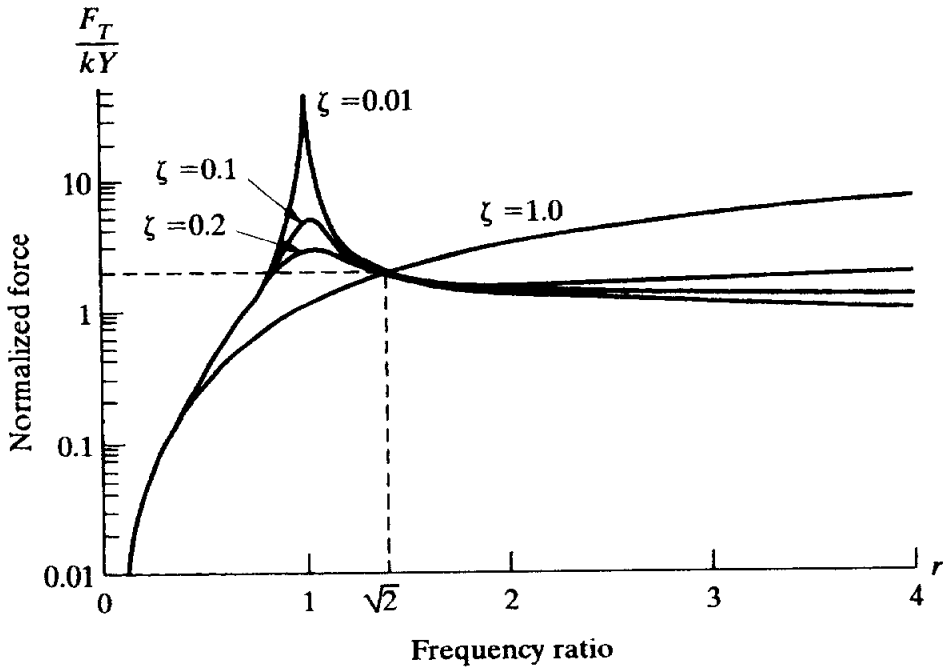


Fig. 3.3 Force transmitted to the mass as a function of the frequency ratio

위 식은 간단히 다음과 같이 표현된다.

$$F(t) = F_T \cos(\omega_b t - \theta_1 - \theta_2) \quad (3.15)$$

여기서 전달력 F_T 의 크기는

$$F_T = kYr^2 \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad (3.16)$$

로 주어진다. 식 (3.16)은 다음과 같이 힘 전달률(force transmissibility)을 정의하는데 이용된다.

$$\frac{F_T}{kY} = r^2 \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad (3.17)$$

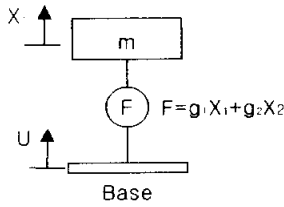
위의 전달률 F_T/kY 는 무차원 수로, 진폭이 Y 인 기초의 변위가 얼마만한 크기의 힘으로 질량에 전달되는가를 설명하는 척도이다. 식 (3.15)와 (3.8)로부터 질량에 전달되는 힘은 질량의 변위와 위상이 같다. Fig. 3.3은 힘 전달률을 네 개의 감쇠비에 대해 주파수비의 함수로 보이고 있다. 주목할 것은, 변위 전달률과는 달리 전달된 힘은 $r > \sqrt{2}$ 일 때에 반드시 작아지지 않는다는 사실이다. 사실상 감쇠가 증가할수록 전달되는 힘은 $r > \sqrt{2}$ 일 때에 크게 증가한다.

3.2 수동 제어⁽²⁷⁾

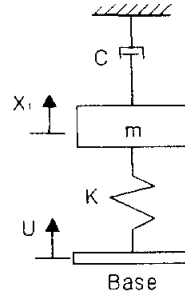
Fig. 3.2는 기초 가진에 대한 진동수비로 나타낸 변위 전달률을 나타낸다. 시스템의 고유진동수는 주파수비가 1일 때이다. 이 선도는 속도와 가속도의 입력과 출력에 대해서도 유효하다. 감쇠비는 임계감쇠계수에 대한 실제 감쇠계수의 비율이다. 감쇠비가 증가할수록 공진에서의 증폭은 감소하므로, 절연을 향상시킨다. 그러나 고주파수에서는, 감쇠가 증가할수록, 절연은 감소한다. 이상적인 1자유도 시스템에서는 모든 주파수에 대하여 변위 전달률이 1이하가 되어야 할 것이다.

3.3 능동 제어⁽²⁷⁾

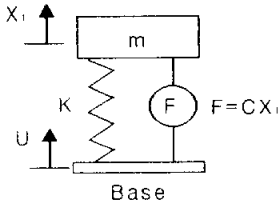
능동형(fully active)과 최적 현가시스템(optimal suspension systems)은 Fig. 3.4에 나타나 있다. 최적상태변수 제어이론은 이러한 제어법칙을 개발하기 위하여 사용되었다.⁽²⁸⁾ 1자유도 현가시스템에서의 상태변수는 질량의 절대속도 X_1 , 질량과 기초사이의 상대변위 X_2 이다. 전형적으로, 최적제어이론은 절대속도, 상대변위, 힘 발생기(force generator)로부터의 가속도나 힘을 최소화하기 위하여 사용된다. 또한 이들 양 중에서 한 개 이상이 동시에 최소화 될 수 있다. 어떤 경우에는, 최적 피드백 또는 제어 힘 F 는 상태들의 선형조합이다.



(a) Fully active suspension
with no passive elements



(b) Skyhook damper suspension



(c) Fully active suspension
with passive spring

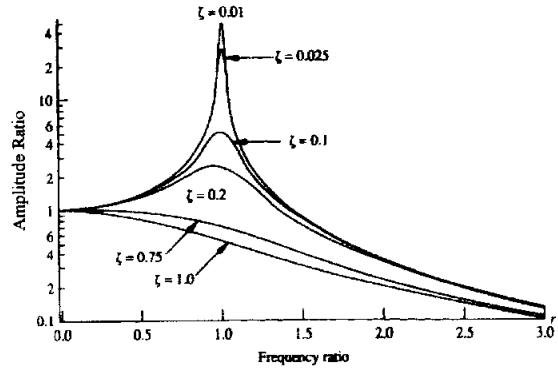


Fig. 3.4 Fully active and optimal suspensions

$$F = C_1 X_1 + C_2 X_2 \quad (3.18)$$

식 (3.18)에서 C_1 과 C_2 는 최적 상태 피드백 게인(optimal state feedback gains)이다. 만약 C_1 이 감쇠계수 C 로 해석되고, C_2 가 K 로 해석된다면, 최적형상은 수동형 요소로부터 만들어질 수 있다. 이것은 Fig. 3.4(b)와 같은 스카이 혹은 댐퍼 형상을 만든다.

$$F = CX_1 + KX_2 \quad (3.19)$$

질량에 가해지는 힘 F 는 식 (3.19)에 나타나 있다. 분명히, 스카이 혹은 댐퍼 형상은 움직이는 차량에는 가능하지 않다. 필요한 동력을 줄이기 위하여, 식 (3.18) 또

는 (3.19)의 마지막 항은 힘 발생기와 평행한 스프링에 의하여 제공될 수 있다. 이 힘 발생기는 식 (3.20)에 설명된 스카이 훅 감쇠력 F 만 제공할 필요가 있다.

$$F = CX_1 \tag{3.20}$$

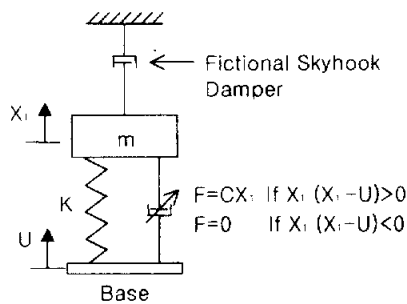
이 힘 발생기는 최적 제어력의 일부만을 제공할 필요가 있으므로, 이 시스템은 수동형 요소가 없는 완전 능동형 현가 시스템보다 적은 동력을 필요로 한다.

Fig. 3.4에 보여진 시스템 (a), (b), (c) 모두 동일하게 동작할 것이다. 이러한 시스템의 주파수응답 또한 Fig. 3.4에 나타나 있다. 수동형 시스템과는 달리, 저주파수와 고주파수 사이의 성능의 교환(trade-off)이 없다. 감쇠비가 0.707에 접근할수록, 감쇠는 모든 주파수에서 이룰 수 있다. 분명히, 완전 능동형 현가 시스템은 수동형 시스템보다 우월한 진동절연을 나타낸다.

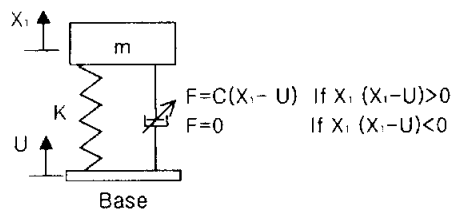
3.4 반능동 제어⁽²⁷⁾

Fig. 3.5는 준능동 현가장치를 나타낸다. 완전능동형 현가장치와 마찬가지로, 연속적인 준능동 현가장치(continuous semi-active suspension)는 최적 스카이훅 현가장치와 비슷하게 작동한다. 완전능동형 현가장치와는 달리, 능동형 댐퍼가 최적의 제어력이나 스카이훅 감쇠력을 만들어낼 수 없을 때가 있다. 이러한 때에는 능동형 댐퍼가 오리피스 설정에 대하여 밸브를 최대한으로 열어, 매우 작은 힘을 내도록 하는 것이다. 능동형 댐퍼에 대한 제어법칙은 속도에 대한 구속조건이 있는 것을 제외하고는, 식 (3.20)에 묘사된 것처럼 수동형 스프링을 가진 완전능동형 현가(fully active suspension)와 유사하다. 이 속도 구속조건은 식 (3.21)에 나타낸 것처럼 제어규칙을 결정한다.

$$\begin{aligned} F &= CX_1 && \text{If } X_1 (X_1 - U) > 0 \\ F &= 0 && \text{If } X_1 (X_1 - U) < 0 \end{aligned} \tag{3.21}$$



(a) Continuous semi-active suspension



(b) On/off semi-active suspension

Fig. 3.5 Semi-active suspensions

만약, 절대속도 X_1 과 상대속도 $X_1 - U$ 가 같은 부호를 가지면, 즉, 그들이 같은 방향이면, 밸브의 변화에 의한 준능동형 댐퍼는 스카이훅 감쇠력을 나타낸다. 그러나 만약, 절대속도 X_1 과 상대속도 $X_1 - U$ 가 반대부호를 가지면, 능동형 감쇠력에 의한 발생하는 힘은 0과 같아질 것이다.

Fig. 3.5에 나타난 연속형 준능동 현가시스템은 가상적인 스카이훅 댐퍼 (fictional skyhook damper)를 보여준다. 능동형 댐퍼가 가상적인 스카이훅 댐퍼와 같은 힘을 생성하려한다. 이 그림은 식 (3.21)에 묘사된 제어규칙이 어떻게 작용하는가를 나타내는데 유용하다. 절대속도가 양이라 가정하면 질량 m 은 위쪽으로 움직인다. 또한, 상대속도가 양이면 질량과 기초는 분리되고 있다. 이 경우, 가상 스카이훅 댐퍼는 질량에 대하여 아래쪽으로 힘을 가하려고 할 것이다. 마찬가지로, 능동형 댐퍼는 질량에 대하여 아래쪽으로 힘을 작용하려한다. 가상적인 스카이훅 댐퍼로부터의 힘은 능동형 댐퍼와 같은 방향이므로, 능동형 댐퍼는 스카이훅 감쇠력을 만들 수 있도록 변화될 수 있다.

이번에는, 질량의 절대속도가 양이고(질량 m 이 위쪽으로 운동한다), 상대속도가 음이라고 가정한다.(질량과 기초가 가까워진다). 이 경우에는, 가상적인 스카이훅 감쇠력은 아래쪽 방향이고 실제 감쇠력은 위쪽 방향이 될 것이다. 분명히, 이번에는 능동형 댐퍼에 있는 오리피스가 스카이훅력을 만들도록 변화될 수 있는 방법이 없다. 그러므로 최선의 방법은 오리피스 면적을 최대밸브가 될 수 있도록 설정하는 것이고, 이를 통해 감쇠계수를 최소화하는 것이다.

On/off 준능동 현가시스템은 연속적인 준능동제어 시스템의 근사이다. On/off 제어 방법은 밸브가 연속적으로 변화될 필요를 제거한다. 식 (3.22)는 on/off

제어규칙을 나타낸다.

$$\begin{aligned} F &= C(X_1 - U) & \text{If } X_1 (X_1 - U) > 0 \\ F &= 0 & \text{If } X_1 (X_1 - U) < 0 \end{aligned} \quad (3.22)$$

식 (3.22)에서의 부등식은 식 (3.21)에서의 그것과 같다. 두 식의 차이는 on 상태에서 발생하는 힘의 차이이다. On/off 준능동 현가시스템에 대하여, on 상태에서 발생하는 힘은 질량과 기초사이에 위치한 고정된 오리피스 감쇠기에 대한 자연력(natural force)이다. 그러므로 밸브는 변화될 필요가 없고, 결과적으로 스카이훅 감쇠력을 발생하지 않는다.

On/off 준능동 현가시스템에서 최대 오리피스면적은 off 상태를 만들어낸다. 연속적인 준능동 시스템과는 달리, 오리피스면적이 on 상태에서 변화되지 않는다. On 상태에서는 오로지 최소의 오리피스 면적이 되도록 닫는다. 연속형과 on/off 준능동 현가장치 모두 능동형 댐퍼의 밸브는 시스템으로의 진동의 최대주파수와 비교했을 때 빠를 필요가 있다. 연속형과 on/off 양쪽 모두의 준능동형 현가장치는 전 주파수영역에서 절연을 나타내고, 많은 양의 동력의 필요 없이 완전 능동형 시스템과 유사하게 작동한다는 점은 중요한 사실이다.

4. 실험 및 고찰

4.1 스퀴즈 모드형 MR 마운트

Fig. 4.1은 스퀴즈 모드형 MR 마운트가 하나의 질량을 지지하는 실험장치를 나타내고 있다. 전자석 코어는 자기 투자율이 높은 순철이 사용되었고, MR 유체는 고무판으로 밀봉되어있다. MR 마운트 시스템의 주요치수제원은 Table 4.1에 나타나있다. 질량부의 수직방향 이외의 진동을 구속하기 위하여 sliding 베어링 및 봉을 설치하였다. MR 유체에 부가하는 자기장의 세기에 따른 감쇠 특성을 검토하기 위하여, Fig. 4.1의 MR 마운트 시스템을 가진기(exciter) 위에 설치하고, 전자석 코일에 부가하는 전류의 세기의 변화에 대한 가진 실험을 행하였다. Fig. 4.2는 실제 제작한 실험장치를 가진기 위에 설치한 것을 나타내었다.

실험에 사용된 가진기는 MB DYNAMICS사의 PM50A Vibration Exciter이다. 가진기의 사양은 힘 출력이 50 파운드 피크, 변위는 0.5 인치 양진폭, 속

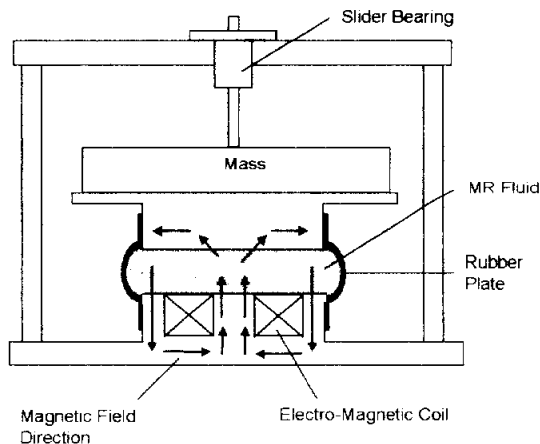


Fig. 4.1 Schematic diagram of MR mount

Table 4.1. Principle dimensions of MR mount

Mass	2.1 kg
Outer damper diameter	45 mm
Electric coil turns	650
Electric coil resistance	9.2 Ω
Electric coil diameter	0.35 mm
Gap between upper and lower damper	5.0 mm

도는 70 in/s, 가속도는 78 g, 그리고 주파수범위는 5~10,000 Hz이다. 변위 전달률을 측정하기 위하여 기초와 질량부에 각각 한 개씩의 변위계를 설치하였다. 사용된 변위계는 Bently Nevada사의 와전류 센서이고, 변위계의 감도는 7.89 mV/mm, 측정범위는 0.25~1.78 mm peak-peak이다. 한편, 사용된 변위센서는 AISI 4140이라는 금속에 대하여 상기의 감도를 가지고, 실험장치의 기초와 질량부의 재질에 대한 감도는 각각 7.77 V/mm와 7.26 V/mm이다.

가진기 제어 프로그램은 DATA PHYSICS사의 DP550 Vibration Control System을 사용하였고, 변위 전달률 측정을 위하여 0.1 mm peak-peak 변위로 10 Hz부터 50 Hz까지 sweep 가진을 실시하였다. 가진기로부터 마운트의 기초를 실제

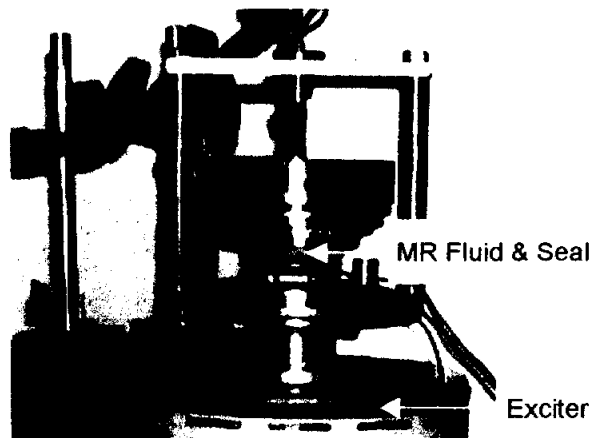


Fig. 4.2 Experimental apparatus of MR mount

가진한 변위를 측정하여 피드백하는 데는 B&K사의 Charge Accelerometer Type 4371을 사용하였다. 한편, Mass의 질량은 2.09 kg이다.

4.2 실험 결과 및 고찰

Fig. 4.3은 가진 실험으로부터 측정된 질량부와 가진부의 변위로부터 전달률을 주파수에 대해서 나타낸 그림이다. 마운트 시스템의 공진주파수는 약 26 Hz이고, 고무의 강성계수에 따라서 공진주파수는 달라진다. 마운트에 추가하는 전류가 증가함에 따라서 공진피크는 감소하지만, 공진주파수는 증가한다. 이 현상은 1 자유도계에서 질량을 지지하는 점성감쇠계수가 증가할 때에 공진주파수가 감소하는 것과는 상반된다. 전류를 부가하지 않았을 경우에 비해서 0.6 A 전류를 부가했을 때, 공진피크와 공진주파수는 각각 76 % 감소 및 33 % 증가하였다.

전류가 증가함에 따라서 공진주파수가 상승하는 현상은 일반적으로 MR 혹은 ER 유체를 이용한 마운트의 경우에 나타나는 현상이다.^{(3), (10), (12), (14)} 그런데, 이와 같은 현상은 일반적으로 MR 혹은 ER 유체가 Bingham 유체의 특징인 쿨롱 감쇠의 특성을 나타내기 때문으로 가정을 하고 해석하는 경우가 대부분이다. 그 이유는 한쪽 방향으로 전단이 발생하는 점도계로 측정된 ER 혹은 MR 유체의 특성은 전장이나 자장을 부가함에 따라서 Bingham 유체의 특성이 나타나기 때문이다. 그러나 이 특성은 진동과 같은 왕복운동이 일어날 때의 특성과는 차이가 있지만, 많은 연구자들은 ER 혹은 MR 유체를 이용한 감쇠기나 마운트에 전장 혹은 자장을 부가했을 때 쿨롱감쇠가 작용하는 것으로 판단하는 경우가 많이 있다.^{(3), (12), (14)}

따라서 본 연구에서는 MR 마운트에 전류를 부가하였을 경우에 어떤 특성이 변화하는지 실험적으로 검토하기 위하여 Fig. 4.4와 같은 MR 마운트의 실험장치를 구성하였다. 고정부에 힘 센서와 가진부에 변위계가 설치되어 있고, 이들 센서로부터 가진부의 변위와 마운트에 의해서 전달되는 힘이 측정되어진다.

Fig. 4.5(a)는 주파수 25 Hz, 변위 0.1 mm peak-peak로 가진하였을 때, 얻어진 시간에 대한 힘의 파형을 나타내고 있다. 부가하는 전류가 증가함에 따라서 전달력이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 전달력의 특성을 파악하기 위하여 Fig. 4.5(a)의 힘 파형, 가진부의 변위 파형, 그리고 시간에 대한 변위 파형으로부터 얻은 속도 파형을 이용하여 Fig. 4.5의 (b) 및 (c)와 같은 힘-변위 및 힘-속도 선도를 나타내었다.

Fig. 4.5(b)의 힘-변위 선도에서 직사각형 형태가 나타나면 쿨롱 감쇠력이 마운트에 작용하는 것으로 볼 수 있다. 그러나 타원형태의 히스테리시스루프이므로 점성 감쇠력과 강성력이 함께 존재하는 것으로 판단된다. 전류가 증가함에 따라서 루프의 장축 방향의 기울기가 증가하므로 강성이 증가함을 알 수 있다.

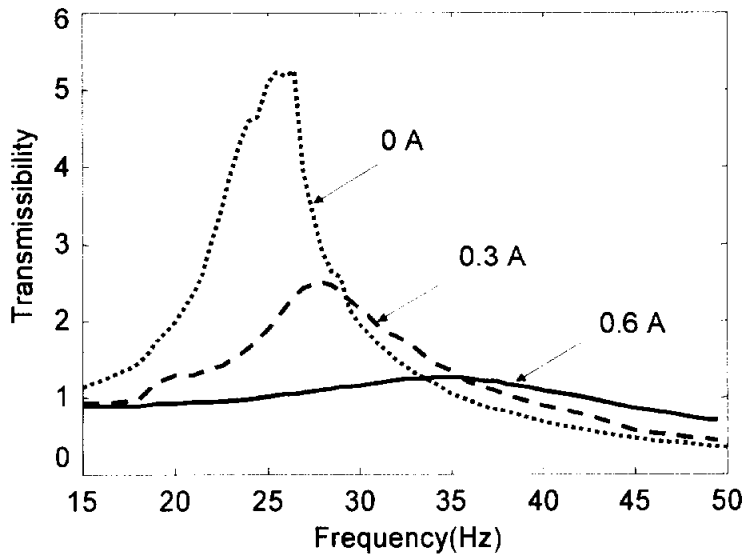


Fig. 4.3 Transmissibility under various magnetic fields

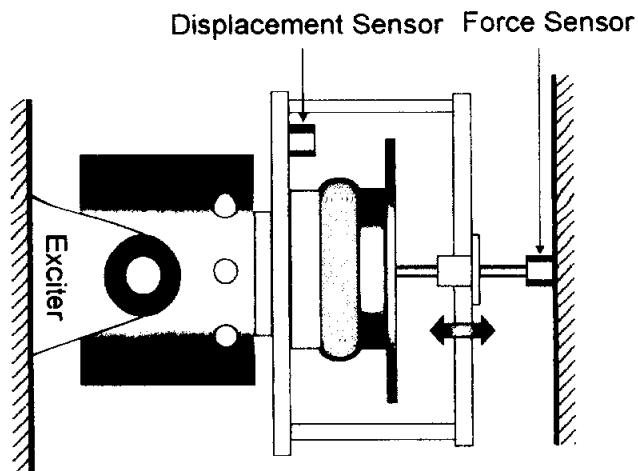
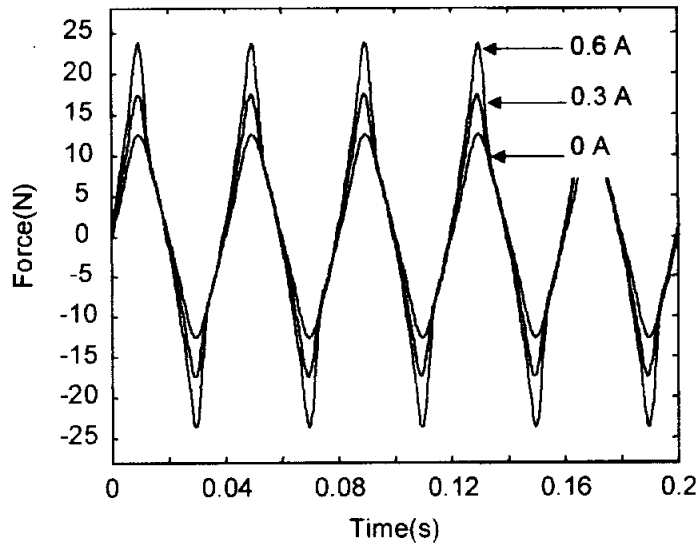
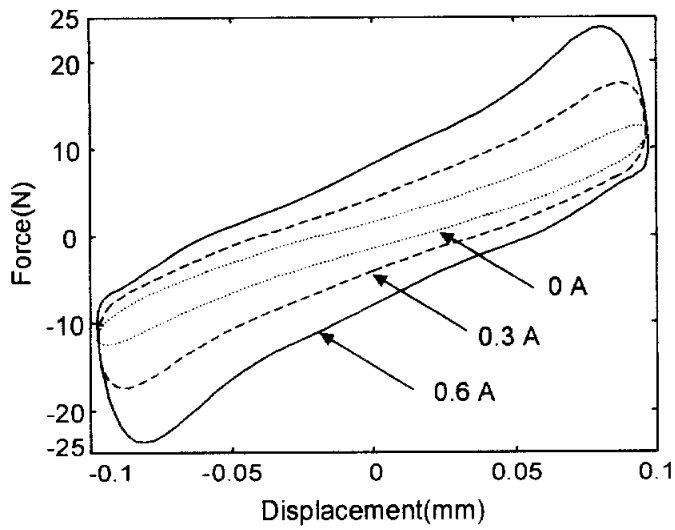


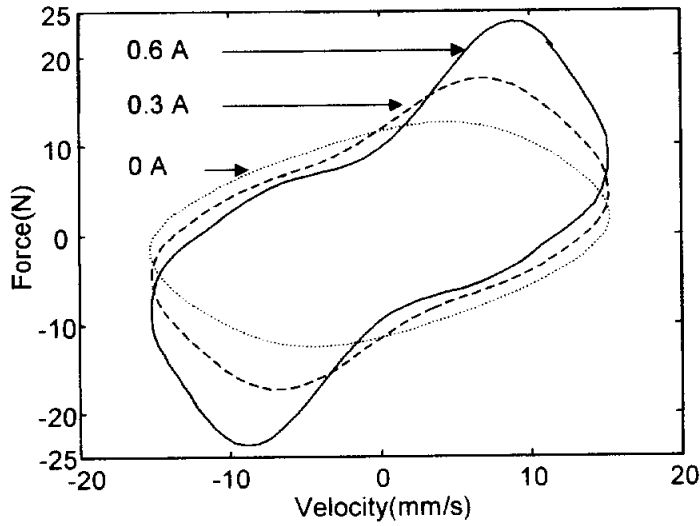
Fig. 4.4 Test setup for MR mount identification



(a) Force vs. time



(b) Force vs. displacement hysteric loop



(c) Force vs. velocity

Fig. 4.5 Experimentally measured force for 25Hz sinusoidal excitation with an amplitude of 0.1mm

Fig. 4.5(c)에서 힘이 속도의 크기에 무관하고 속도의 방향에만 관계할 때 쿨롱 감쇠력이 작용하는 것으로 판단할 수 있지만, 그림에서는 히스테리시스 루프이고 전류의 세기가 증가함에 따라서 루프의 기울기가 상승한다. 그러므로 점성감쇠계수가 증가함을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 알려진 바와 같이 쿨롱 감쇠특성이 지배적이지 않다.

힘-변위 선도에서 루프 내부의 면적 A 와 힘-속도선도의 루프내부의 면적을 B 라 할 때, 점성감쇠계수 C 와 강성계수 K 를 유도할 수 있다.^{(29),(30)}

$$C = A / (\pi \omega X^2) \quad (4.1)$$

$$K = B / (\pi \omega X^2) \quad (4.2)$$

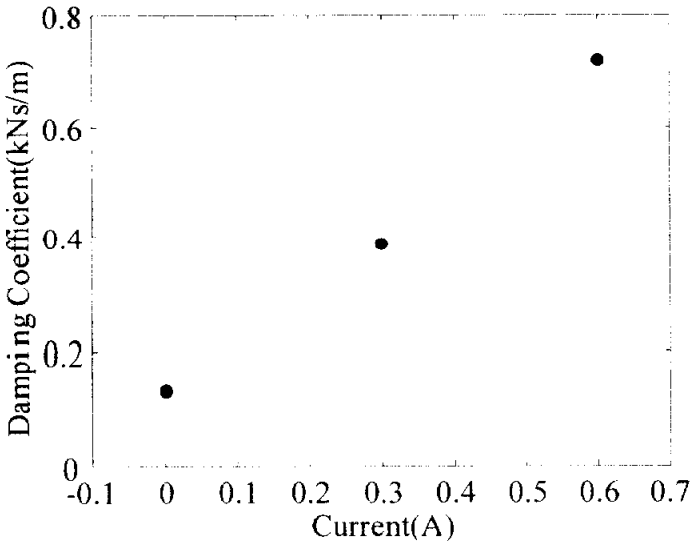
여기서 ω 는 가진 주파수, X 는 최대가진 진폭이다. 면적 A 와 B 는 1주기 동안의 점성감쇠에 의한 손실에너지와 강성에 의한 탄성에너지와 같다. 따라서 식 (4.1)과 (4.2)를 이용하여 Fig. 4.3의 (b)와 (c)로부터 얻은 점성 감쇠 및 강성계수 값을 구하였고, 이를 Fig. 4.4에 나타내었다. Fig. 4.4에서 전류의 세기가 증가함에 따라서 감쇠 및 강성계수가 증가하고 있음을 알 수 있다.

Table 4.2. Quantitative equivalent damping coefficient according to the electrical current(unit : N · s/mm)

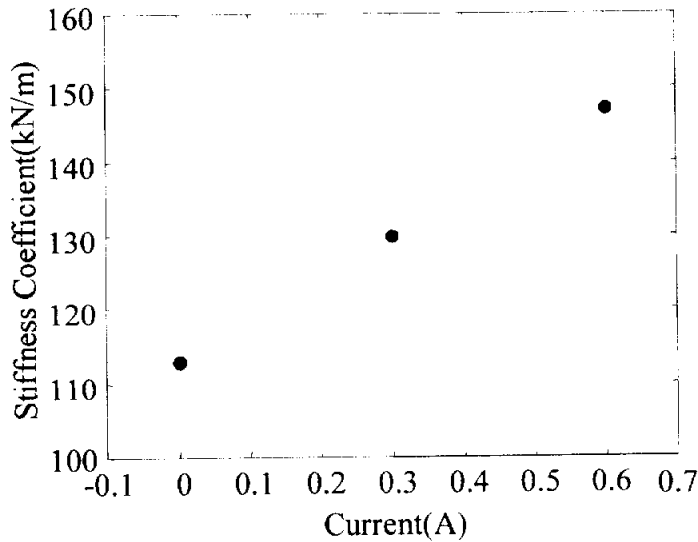
Current Frequency(Hz)	0 A	0.3 A	0.6 A
15	0.2	0.553	1.025
20	0.183	0.460	0.825
25	0.133	0.386	0.719
30	0.165	0.374	0.623

Table 4.3. Quantitative equivalent stiffness coefficient according to electrical current(unit : N/mm)

Current Frequency(Hz)	0 A	0.3 A	0.6 A
15	113.85	138.33	170.2
20	116.02	131.98	158.38
25	112.97	129.96	147.03
30	105.45	122.78	147.92



(a) Equivalent damping coefficient vs. electric current



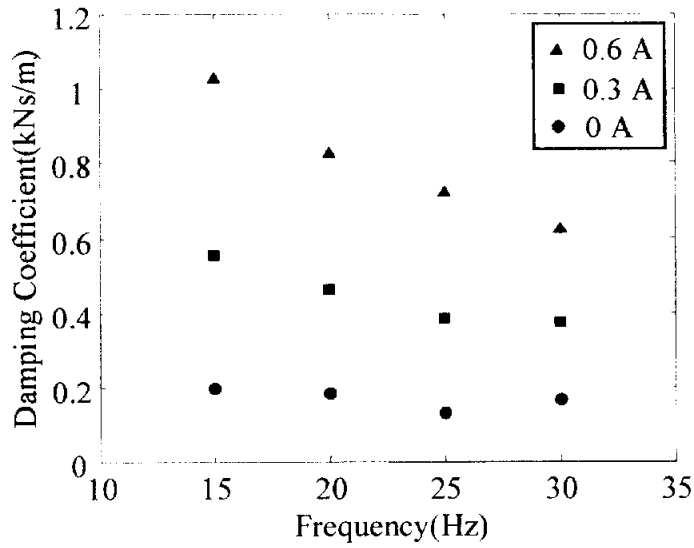
(b) Equivalent stiffness coefficient vs. electric current

Fig. 4.6 Response of the MR mount under various magnetic fields for 25Hz sinusoidal excitation with an amplitude of 0.1mm

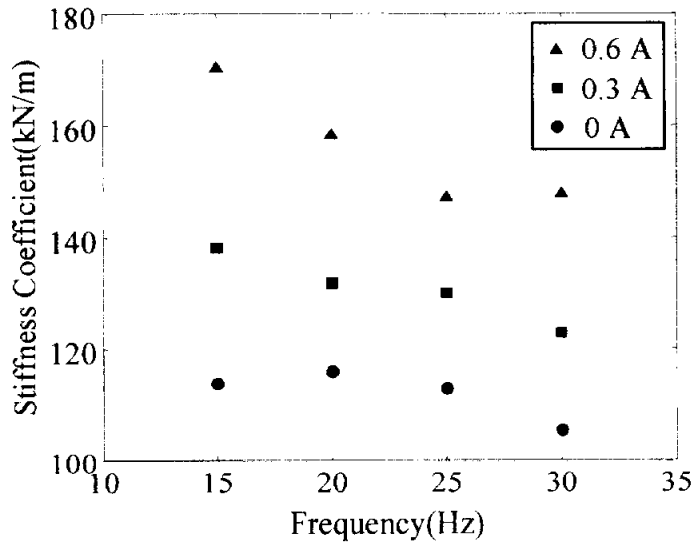
다음은 마운트의 가진 주파수에 대한 응답특성을 검토하기 위하여 가진 변위는 0.1mm로 일정하게 유지하고, 가진 주파수를 변화시키면서 전달력을 측정하고 이들 파형과 식 (4.1)과 (4.2)로부터 점성감쇠 및 강성계수 값을 구하여 Table 4.2와 4.3에 나타내었다. Fig. 4.7은 Table 4.2와 4.3을 토대로 주파수에 대한 점성감쇠계수와 강성계수를 나타낸 것이다.

Fig. 4.7에서 가진 속도가 증가함에 따라서 점성감쇠 및 강성계수가 낮아지고 있는데, 이 현상은 동일한 가진 주파수에서 진폭이 큰 경우에 이들 계수가 낮아짐을 의미한다. 즉, 동일한 진폭에서 가진 주파수가 증가함에 따라서 MR 유체의 효과가 떨어짐을 알 수 있고, 이 결과는 한쪽 방향으로 전단이 발생하는 점도계에서 측정한 결과와 일치한다.⁽⁷⁾

이들 실험결과로부터 얻어진 MR 마운트의 유체·기계적 모델을 Fig. 4.8에 나타내었다.⁽⁴⁾ Fig. 4.8에서 나타낸 것과 같이 고무의 수축에 의해 입력속도 $P_m, \dot{x}$ 와 진동이 발생하고, 챔버(chamber) 내에서 유체압력의 변화를 수용하기 위하여 고무의 벽에 확장현상이 발생한다. K_R 은 고무의 강성을 나타내고, 고무의 감쇠상수는 C_R 로 나타내었다. 확장현상이 일어날 때, 발생하는 유체의



(a) Equivalent damping coefficient vs. exciting frequency



(b) Equivalent stiffness coefficient vs. exciting frequency

Fig. 4.7 Response of the MR mount under various exciting frequencies

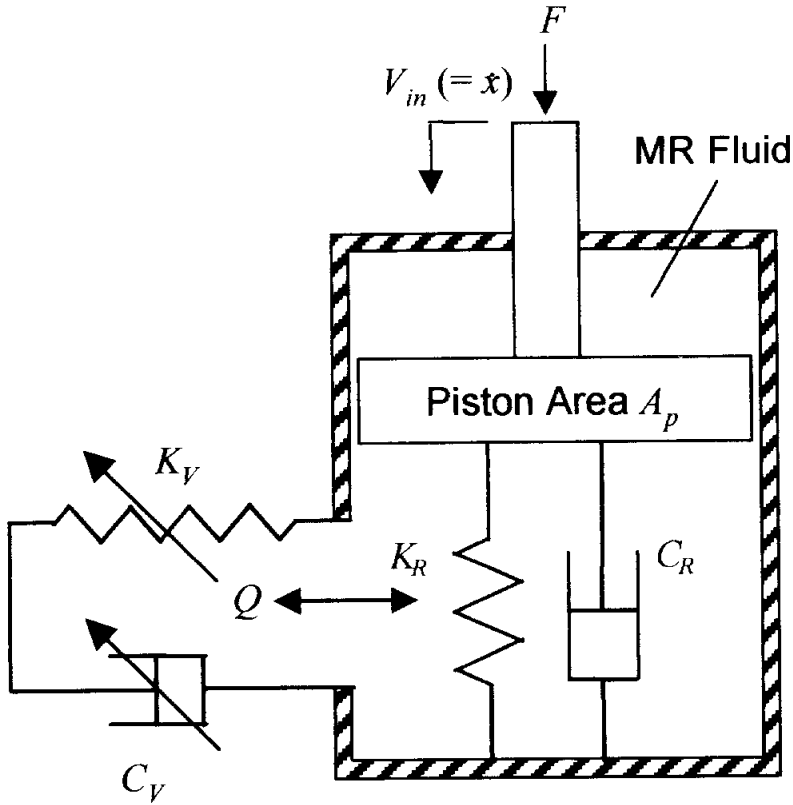


Fig 4.8 Fluid and mechanical model of MR mount

압력변화 ΔP 에 의해 변화하는 마운트의 체적변화 ΔV 와 유량변화 ΔQ 로부터 체적강성은 $K_V = \Delta P / \Delta V$, 체적감쇠는 $C_V = \Delta P / \Delta Q$ 로 표현된다. Fig. 4.8로부터 마운트의 지배방정식을 유도해야 하는데, 이 모델은 K_R 및 C_R 과 같은 기계적 요소와 유체유량 Q 에 대한 요소, 즉 2개의 에너지 영역을 가지고 있다. 이와 같은 복수의 에너지 영역을 가지는 시스템의 모델링에 유용한 수단인 bond graph모델링 기법을 이용하여 본 마운트를 선형적으로 전개하면, Fig. 4.9와 같이 나타낼 수 있다. Fig. 4.9의 bond graph모델을 이용한 유량에 관한 방정식은 다음과 같다.

$$\dot{\bar{q}}_V = -A_p \dot{x} \quad (4.3)$$

$$\dot{\bar{q}}_R = \dot{x} \quad (4.4)$$

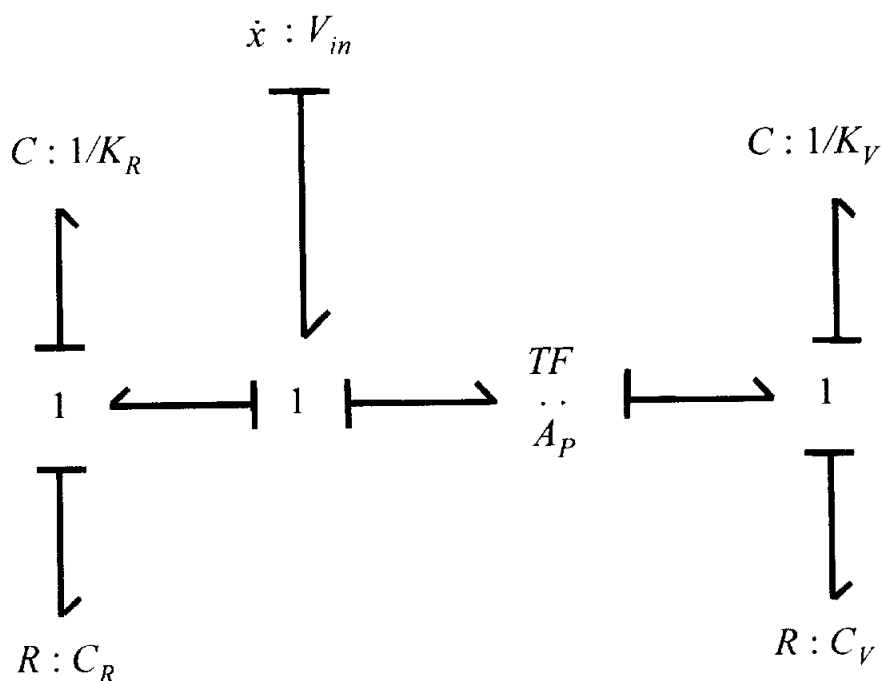


Fig. 4.9 Bond graph model of the MR mount

여기서 q_V 는 체적강성 K_V 의 체적변위, q_R 은 스프링강성 K_R 의 변위, 변수 A_P 는 마운트의 유효 피스톤 단면적이다. 마운트의 제진특성을 나타내는 동강성 파라미터는 다음 식과 같이 변위 x 에 대한 힘 F 의 비로서 나타낼 수가 있다.

$$\frac{F(j\omega)}{x(j\omega)} = K^* = (K_R + K_{MR}) + j\omega(C_R + C_{MR}) \quad (4.5)$$

여기서 $K_{MR} = A_P^2 K_V$ 이고, $C_{MR} = A_P^2 C_V$ 이다.

본 연구의 실험결과를 이용하여 얻은 마운트의 운동방정식 (4.5)를 종래의 운동방정식과 비교하면 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + F_{MR}(H)\text{sgn}(\dot{x}) = f \quad (4.6)$$

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + C_{MR}(H, \dot{x}) + K_{MR}(H, x)x = f \quad (4.7)$$

여기서 M 은 부하질량, x 는 부하질량의 변위, K_R 과 C_R 은 각각 고무의 강성

과 감쇠계수이고, f 는 가진입력이고 외부 마찰력은 없다. F_{MR} , C_{MR} , K_{MR} 은 각각 쿨롱감쇠력, 점성감쇠계수와 강성계수이고 부가하는 전류의 함수인 자장 H 의 함수이다. 또한, C_{MR} 과 K_{MR} 은 각각 속도 $\dot{x}$ 와 변위 x 의 함수이다.

식 (4.6)은 MR 유체의 특성을 Bingham 혹은 Herschel-Bulkley 모델⁽³¹⁾로서 표현을 하여 얻은 식으로, F_{MR} 항은 질량부의 속도 크기에는 무관하고 그 부호에만 관계하는 쿨롱감쇠력을 나타내지만 본 실험에서 쿨롱감쇠력은 존재하지 않았고, 반면에 식 (4.7)과 같이 전류의 변화에 따라서 점성 감쇠력 및 강성력이 변화함을 확인하였다.

MR 마운트 시스템의 파라미터들은 시행착오를 통하여 구해졌고, 그 값들은 Table 4.4에 나타나 있다. 식 (4.6)과 Newmark β 법을 이용하여 구한 힘 전달률을 Fig. 4.10에 나타내었다. Fig. 4.11은 식 (4.7)을 이용하여 구한 변위 전달률을 주파수의 함수로 나타낸 것이다. Fig. 4.10과 쿨롱감쇠력이, Fig. 4.11에서는 감쇠와 강성계수가 증가할수록, 전달률의 피크는 감소하고, 공진주파수는 상승함을 보여준다. Fig. 4.10에서 쿨롱감쇠력이 증가할수록 전달률의 피크는

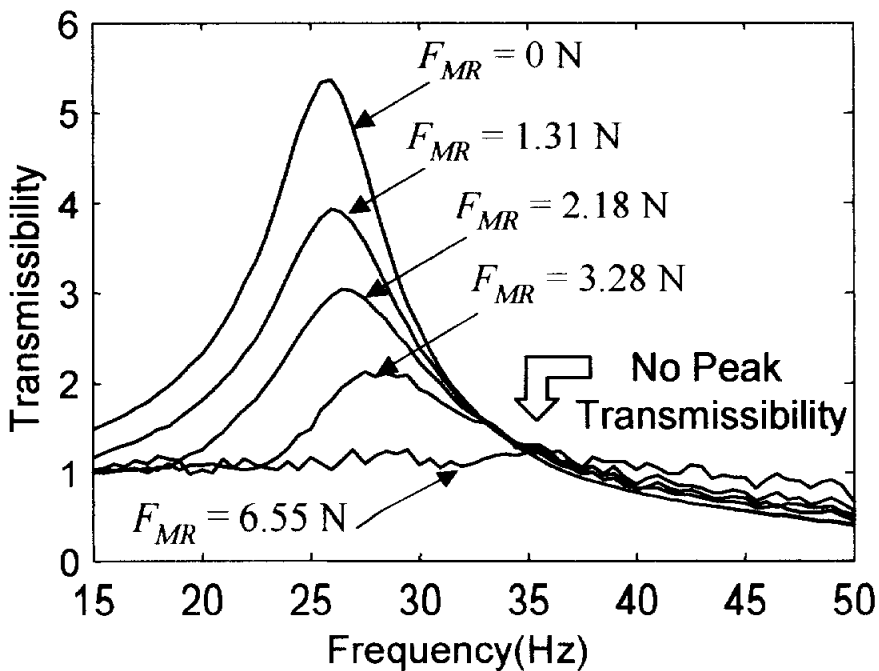


Fig. 4.10 The ratio of transmitted force and input force

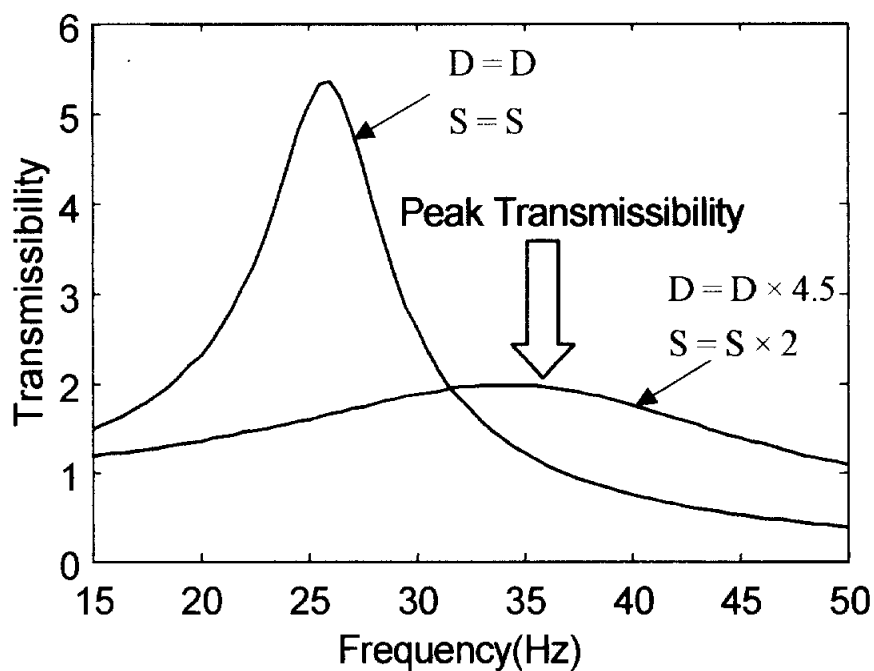


Fig. 4.11 Simulated transmissibility of MR mount

Table 4.4 MR mount parameters for numerical simulation

Symbol	Description	Value
M	Load mass	2.1 kg
$D = C_R + C_{MR}$	Total viscous damping coefficient	65.5 N · s/m
$S = K_R + K_{MR}$	Total stiffness coefficient	5.6554×10^4 N/m

나타나지 않지만, Fig. 11에서는 전달률의 피크는 약 35Hz인데, 이것은 실험결과와 유사하다. 그러므로 식 (4.6)은 MR 유체의 특성을 나타내는 지배방정식이 될 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 외부자장에 의해 유동학적 특성을 변화시키는 것이 가능한 기능성유체로서 알려진 MR 유체를 이용하여, 외부자장의 세기에 의해 감쇠특성이 변화하는 스쿼즈모드형 마운트를 제작하여 진동 제진성능에 관하여 실험적인 평가를 수행하였다. 또한 MR 유체를 이용한 스쿼즈모드형 마운트의 특성이 자장의 변화에 따라서 Bingham 유체의 특성을 나타내는지를 조사하였다. 이를 위해 전달력-변위, 전달력-속도전도를 실험적으로 나타낸 후, 등가 점성 감쇠계수와 등가 강성계수를 구하여 부하자장에 따른 선도로써 확인하였다.

본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) MR 유체를 이용한 마운트에 부가하는 전류를 조절함으로써 폭 넓은 주파수 영역에서 진폭을 보다 효과적으로 줄일 수 있음을 확인하였다.
- 2) MR 마운트에 부가하는 전류가 증가함에 따라서 점성 감쇠력이 증가하며, 또한 강성력이 증가하여 마운트의 공진주파수가 상승하는 것을 확인하였다.
- 3) MR 유체의 감쇠효과는 고주파수 영역에 비해서 저주파수 영역에서 보다 효과적임을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Flower, W. C., 1985, Understanding Hydraulic Mounts for Improved Vehicle Noise Vibration and Ride Qualities, Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper No. 850975.
- (2) Ahn, Y. K., Song, J. D., and Yang, B. S., 2003, Optimal Design of Engine Mount Using an Artificial Life Algorithm, *J. Sound and Vibration*, **261** (2), pp. 309-328.
- (3) Hong, S. R., Choi, S. B. and Han, M. S., 2002, Vibration Control of a Frame Structure Using Electro-Rheological Fluid Mounts, *J. Mechanical Sciences*, **44** (10), pp. 2027-2045.
- (4) Ahn, Y. K., Yang, B. S., and Morishita, S., 2001, A Modeling of a Variable-Damping Mount Using Magneto-Rheological Fluid, *The Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, **11** (2), pp. 141-146.
- (5) Weiss, K. D., Duclos, T. G., Carlson, J. D., Chrzan, M. J. and Margida, A. J., 1993, High Strength Magneto- and Electro-Rheological Fluids, Society of Automotive Engineers, SAE Technical Paper No. 932451.
- (6) 김정훈, 1996, 자성유체를 이용한 반응동 마운트의 설계, 제작 및 모델링, 한국과학기술원 석사학위논문
- (7) 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.
- (8) 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*, **5**, pp. 565-575.
- (9) 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.
- (10) Simon, D. and Ahmadian, M., 2001, Vehicle Evaluation of the Performance of Magneto Rheological Dampers for Heavy Truck Suspensions, *ASME J. Vibration and Acoustics*, **123**, pp. 365-375.
- (11) Nikolajsen, J. L. and Hoque, M. S., 1988, An Electroviscous Damper for Rotor Applications, *ASME, J. Vibration and Acoustics*, **112** (3), pp. 440-443.
- (12) Carlson, J. D. and Spencer Jr., B.F., 1997, Magneto-Rheological Fluid

Dampers for Semi-Active Seismic Control, Proc. of 3rd International Conference on Motion and Vibration Control, September 1-6, Chiba, Japan, III, pp. 35-40.

- (13) Hoque, M. S., 1988, Experimental Investigation of an Electroviscous Damper for Rotordynamics Applications, Master thesis, Mechanical Engineering Department, Texas A&M University.
- (14) Kim, J. H., Lee, C. W., and Lee, S. K., 1996, Modeling of Magneto-Rheological Fluid Based Semi-Active Mount, Proc. of 3rd International Conference On Motion and Vibration Control, Japan, pp. 164-169.
- (15) J. D. Carlson, D. N. Catanzarite and K. A. St Clair, Commercial Magneto-Rheological Fluid Devices, Proceedings of 5th Int. Conf. on ER Fluids, MR Suspensions and Associated Technology, W. Bullough, Ed., World Scientific, Singapore (1996) 20-28.
- (16) Rabinow, J., 1948, Fibration of Suspensions, M. Applied Physics, Vol. 20, pp. 1137-1140.
- (17) 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.
- (18) 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.
- (19) Laun, M. H., Kormann, C. and Eillenbacher, N., 1996, Rheometry on Magnetorheological (MR) Fluids, Rheologica Acta, Vol. 35, No. 5, pp. 417-432.
- (20) Teng, X. and Conrad, H., 1996, Quasistatic Measurements on a Magnetorheological Fluid, J. of Rheology, Vol. 40, No. 6, pp. 1167-1178.
- (21) Boter, 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.
- (22) 神山新一, 2001, 磁性流體入門, 産業圖書.
- (23) 유영식, 2001, ER유체와 MR유체의 특성분석 및 비교, 인하대학교 교육대학원 석사학위논문

- (24) J. David Carlson, Mark R. Jolly, 2000, MR Fluid, Foam and Elastomer Devices, *Mechatronics*, 10, pp. 555 ~ 569.
- (25) 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.
- (26) Daniel J. Inman 저, 이건복, 임병덕, 정태건, 황세혁 공역, 2002, 최신기계진동학, Prentice Hall.
- (27) L. R. Miller, An Introduction to Semi-Active Suspension Systems, Lord Library of Technical Articles.
- (28) Snowdon, John C. and Ungar, Eric E., eds., Sept. 1973, Isolation of Mechanical Vibration, Impact, and Noise, ASME Design Engineering Technical Conference.
- (29) Rao, S. S., 1995, Mechanical Vibrations with Disk (3rd Edition), Addison-Wesley, New York.
- (30) 신동춘, 2003, MR유체를 이용한 다방향 제진형 마운트에 관한 연구, 부경대학교 석사학위논문
- (31) Lee, D. Y. and Wereley, N. M., 2000, Analysis of Electro- and Magneto-Rheological Flow Mode Dampers Using Herschel-Bulkley Model, *Proceeding of SPIE*, Vol. 3989, pp. 244-255.
- (32) Ahn, Y. K., Ha, J. Y., Yang, B. S. and Kim, D. J., 2003, Dynamic Properties of Squeeze Type Mount Using MR Fluid, *Proceeding of Internoise2003*, pp. 4188-4195.

감사의 글

무사히 이 글을 쓸 때까지 인도하신 하나님 아버지께 먼저 감사드립니다. 2년여의 실험실생활 동안 관심과 격려와 충고로써 저를 지도해주신 양보석 교수님께 감사드립니다. 저의 연구에 대한 관점과는 다른 각도로 바라보시고 충고를 아끼지 않으신 김동조 교수님, 저의 실험과 연구를 지도하신 안영공 교수님께 감사의 글을 전합니다. 실험장치 제작과 관련하여 문의드릴 때마다 친절하게 대답해주신 이일영 교수님, 저의 진로와 논문에 많은 관심을 보여주신 이수종 교수님께도 감사의 마음을 전하고 싶습니다. 저의 졸필로 그동안 저를 지도하신 교수님께 감사의 글을 충분히 전하지 못함을 유감스럽게 생각합니다.

제가 공부에만 전념할 수 있도록 물심양면으로 도움을 주신 부모님께 감사드립니다. 바쁘다는 핑계로 자주 찾아뵙지 못해 죄송하다는 말씀, 이 글을 빌어 전합니다. 저의 진로에 관심을 가지고, 경제적으로 도움을 주신 형, 누님, 자형께 감사드립니다. 사랑스런 두 조카인 혜선이와 준수가 착하고, 건강하게 잘 자라서 기쁩니다. 저에게 관심과 지원을 아끼지 않으신 삼촌과 숙모님, 항상 저를 반갑게 맞아주시는 이모와 이모부께 감사드립니다.

학생들에게 김밥이랑 음료수를 준비해 오셔서 격려해주신 사모님, 후배의 취직에 관심이 많으신 영모형, 학회참석이나 실험실 M.T 등에서 가이드로서의 역할을 마다하지 않으신 영찬형, 저의 고민을 들어주시고 조언해 주셨던 용한형, 실험실장으로서 실험실을 잘 이끌어 가시는 진대형, 중국에서 Post Doc.으로 오셔서 저와 아주 친해진 Dr. Feng, InterNoise 학회에서 저와 더욱 친해진 한천과 그의 아내 손단단, 저의 어려움을 동정해 주시던 광진형께 감사의 마음을 전합니다. 사람이 순한 형은이, 운동을 좋아하는 상일이, 실험실 컴퓨터 관련 작업으로 많은 수고를 한 원우, 함께 고민을 나누었던 병일이, 신앙의 선배이고 맑은 바에 충실한 종덕이, 신수가 원한 민찬이, 행동으로 보여주는 재갑이, 성격이 시원스러운 선화, 성격이 차분하고 꼼꼼한 지의, 엇그제 실험실에 들어온 애희, 모든 분들께 저에게 베풀어 준 도움에 감사드립니다.

연구 분야가 같았던 동춘형, 열심히 하셨던 호일형, 대학원 선배로서 조언을 해주셨던 용수형에게 감사드립니다. 전자석 코일을 감아주셨던 동양상사의 정성수 사장님, 실험장치제작에 많은 도움을 주신 이민섭 기사님과 백기영 선생님께도 감사의 말씀을 전합니다. 미처 기억하지 못해 이 지면을 통하여 감사를 표현하지 못한 분들께는 너그러운 마음으로 용서하시길 빌며, 이 글을 통하여 감사의 마음을 전하고자 합니다.