

자기유변유체를 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼에서의 부강성 효과 규명

Identification of Negative Stiffness Effects in Magneto-Rheological Fluid based Squeeze Film Damper

°김근주*·김정훈*·이종원**

Kim, Keun-Joo, Kim, Jeong-Hoon, and Lee, Chong-Won

Key Words : Negative Stiffness(부강성), Magneto-Rheological Fluid(자기유변유체), Squeeze Film Damper(스퀴즈 필름 댐퍼), Eddy Current(와전류), Stability(안정성)

ABSTRACT

In order to investigate the stability of magneto-rheological fluid based squeeze film damper (MR-SFD), its negative stiffness effect, which arises from magnetization of MR-SFD, is identified theoretically and experimentally. The analytical model of MR-SFD includes the magnetic circuit as well as the displacement stiffness associated with the squeeze mode of MRF. Extensive experiments are carried out to measure the magnetic attraction forces generated in the MR-SFD, with the excitation frequency and the eccentricity of the journal varied, which are controlled by an active magnetic bearing. The simulation and experimental results are found to be in good agreement. It is concluded that the negative stiffness effect dominates only in the low frequency region because its effect diminishes in the high frequency region due to the eddy-current loss.

기호설명

- A : 자기선속이 흐르는 단면적
- B : 자속밀도
- c : 본체와 저어널 사이의 공극
- c' : 저어널과 외부시일 사이의 공극
- e : 저어널의 변위(displacement)
- F_m : 자기력
- g : 자기장이 인가된 평판사이의 거리
- G_L (g) : 전달함수(transfer function)
- I : 입력전류(current)
- j : $= \sqrt{-1}$
- k : 강성
- K_{NS} : 부강성계수
- l : 외부시일의 축방향 길이
- L : 베어링의 축방향 길이
- N : 슬레노이드의 감은 수
- r_o : 저어널의 외부반경
- R : 하우징 반경
- t : 시간(time)
- ε : 저어널의 편심율(eccentricity) ($= e/c$)
- ϕ : 위상(phase)
- μ_0 : 공기의 투자율(permeability)
- θ : 원주방향 좌표
- ω : 주파수(frequency)
- ψ_m : 슬레노이드에 의해 형성된 자기선속
- \mathfrak{R} : 자기저항(reluctance)

1. 서론

최근의 회전기계는 에너지 효율성 및 기계적 성능 향상을 위해 고속, 고용량, 경량화를 추구하고 있다. 이로 인해 수 개의 임계속도(critical speed)를 포함하는 영역에서 운전속도를 설정하는 경우가 발생하고, 이 때문에 예기치 못한 과도 진동이 발생하여 결국 기계의 수명을 단축하는 결과를 가져오게 된다.⁽¹⁾ 따라서 운전속도 등의 설정시에는 임계속도나 불안정 영역을 피하기 위해서 회전체-베어링계의 동특성(dynamic characteristics)을 회전상태에 따라 정확히 파악하여 이를 능동적으로 변화시키는 것이 필요하다. 그러나 현재까지 쓰이고 있는 수동형 회전체-베어링계로는 이러한 성능 향상을 기대하기 어렵다. 이와 같은 단점을 해결하기 위해 전기유변유체(electro-rheological fluid : 이하 ER유체라 칭함)나 자기유변유체(magneto-rheological fluid : 이하 MR유체라 칭함)를 이용한 반능동 스퀴즈 필름 댐퍼(squeeze film damper)를 구성하고 해석한 연구가 국내외 여러 연구그룹에 의해서 수행되어 오고 있다.⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 특히 Kim⁽⁴⁾ 등은 선행된 연구에서 자기유변유체를 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼(magneto-rheological fluid based squeeze film damper : 이하 MR-SFD라 칭함)에 대한 비선형 모형을 제안한 바가 있다. 그러나 MR-SFD의 모형 검증에 대한 다양한 실험결과를 통해 저주파 영역에서 유막력을 감소시키는 부강성 효과를 확인하게 되었다.

따라서, 본 연구에서는 MR-SFD의 모형화 과정에서 나타난 부강성 효과를 규명하고, 이에 대한 모형화를 통해서 부강성 효과가 MR-SFD의 안정성에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이를 위

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원
E-mail : gjkim@cwllab.kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3056, Fax : (042) 869-8220
** 한국과학기술원 기계공학과

해서 자기회로해석(magnetic circuit analysis)을 이용하여 부강성 효과를 이론적으로 유도하였으며, 자기베어링(active magnetic bearing)을 이용한 가진장치를 사용한 실험에서는 다양한 조건하에서 MR-SFD에 나타나는 자기력을 측정하여 모형의 타당성을 검증하였다. 또한 이와 같은 연구로 규명된 부강성 효과가 MR-SFD의 안정성에 어떠한 영향을 미치는지 고찰해보고 이를 통해 MR-SFD에 대한 모형의 신뢰성을 향상시키고자 하였다.

2. 연구동기

현재까지는 MR-SFD의 설계나 제어를 위해 필수적인 모형의 수립은 시작단계에 있는 상태이다. 선행된 연구에서는 보다 효과적인 제어와 실용적인 설계지침을 제안하기 위해서 MR-SFD에 대한 모형화에 초점을 맞추었다.⁽⁴⁾ 다양한 실험과 이론해석을 통해 MR-SFD에 대한 모형을 제시하였으며, 이를 바탕으로 하여 효과적인 설계지침도 수립하였다. 그러나, 저주파수 영역에서 모형으로 예측하기 곤란한 경향이 나타난 것을 확인하였고 다양한 문헌조사와 참고자료를 통해 이러한 경향이 부강성 효과에 의한 것이라고 판단하게 되었다.

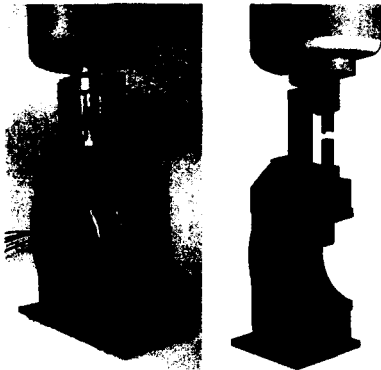


Figure.1 Perspective and cross-sectional view of MR-SFD

부강성 효과란 자기베어링과 같이 자기장을 사용하는 시스템에서 주로 나타나며 시스템의 안정성을 저해하는 것으로 알려져 있다. MR-SFD도 MR유체를 작동시키기 위해서 자기장을 사용하므로 이러한 부강성 효과는 필연적으로 나타나게 될 것으로 예상된다. 따라서 MR-SFD에서 나타나는 부강성 효과의 메커니즘을 규명하고, MR-SFD의 작동영역에서 이러한 부강성 효과가 시스템의 안정성에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구는 보다 효과적인 모형수립에 필수적이라고 할 수 있다. 본 연구에서 MR-SFD의 모형 검증을 위해 제작된 장치의 실제 사진과 단면도가 Figure 1에 나타나 있다.

3. MR-SFD의 부강성 효과

3.1 MR-SFD의 부강성 효과 해석⁽⁶⁾

이론적인 접근을 통한 부강성 효과의 규명을 위해서는 MR-SFD에 자기장이 인가되었을 때 형성되는 자기회로에 대한 해석이 필요하다. Figure 2에는 자기장의 인가에 의해서 MR-SFD에 형성되는 자기회로가 나타나 있다.

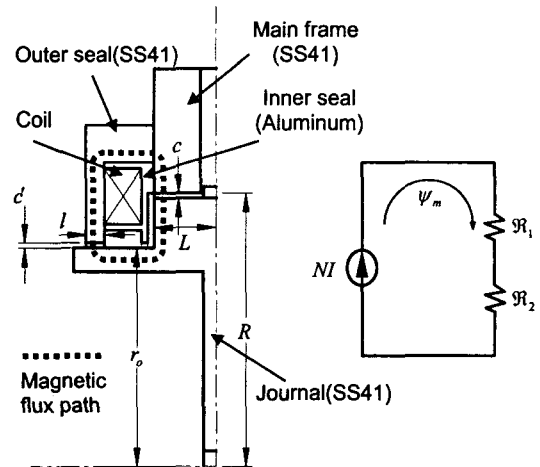


Figure.2 Magnetic circuit analysis of MR-SFD

Figure 2에 나타난 자기회로해석에서는 공극에서만 자기저항이 나타난다고 보았다. 이것은 MR-SFD의 주재료인 SS41의 상대투자율이 893으로 매우 크기 때문이다. Table 1에는 제작된 MR-SFD의 주요 설계사양이 나타나 있다.

Table.1 Specifications of MR-SFD

Clearance, c	0.8mm
Clearance, c'	0.8mm
Width of outer seal, l	3mm
Bearing length, L	8mm
Coil turn, N	72 turns
Inner radius of outer seal, r_o	36mm
Housing radius, R	44mm
Permeability of air, μ_0	$4\pi \times 10^{-7} H/m$

MR-SFD에 자기장을 인가하였을 때, 만약 저어널(journal)이 편심을 일으키게 되면 Figure 2의 자기회로에서 자기저항이 발생하는 부분 중에서 거리가 좁아진 쪽의 공극에서는 저어널을 하우징쪽으로 당기는 자기력이 커지게 된다. 이러한 현상이 부강성 효과이다. 이와 같이 전자석에 전류를 입력함으로써 자기장을 인가하였을 경우에 공극에

서 발생하는 자기력은 다음 식을 통해 예측될 수 있다.

$$F_m = -\frac{B^2 A}{2\mu_0} \quad (1)$$

MR-SFD의 경우에는 Figure 2에 나타난 바와 같이 중심면을 기준으로 양쪽이 대칭인 형태를 가지고 있다. 또한 자기선속에 대한 관계식을 이용하면 자기력에 대한 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_m = -\frac{\psi_m^2}{\mu_0 A} \quad (2)$$

MR-SFD에서 원주방향의 미소요소 $d\theta$ 에 대해서 자기선속을 구하면 다음 관계식으로 표현될 수 있다.

$$d\psi_m = \frac{NI}{d\mathcal{R}_1 + d\mathcal{R}_2} \quad (3)$$

이 식에서 MR-SFD의 제어널이 중심에서 편심을 일으켰을 때, 각 공극부에서 나타나는 자기저항은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d\mathcal{R}_1 = \frac{g_1}{\mu_0 A_1} = \frac{c(1+\varepsilon \cos\theta)}{\mu_0 RL \cdot d\theta} \quad (4-a)$$

$$d\mathcal{R}_2 = \frac{g_2}{\mu_0 A_2} = \frac{c'(1+\varepsilon \cos\theta)}{\mu_0 r_o l \cdot d\theta} \quad (4-b)$$

자기저항에 대한 관계식들을 자기선속에 대한 관계식 (3)에 대입하면 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} d\psi_m &= \frac{NI}{\frac{c(1+\varepsilon \cos\theta)}{\mu_0 RL \cdot d\theta} + \frac{c'(1+\varepsilon \cos\theta)}{\mu_0 r_o l \cdot d\theta}} \\ &= \frac{NI \mu_0 RL r_o l}{(1+\varepsilon \cos\theta)(c r_o l + c' RL)} d\theta \end{aligned} \quad (5)$$

위 식을 앞에서 소개한 자기력 관계식 (2)에 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dF_{m1} = -\frac{N^2 I^2 \mu_0 RL r_o^2 l^2}{(1+\varepsilon \cos\theta)^2 (c r_o l + c' RL)^2} d\theta \quad (6-a)$$

$$dF_{m2} = -\frac{N^2 I^2 \mu_0 R^2 l^2 r_o l}{(1+\varepsilon \cos\theta)^2 (c r_o l + c' RL)^2} d\theta \quad (6-b)$$

위와 같은 과정을 얻은 식들을 통해서 MR-SFD의 제어널이 편심되었을 때 발생하는 자기력을 다음과 같은 적분과정을 통해서 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} F_m &= \int_0^{2\pi} \cos\theta \cdot dF_{m1} + \int_0^{2\pi} \cos\theta \cdot dF_{m2} \\ &= -4\mu_0 \left(\frac{NRLr_o l}{c r_o l + c' RL} \right)^2 \left(\frac{1}{RL} + \frac{1}{r_o l} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\times \frac{\varepsilon \left\{ \tanh^{-1} \left(\frac{\varepsilon+1}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \right) - \tanh^{-1} \left(\frac{\varepsilon-1}{\sqrt{\varepsilon^2-1}} \right) \right\}}{(\varepsilon^2-1)^{3/2}}$$

이와 같은 과정을 통해서 정리된 자기력의 특징은 편심율이 0.5이하에서는 자기력이 선형적으로 증

가하지만, 편심율이 더 커지게 되면 비선형적으로 급격히 증가하게 된다는 것이다. 이것은 물리적으로 자성을 띄는 두 개의 물체가 가까이 접근할수록 자기력이 비선형적으로 증가하는 것으로 설명될 수 있다.

3.2 MR-SFD를 이용한 부강성 효과의 측정

앞에서 이론적으로 해석한 MR-SFD의 부강성 효과에 대한 결과를 실험적으로 규명하기 위해서 Figure 3에 보이는 바와 같은 실험장치를 구성하고 다양한 조건하에서 측정되는 자기력을 해석하였다.

먼저 MR-SFD의 제어널을 편심시키기 위해서 이 부분을 자기베어링의 축에 연결시켰다. 자기베어링은 DSP를 이용하여 수직 및 수평방향의 운동뿐만 아니라 선회운동을 할 수 있도록 제어된다. 자기베어링에는 변위센서를 비롯한 각종 측정용 센서들이 내장되어 있어서 추가적인 센서 설치가 필요하지 않다는 장점이 있다. 실험에서는 조화함수(harmonic function)를 이용하여 가진을 실시하였으며, 가진상황에서는 장착된 변위센서의 출력값들을 모니터링하여 자기베어링의 전체 축이 평행운동을 하도록 가중치를 조정하였다. 제어널의 가진을 통해 MR-SFD에서 형성되는 자기력은 Kistler社의 3축하중계(3-component tool dynamometer)를 이용하여 측정된 후에 축의 변위값과 함께 DSP가 장착된 PC로 저장되게 된다.

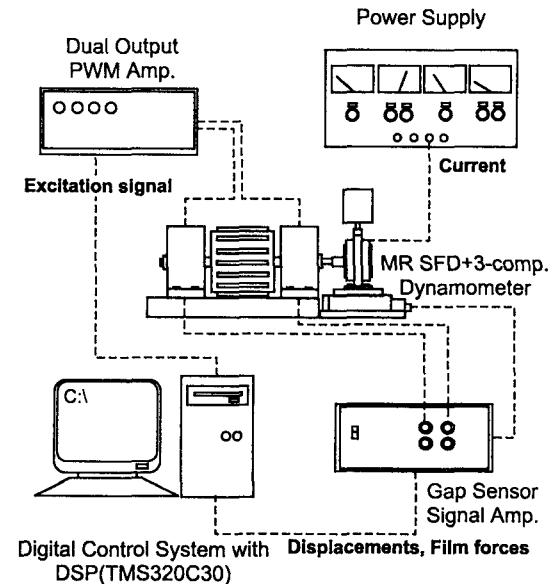


Figure.3 Schematic diagram of experimental setup

실제 실험에서는 여러가지 잡음신호가 측정결과에 포함될 수 있으므로, 자기력과 변위신호의 크기를 결정하기 위해서 조화가진 실험을 통해 측정된 신호를 시간영역에서 최소 자승 오차법(least

square error method)을 사용하여 조화함수로 근사화 하였다.⁽⁶⁾ 이 방법은 외란이 포함된 신호에 대한 해석 등에서 나타나는 스펙트럼 누설(leakage)과 같은 손실이 일어나지 않는다는 장점이 있다. 예를 들어서 실험에서 측정된 수직방향 변위 $y(t)$ 에 대해서 진폭과 위상을 알고자 한다면 다음 식과 같이 $\hat{y}(t)$ 로 근사화시킬 수 있다.

$$\hat{y}(t) = Y \sin(\omega t + \phi) = Y \cos \phi \sin \omega t + Y \sin \phi \cos \omega t \quad (8)$$

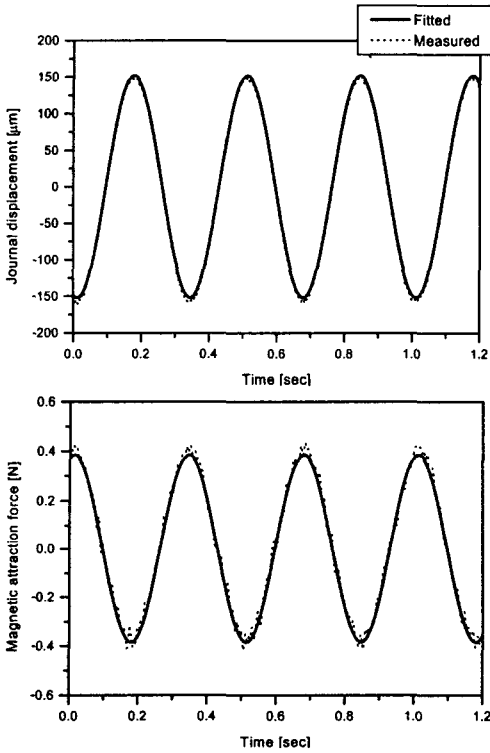


Figure.4 Measured signals vs. fitted signals with least square error method

식 (8)에서 가진주파수 ω 는 이미 알고 있는 값이므로 미지수는 진폭 Y 와 위상 ϕ 가 된다. 이 미지수의 값을 구하기 위해서 다음과 같은 최소 자승 오차법을 적용하게 된다.

$$\begin{bmatrix} \sin \omega t \cdot \sin \omega t & \cos \omega t \cdot \sin \omega t \\ \sin \omega t \cdot \cos \omega t & \cos \omega t \cdot \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y \cos \phi \\ Y \sin \phi \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} y(t) \cdot \sin \omega t \\ y(t) \cdot \cos \omega t \end{Bmatrix} \quad (9)$$

따라서 진폭과 위상은 다음 식을 이용해서 구할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} Y \cos \phi \\ Y \sin \phi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \omega t \cdot \sin \omega t & \cos \omega t \cdot \sin \omega t \\ \sin \omega t \cdot \cos \omega t & \cos \omega t \cdot \cos \omega t \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{Bmatrix} y(t) \cdot \sin \omega t \\ y(t) \cdot \cos \omega t \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Figure 4에는 3Hz의 수직방향 가진신호에 대해서 측정된 저어널의 변위와 자기력 신호를 최소 자승 오차법을 사용하여 근사화시킨 결과가 나타나 있다. 결과를 보면 수직방향의 가진상황에서 변위에 대한 측정값과 근사화된 값이 매우 잘 맞고 있는 것을 알 수 있다. 또한 가진에 의해 생겨난 자기력의 측정결과 역시 근사화된 값과 잘 맞고 있다.

이와 같은 실험방법과 해석방법을 사용하여 측정된 결과를 정리해 보았다. 먼저 Figure 5에는 저어널이 여러가지 크기의 진폭으로 가진될 때 측정되는 자기력과 이론에 의해 예측된 값을 비교한 결과가 나타나 있다.

그림에서 알 수 있듯이, 앞에서 유도된 이론식을 바탕으로 한 예측값이 저어널이 여러 가진크기로 운동할 때 측정된 자기력을 정확하게 예측하고 있다. 또한 실험영역에서 MR-SFD의 저어널이 가진되는 크기에 대해서 자기력이 선형적인 특징을 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 앞에서 예측한 바와 같이 저어널의 편심율이 0.5를 넘지 않기 때문이다. 따라서 이 실험에서처럼 저어널의 변위가 전체 공극 c 의 50%내에서 일어난다고 가정하면, 다음과 같이 선형식으로 근사화시킬 수 있다.

$$F_m \approx -6.38 \mu_0 \left(\frac{NIRr_o l}{cr_o l + c'RL} \right)^2 \left(\frac{1}{RL} + \frac{1}{r_o l} \right) \cdot \frac{e}{c} \quad (11)$$

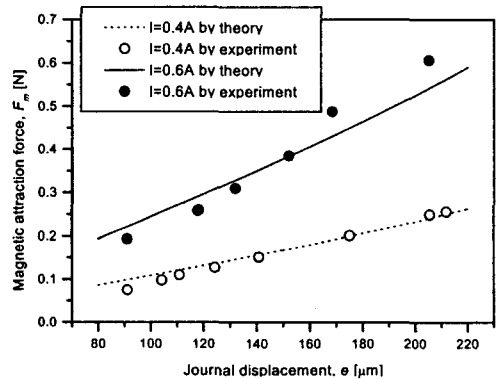


Figure.5 Magnetic attraction forces vs. journal displacements

또한 실험을 통해 저어널이 여러 가진 주파수로 가진될 때 자기력의 변화를 관찰하였다. Figure 6에는 여러 가진 주파수에 대해서 측정된 부강성 효과의 크기와 위상이 각각 나타나 있다. 실험결과를 보면 부강성의 크기가 주파수가 증가할수록 감

소하고 있으나, 위상차는 변함이 없다는 것을 알 수 있다. 이처럼 주파수가 증가할수록 부강성 효과의 크기가 감소하는 것은 여러가지 손실(loss)에 기인한 것으로서, MR-SFD에 자기장을 인가하였을 때 발생하는 와전류(eddy current) 효과에 의한 손실이 대부분을 차지하고 있을 것으로 판단된다. 와전류 효과는 입력전류와 자기선속 사이에 발생하는 손실로써, 와전류 효과에 의한 손실이 가장 큰 비중을 차지할 것으로 판단하는 이유는 MR-SFD의 구조상 와전류 발생을 막기위한 적층구조(lamination)를 사용하지 못하였기 때문이다.

와전류 손실의 크기를 측정하기 위해서는 실제 자기장 형성을 위해 입력된 전류값과 발생하는 자기선속의 크기를 측정하여 그 관계식을 얻는 것이 필요하지만, 본 연구에서는 부강성 효과와 관련된 전체적인 손실에 초점을 두고 있으므로 정확한 모형화 작업은 향후 과제로 남겨두고자 한다.

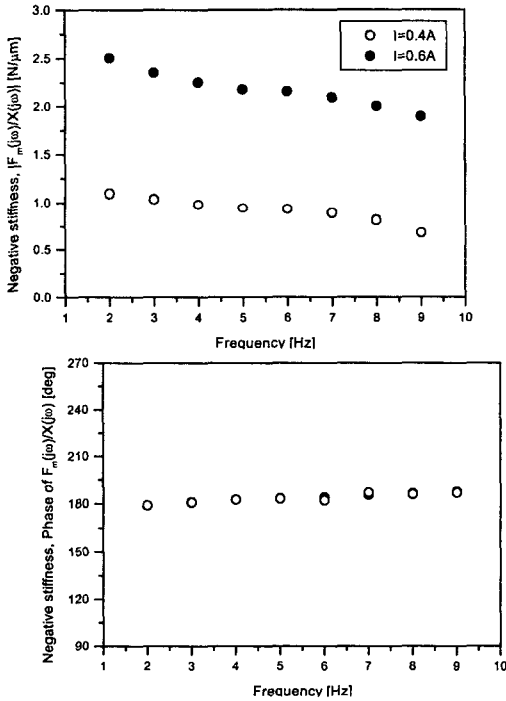


Figure.6 Magnitude and phase of negative stiffness effect with loss

따라서 실험결과와 이론식을 바탕으로 주파수 영역에 대해서 부강성 효과와 관련된 전달함수를 다음과 같이 모형화할 수 있다.⁽⁷⁾⁽⁸⁾

$$\frac{F_m(j\omega)}{X(j\omega)} = K_{NS} \cdot G_L(j\omega) \quad (12)$$

이 식에서,

$$G_L(j\omega) = \frac{1 - 1.08 \times 10^{-5} \cdot \omega^2}{1 - 3.9 \times 10^{-6} \cdot \omega^2 + 3.01 \times 10^{-8} \cdot \omega^4}$$

$$K_{NS} = -6.38 \mu_0 \left(\frac{NIRLr_0 l}{cr_0 l + c'RL} \right)^2 \left(\frac{1}{RL} + \frac{1}{r_0 l} \right) \cdot \frac{1}{c}$$

의 값을 가진다. Figure 7에는 식 (12)로 모형화된 전달함수를 이용한 예측치와 실험값이 함께 나타나 있다. 결과를 비교해 보면 모형화된 전달함수가 실험결과를 비교적 정확하게 예측하고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 제안된 모형을 이용해 주파수나 전류가 변화할 때 부강성 효과를 정확하게 예측할 수 있다.

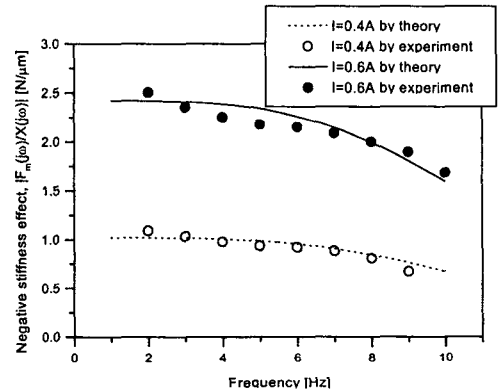


Figure.7 Negative stiffness effect vs. excitation frequency

4. MR-SFD의 안정성에 대한 해석

지금까지 설명된 바와 같이 MR-SFD에 대한 실험에서 저주파수 영역의 비선형 효과는 자기장의 인가에 의한 부강성 효과에 의한 것임을 알 수 있었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 하여 MR-SFD에서 나타나는 부강성 효과가 전체 시스템의 안정성에 어떠한 영향을 주는지 간단하게 검토할 수 있다. Figure 8에는 선행된 연구에서 MR-SFD에 자기장을 인가했을 때 측정되는 힘 중에서 변위와 동기된 성분에 대한 모형과 부강성 효과에 대한 모형을 이용한 예측결과가 나타나 있다. MR-SFD의 유막력 중에서 변위와 동기된 성분에 대한 모형이 식 (13)에 나타나 있다.

$$D_r(\omega) = k_0(I) + k_1(I) \cdot \omega^2 \quad (13)$$

이 식에서

$$k_0(I) = 2.03 \times I$$

$$k_1(I) = (0.439 + 1.923 \times I) \times 10^{-5}$$

의 값을 가진다.

그림을 통해 시스템의 안정성을 해치는 부강성 효과의 크기가 MR-SFD의 유막에서 발생하는 힘보다 작기 때문에 MR-SFD의 운전영역에서 시스

램의 안정성을 보장할 수 있게 된다. 또한 실제 시스템에서는 실험조건과 달리 회전체 자체에 존재하는 굽힘강성(flexural rigidity)에 의해 안정성은 더욱 향상될 수 있을 것으로 판단된다.

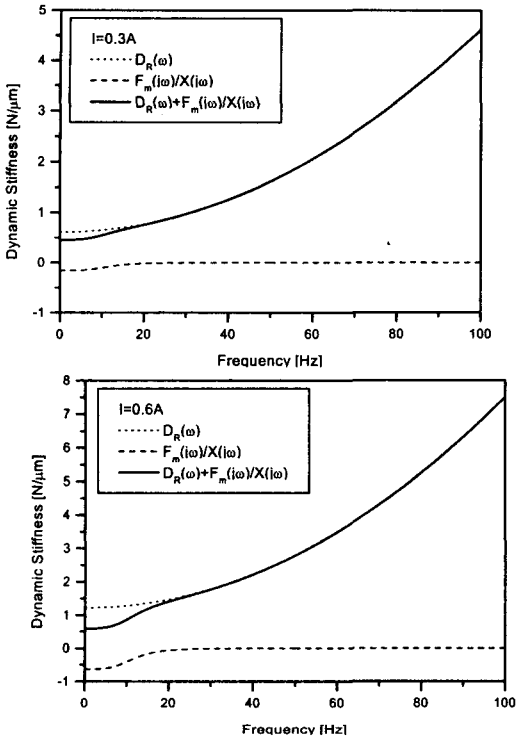


Figure.8 Comparisons of negative stiffness effects with dynamic stiffness of MR-SFD

그러나, MR유체의 스퀴즈 모드를 이용한 기계 장치에서 저주파수 영역에서 나타나는 부강성 효과가 만약 시스템의 안정성을 저해하는 것으로 판단된다면, 지지 스프링(retainer spring)과 같이 추가적인 강성을 부여할 수 있는 장치의 설계를 통하여 시스템의 안정성을 보장할 수 있는 설계절차가 반드시 수반되어야만 한다.

5. 결 론

본 논문에서는 MR-SFD의 모형화에서 나타나는 비선형 효과를 이론적, 실험적인 방법에 의해 규명하였다. 먼저 선행 연구의 결과중 저주파수 영역에서 발생하는 비선형 효과가 자기장의 인가에 의한 부강성 효과라고 판단하고, 자기회로에 대한 해석을 통해 이에 대한 이론적 모형을 수립하였다. 또한 이론적 접근방법에 의한 예측치의 타당성을 검증하기 위해서 자기베어링을 이용한 가진장치를 구성하고, 이를 이용하여 MR-SFD의 가진으로 발생하는 자기력을 측정하였다. 실험을 통해 측정된

결과와 이론에 의해 예측된 결과를 비교함으로써 앞에서 언급한 비선형 효과가 부강성 효과에 의한 것임을 규명하였다. 또한 동강성 모형의 비교를 통해 부강성 효과가 저주파수 영역에서 MR-SFD를 불안정하게 하지 못함을 확인할 수 있었다. 이와 같은 연구결과를 통해 MR유체를 작동유체로 이용하는 장치의 설계에서 부강성 효과를 고려한 설계절차가 반드시 수반되어야만 한다는 것을 확인할 수 있었다.

향후에는 MR유체의 스퀴즈 모드를 이용한 기계 장치의 설계에 필요한 부강성 효과의 설계 및 제거 방법에 대한 연구를 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 : KOSEF 97-0200-07-01-3)에 의해 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, C.W., 1993, *Vibration Analysis of Rotors*, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- (2) Morishita, S., and Mitsui, J., 1992, "Controllable Squeeze Film Damper: An Application of Electro-Rheological Fluid", *Journal of Vibration and Acoustics*, ASME, Vol.114, pp.257~262.
- (3) Kim, C.H., Lee, N.S., and Lee, Y.B., 1998, "Vibration Control of a Pressurized, Sealed, Electro-Rheological Fluid Squeeze Film Damper Supported Rotor", ISROMAC, Hawaii.
- (4) Kim, K.J., Kim, J.H., and Lee, C.W., 2000, "Modeling of Magneto-rheological Fluid Based Squeeze Film Damper with Frequency-dependent Parameters", *KSME Dynamics and Control Division Conference*, pp.237~242.
- (5) Kraus, J.D., 1992, *Electromagnetics*, McGraw-Hill, Inc.
- (6) Hoffman, J.D., 1994, *Numerical Methods for Engineers and Scientists*, McGraw-Hill, Inc.
- (7) Kim, C.S., 1995, "Dynamic Analysis and Isotropic Optimal Control of Active Magnetic Bearing System", Ph.D. Dissertation, Korea Advanced Institute of Science and Technology.
- (8) Kim, Chaesil et al., 1994, "Eddy Current Effects on the Stability of an Active Magnetic Bearing Levitated Rotor", *Active Control of Vibration and Noise*, ASME, Vol.75, pp.421~440.