

# 자기유변유체를 이용한 반능동형 스퀴즈 필름 댐퍼의 해석 및 회전체 불균형 응답 제어

## Analysis of Magneto-rheological Fluid based Semi-active Squeeze Film Damper and Its Application to Unbalance Response Control of Rotor

김근주\*.이종원\*\*

Keun-Joo Kim and Chong-Won Lee

**Key Words:** Magneto-rheological Fluid (자기유변유체), Squeeze Film Damper (스퀴즈 필름 댐퍼), Structural Dynamics Modification Method (구조변경법), Unbalance Response Control (불균형 응답 제어)

### ABSTRACT

Squeeze film dampers (SFDs) have been commonly used to effectively enhance the dynamic behavior of the rotating shaft supported by rolling element bearings. However, due to the recent trends of high operating speed, high load capacity and light weight in rotating machinery, it is becoming increasingly important to change the dynamic characteristics of rotating machines in operation so that the excessive vibrations, which may occur particularly when passing through critical speeds or unstable regions, can be avoided. Semi-active type SFDs using magneto-rheological fluid (MR fluid), which responds to an applied magnetic field with a change in rheological behavior, are introduced in order to find its applications to rotating machinery as an effective device attenuating unbalance responses. In this paper, a semi-active SFD using MR fluid is designed, tested and identified by means of linear analysis to investigate the capability of changing its dynamic properties such as damping and stiffness. Furthermore, the proposed device is applied to a rotor system to investigate its potential capability for vibration attenuation: an efficient method for selecting the optimal location of the proposed damper is introduced and control algorithm that could improve the unbalance response properties of a flexible rotor is also proposed.

### 1. 서론

스퀴즈 필름 댐퍼는 기존의 구름 베어링(rolling element)이나 저어널 베어링(journal bearing)이 가지는 단점을 보완하여 진동문제를 해결함으로써, 회전체 시스템의 안정성(stability)을 향상시키기 위하여 사용되고 있다. 기존의 수동형(passive) 스퀴즈 필름 댐퍼는 주로 첫번째 연성모드(flexural mode)에 의한 불균형 응답에서 최적의 감쇠(damping)를 나타내도록 설계되었다. 그러나, 최근의 회전체는 고용량화의 일환으로 고속에서 운전되며, 또한 경량화를 위하여 연성 회전축을 사용하는 것이 일반적이다. 이에 따라서, 운전영역 내에 다수의 위험속도(critical speed) 구간이 나타나게 되지만, 수동형 스퀴즈 필름 댐퍼로 과도 응답을 억제하는 것은 사실상 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 능동형(active) 혹은 반능동형(semi-active) 스퀴즈 필름 댐퍼에 대한 연구가 진행되고 있다. 특히, 가제어성 유체(controllable fluid)로 기존 윤활유를 대체한 반능동형 스퀴즈 필름 댐퍼에 대한 연구가 비교적 활발한 편이다.<sup>(1-3)</sup>

Morishita 등<sup>(1)</sup>은 전기유변유체(electro-rheological fluid, 이하 ER유체)를 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼(이하 ER-SFD라 칭함)를 제안하였으며, 이를 회전체의 진동제어에 응용하였다.

또한, Jung<sup>(2)</sup>은 무한 소폭의 ER-SFD에 대한 이론해를 수정된 레이놀즈 방정식(Reynolds equation)을 통하여 얻고자 하였다. Lee 등<sup>(3)</sup>은 실링(sealing)이 장착된 ER-SFD를 회전체 진동제어에 적용한 연구를 발표하였다. 그러나, 이러한 연구들에도 불구하고 ER-SFD에 대한 연구는 ER유체가 불순물(impurities)에 민감하고, 동작을 위하여 고전압 공급장치 등 복잡한 부속장치가 필요하다는 단점 때문에 학문적인 연구에 머물러 있는 형편이다. 반면에, 자기유변유체(magneto-rheological fluid, 이하 MR유체)는 이와 같은 문제점들을 해결하여, MR유체를 이용한 반능동형 스퀴즈 필름 댐퍼의 개발이 최근 시도되고 있다.

본 연구에서는 MR유체를 이용한 스퀴즈 필름 댐퍼(이하 MR-SFD라 칭함)를 설계 및 제작하고, 그 동특성을 실험적으로 규명하고자 하였다. MR-SFD에 대한 설계에서는 자기장 해석을 통해 재료의 자기포화(magnetic saturation) 현상을 검증하고자 하였으며, MR-SFD에 대한 실용적인 설계를 위하여 벨로우즈(bellows) 형태의 실링을 제안하였다. 설계된 MR-SFD를 제작하고 능동 자기 베어링(active magnetic bearing)을 가진기로 이용한 실험장치를 이용하여 다양한 조건하에서 실험을 수행하고 실험적인 동특성 모형을 도출하였다. 또한, 제안된 MR-SFD의 진동제어 성능을 살펴보고자 이를 회전체 모형에 적용하였다. 효과적인 제어를 위하여 MR-SFD의 최적 설치위치를 구조변경법(structural dynamics modification method)을 통해 결정하고, 제어입력을 설계하여 불균형 응답 제어에

\* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과 대학원  
E-mail: gjkim@novic.kaist.ac.kr

\*\* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

적용하였다.

## 2. MR-SFD의 설계

### 2.1 자기장 해석

MR유체를 작동유체로 사용하는 반능동 제어장치의 최대 제어력은 재료의 자기포화 현상에 의해 제한된다.<sup>(4)</sup> 따라서, 이러한 제어장치의 설계시 구성요소의 자기포화를 설계단계에서 고려해야만 한다. 본 연구에서 제안된 MR-SFD에 대한 설계에서는 Fig.1에 나타난 것과 같이 대부분의 부품에 SS41 재료를 사용하였다.

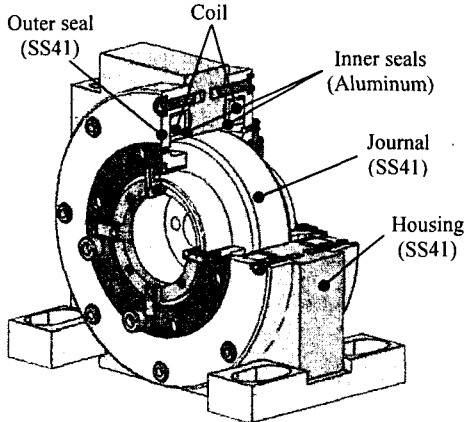


Fig.1 The proposed MR-SFD

SS41은 입력 전류 대 자속밀도의 값이 비교적 우수한 재료로 알려져 있다. SS41의 자기특성을 고려할 때, 재료의 자기포화를 방지하기 위해서는 자속밀도,  $B$ 는 1.4 Tesla를 넘지않도록 해야 한다.

Table 1에는 작동유체인 MR유체의 재원이 나열되어 있다. 특히, 본 연구에서 작동유체로 사용된 MR유체는 MR-SFD의 제어영역을 최대화하기 위하여 초기점도값이 비교적 낮은 유체를 선정하였다.

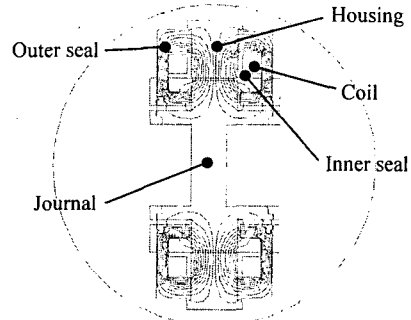
Table 1 Properties of MRF-122-2ED

Properties	Value/Limits
Base fluid	Hydrocarbon
Viscosity (calculated for slope between 800 1/sec and 500 1/sec at 40°C)	0.07 ( $\pm 0.02$ ) Pa-sec

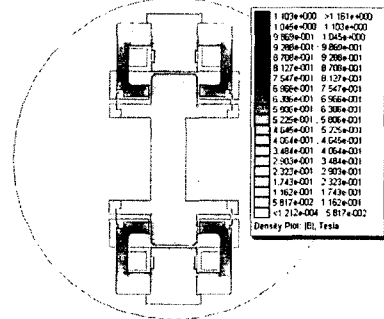
Fig.1에는 설계된 MR-SFD의 단면도가 나타나 있다. 본 연구에서는 MR-SFD의 제어영역을 넓히기 위하여 비교적 큰 값의 반경방향 공극(radial clearance) (0.8 mm)과 실링 간극 (10.0 mm)을 적용하였다.

등가자기회로(equivalent magnetic circuit) 해석을 통하여 MR-SFD 주요부분의 설계치를 결정하고, 자기장에 대한 FEM(Finite Element Method) 해석을 통하여 그 타당성을 검증하였다.<sup>(5)</sup> Fig.2에는 코일

(coil)부에 2 A의 입력전류를 인가하였을 때, FEM 해석을 통해 얻어진 MR-SFD의 자속경로(magnetic flux path)와 자속밀도 분포도가 나타나 있다. 특히, 자속밀도의 크기가 SS41의 자기포화가 일어나는 1.4 Tesla보다 낮은 값으로 유지됨을 확인할 수 있다. 따라서 설계된 MR-SFD의 타당성을 보여주고 있다.



(a) Contours of magnetic flux



(b) Distribution of magnetic flux density

Fig.2 Analysis of magnetic properties for the MR-SFD

### 2.2 실링부의 설계

작동유체인 MR유체는 실리콘 오일(silicone oil) 등에 자성을 띄는 철입자를 분산시킨 것이므로, 기계구조물에 적용시 철입자에 의한 마모가 발생할 수 있다. 따라서, 일반적인 유체순환 시스템을 적용하기 곤란하므로, MR-SFD 설계시에 적절한 실링을 고려해야 한다. MR-SFD에 사용될 실링 설계시 고려되어야 할 사항들은 다음과 같다.

- 유체에 대한 밀봉(tightness) 성능
- 실링 자체의 동특성은 무시할 정도여야 한다.

요구조건 중 두 번째 사항은 실링에 의해 MR-SFD 제어영역이 좁아지는 것을 방지하기 위해 제시된 것이다.

본 연구에서는 Fig.3과 같은 벨로우즈 형태의 실리콘 실링을 설계하고, 이를 MR-SFD에 장착하였다. 벨로우즈 형태의 실링에 의해 나타나는 동적 특성을 파악하기 위하여, 작동유체가 없는 상태에서 저어널의 운동에 의해 발생하는 힘을 측정하였다. 저어널의 변위가 30  $\mu\text{m}$ 로 유지되는 조건에서 벨로우즈 형태의 실링에 의해 발생하는 힘은

1 N 정도로, 일반적인 O링(O-ring)을 장착한 경우에 비해 2.5% 정도로 매우 작았다. 따라서 제안된 벨로우즈 형태의 실링은 유체에 대한 밀봉을 유지하면서도 MR-SFD에 대한 제어영역에 영향을 거의 미치지 않는다는 것을 확인하였다.

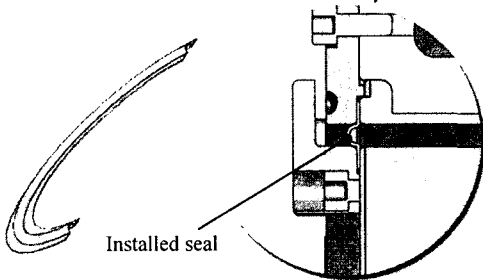


Fig.3 Bellows-shaped seal and its installation

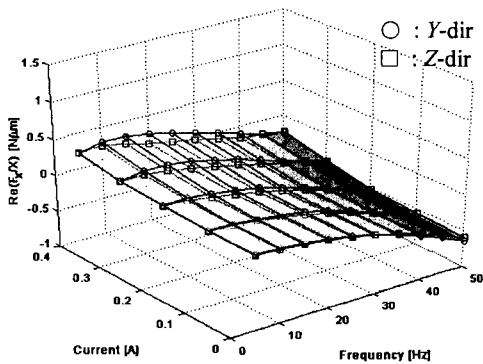
### 3. MR-SFD의 모형화

MR-SFD의 동특성을 실험적인 방법을 통하여 모형화하기 위하여, 제작된 MR-SFD를 자기 베어링을 가진기로 적용한 실험장치에 부착하고 다양한 조건에서 유막력 측정실험을 수행하였다.<sup>(6)</sup> Fig.4에는 측정된 동강성(dynamic stiffness)의 실수값과 허수값을 각각 도시하였다. 이와 같은 거동을 나타내기 위하여 다음 식과 같은 동강성 모형을 적용하였다.

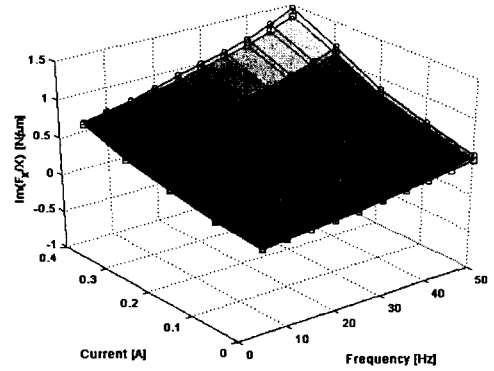
$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(F_x / X) &= K(I) - M(I)\omega^2 \\ &= k_0 + k_1 \cdot I + k_2 \cdot I^2 - (m_0 + m_1 \cdot I)\omega^2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(F_x / X) &= \Gamma(I) + C(I)\omega \\ &= \gamma_0 + \gamma_1 \cdot I + \gamma_2 \cdot I^2 + (c_0 + c_1 \cdot I)\omega \end{aligned} \quad (2)$$

동강성 모형에서 복소강성(complex stiffness)  $K(I)$ 와  $\Gamma(I)$ 는 입력전류  $I$ 에 대한 2차항으로 모형화하였다. 이는 복소강성효과가 MR유체에 작용하는 자기력과 전단응력(shear stress)에 의한 것임에 기인하였다. 즉, 자기장에 의해 형성되는 자기력은 전류의 제곱에 비례하고, 전단응력은 자기밀도  $B$ 와 비례 관계에 있다는 것을 뜻한다.



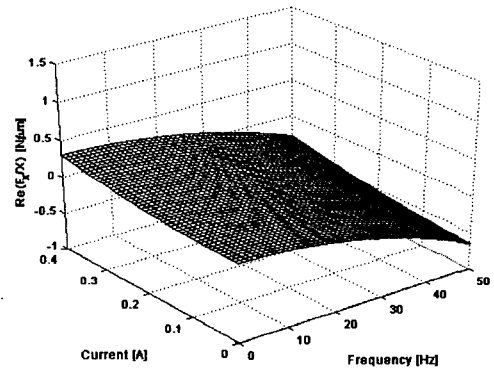
(a) Real parts



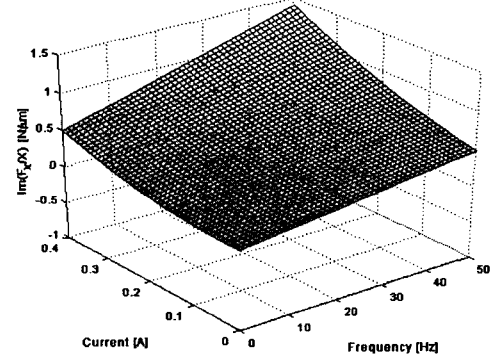
(b) Imaginary parts

Fig.4 Measured dynamic stiffness of the MR-SFD

한편, 관성효과  $M(I)$ 와 감쇠계수  $C(I)$ 는 자기밀도와 선형관계에 있다고 가정하고 전류에 대한 1차 식으로 나타내었다.



(a) Real part



(b) Imaginary part

Fig.5 Estimated dynamic stiffness of the MR-SFD

식 (1)과 (2)에서 모형화된 동강성에 대하여 각각의 계수값을 찾기 위하여 Fig.4에 나타낸 측정결과에 최소자승오차법(least square error method)을 적용하였다. 근사화를 통하여 얻어진 동강성 모형식을 이용해 동강성값을 재현한 결과가 Fig.5에 나타나 있다.

## 4. 불균형 응답 제어

### 4.1 운동방정식

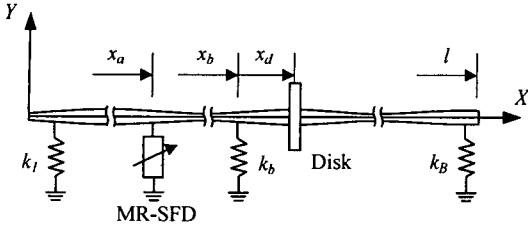


Fig.6 Configuration of a flexible rotor-bearing system

회전체의 질량 불균형에 의한 운동방정식을 얻기 위하여 Fig.6에 나타난 것과 같이,  $D$ 개의 디스크,  $B$ 개의 베어링, 그리고 제안된 MR-SFD로 구성된 등방성(isotropic)의 연성회전체를 고려하였다.<sup>(7)</sup>

$X$ - $Y$  평면과  $X$ - $Z$  평면에서 정의된 축의 변위  $y$ 와  $z$ 를 복소좌표계에 대해서 정의하면 다음과 같다.

$$w = y + jz \quad (3)$$

이와 마찬가지로, 축방향에 대한 질량 불균형량  $a(x)$ 도 복소좌표계에서 나타낼 수 있다.

$$a = a_r + ja_i \quad (4)$$

등방성의 회전체 시스템이 가지는 특징에 의해  $Y$ 와  $Z$ 방향에 대한 운동방정식은 동일한 형태를 가지므로, 식 (3)과 (4)에서 정의된 표현식을 대입하면 회전체계의 운동방정식은 다음과 같다.

$$A\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial t^2} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (J-l) \frac{\partial w}{\partial x} \right\} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left\{ EI_s \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right\} + \sum_{b=1}^B k_b \cdot w \cdot \delta(x-x_b) + k_a \cdot w \cdot \delta(x-x_a) = a\Omega^2 e^{j\Omega t} \quad (5)$$

여기서,

$$A\rho = A\rho_s(x) + \sum_{d=1}^D m_d \cdot \delta(x-x_d) + m_a \cdot \delta(x-x_a)$$

$$(I-J) = [I(x) - J(x)]_s + \sum_{d=1}^D (I-J)_d \cdot \delta(x-x_d)$$

와 같으며,  $A$ 는 회전축의 단면적,  $\rho$ 는 축의 밀도를 각각 의미한다. 주어진 운동방정식 (5)에 대해서 MR-SFD의 효과를 제외한 회전체계에 대한 운동방정식을 해석하면 모드함수(characteristic function)  $\phi_r(x)$  ( $r=1, 2, \dots$ )와 고유진동수(natural frequency)  $\omega_r$  ( $r=1, 2, \dots$ )를 얻을 수 있다. 이 때, 유도된 모드함수와 고유진동수는 다음과 같은 직교조건(orthogonality condition)을 만족하게 된다.

$$\int_0^l \{ A\rho_s \phi_r(x) \phi_q(x) + (I-J)_s \phi'_r(x) \phi'_q(x) \} dx + \sum_{d=1}^D \{ m_d \phi_r(x_d) \phi_q(x_d) + (I-J)_d \phi'_r(x_d) \phi'_q(x_d) \} = H\delta_{pq} \quad (6a)$$

$$\int_0^l \{ EI_s \phi_r''(x) \phi_q''(x) dx + \sum_{b=1}^B k_b \phi_r(x_b) \phi_q(x_b) \} = \omega_p^2 H\delta_{pq} \quad (6b)$$

이 식에서,  $H$ 는 상수이며,  $\delta_{pq}$ 는 Kronecker delta를

나타낸다.

회전축의 변위  $w(x,t)$ 를 다음과 같이 확장하면,

$$w(x,t) = \sum_{p=1}^{\infty} \eta_p(t) \phi_p(x) \quad (7)$$

와 같다. 식 (7)을 운동방정식 (5)에 대입하고 양변에  $\phi_q(x)$ 를 곱한 후, 축방향  $x$ 에 대해서 적분을 수행하면 직교조건 (6a)와 (6b)에 따라 다음과 같은 식으로 정리된다.

$$\sum_{p=1}^{\infty} \left\{ \delta_{pq} + \frac{m_a}{H} \phi_p(x_a) \phi_q(x_a) \right\} \ddot{\eta}_p + \omega_p^2 \eta_p + \sum_{p=1}^{\infty} \left\{ \frac{k_a}{H} \phi_p(x_a) \phi_q(x_a) \right\} \eta_p = a_q \Omega^2 e^{j\Omega t}, \quad q=1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

이 식에서,

$$a_q = \frac{1}{H} \int_0^l a(x) \phi_q(x) dx$$

를 의미하고,  $l$ 은 전체 축의 길이를 나타낸다. 만약 회전체의  $n$ 번째 모드 이하에만 관심을 둔다면 식 (8)을 다음과 같이 행렬형태로 정리할 수 있다.

$$[\mathbf{I} + [\Delta\mathbf{M}]] \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \{[\omega^2] + [\Delta\mathbf{K}]\} \boldsymbol{\eta} = \Omega^2 \mathbf{a} e^{j\Omega t} \quad (9)$$

이 식에서,  $[\mathbf{I}]$ 는 항등행렬(identity matrix)이며,

$$[\Delta\mathbf{M}] = [\Delta m_{pq}]; \Delta m_{pq} = \frac{m_a}{H} \phi_p(x_a) \phi_q(x_a)$$

$$[\Delta\mathbf{K}] = [\Delta k_{pq}]; \Delta k_{pq} = \frac{k_a}{H} \phi_p(x_a) \phi_q(x_a)$$

$$\boldsymbol{\eta} = \{\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n\}^T$$

$$\mathbf{a} = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}^T$$

로 각각 정의된다. 식 (9)를 살펴보면 MR-SFD에 의한 전체 동특성의 변화  $[\Delta\mathbf{M}]$ 과  $[\Delta\mathbf{K}]$ 가 수정전의 회전체 시스템에 대한 모드정보로 표현되고 있다.

### 4.2 구조변경법

구조변경법은 질량이나 강성의 추가에 의한 구조물의 동특성 변화를 예측하기 위하여 널리 사용되는 기법이다. 특히, 구조변경법은 변경되기 전의 시스템에 대한 모드정보만으로 구조변경 후의 동특성 변화를 예측할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

MR-SFD에 의해 회전체 시스템에 추가되는 동특성 변화를 질량효과  $m_a$ 와 강성  $k_a$ 로 제한하면 변경된 모드정보는 두단계를 거쳐서 얻을 수 있다. 먼저, 첫번째 단계에서는 식 (9)에서  $[\Delta\mathbf{K}]$ 를 제거한 고유치 문제(eigenvalue problem)를 해석하게 된다. 두번째 단계에서는  $[\Delta\mathbf{K}]$ 를 다시 고려하고 고유치 문제를 풀이하면, MR-SFD 추가에 의해 변화된 모드함수와 고유진동수를 구하게 된다.

우선,  $\boldsymbol{\eta} = \boldsymbol{\zeta} e^{j\Omega t}$ 로 가정하고 이를 식 (9)의 동차식(homogeneous equation)에 대입하면

$$\{[\mathbf{I} + [\Delta\mathbf{M}]] \Omega^2 - \{[\omega^2] + [\Delta\mathbf{K}]\}\} \boldsymbol{\zeta} = \mathbf{0} \quad (10)$$

와 같다. 이 식에서  $[\Delta\mathbf{K}]$ 에 의한 효과를 제외시키

고, 다음과 같이 새로운 좌표계를 정의한다.

$$\left\{ [\mathbf{I}] + [\Delta \mathbf{M}] \right\} \Omega^{(0)2} - [\omega^2] \zeta^{(0)} = \mathbf{0} \quad (11)$$

식 (11)의 고유치 문제를 풀이하면, 고유치 (eigenvalue)  $\Omega^{(1)}$ 과 고유벡터 (eigenvector)  $\zeta^{(1)}$ 을 얻을 수 있다. 이 때, 고유벡터  $\zeta^{(1)}$ 은 다음 식을 만족하도록 한다.

$$\left[ \zeta^{(0)} \right]^T \left\{ [\mathbf{I}] + [\Delta \mathbf{M}] \right\} \left[ \zeta^{(0)} \right] = [\mathbf{I}] \quad (12)$$

첫번째 단계에서 얻어진 고유벡터를 이용하면, 수정된 모드함수를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\phi_i^{(0)}(x) = \{\phi\}^T \left\{ \zeta_i^{(0)} \right\} \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \{\phi\} &= \{\phi_1(x), \phi_2(x), \dots, \phi_n(x)\}^T \\ \left\{ \zeta_i^{(0)} \right\} &= \left\{ \zeta_{1i}^{(0)}, \zeta_{2i}^{(0)}, \dots, \zeta_{ni}^{(0)} \right\} \end{aligned}$$

를 나타낸다.

두번째 단계에서는  $[\Delta \mathbf{K}]$ 를 다시 고려하고, 첫번째 단계에서 얻어진 모드행렬을 이용하여 새로운 좌표를 정의한다.

$$\zeta = \left[ \zeta^{(0)} \right] \zeta^{(2)} \quad (14)$$

식 (14)에서 정의된 좌표계를 식 (10)에 대입하고, 양변에  $\left[ \zeta^{(0)} \right]^T$ 를 곱하면 다음과 같은 고유치 문제를 정의할 수 있다.

$$\left\{ [\mathbf{I}] \Omega^2 - \left[ \zeta^{(0)} \right]^T \left\{ [\omega^2] + [\Delta \mathbf{K}] \right\} \left[ \zeta^{(0)} \right] \right\} \zeta^{(2)} = \mathbf{0} \quad (15)$$

첫번째 단계와 마찬가지로의 방법으로 고유치 문제를 풀이하면 수정된 모드함수를 얻을 수 있다.

$$\{\Phi\}^T = \{\phi\}^T \left[ \zeta^{(0)} \right] \left[ \zeta^{(2)} \right] \quad (16)$$

여기서,

$$\{\Phi\} = \{\Phi_1(x), \Phi_2(x), \dots, \Phi_n(x)\}^T$$

를 나타내며, 이는 MR-SFD에 의한 질량과 강성효과가 추가된 전체 회전체계의 모드함수를 의미한다.

연성회전체에 대하여  $m$ 번째의 연성모드 영역까지를 고려할 경우, MR-SFD의 최적 설치위치를 선정하기 위한 성능지수(performance index)를 다음과 같이 정의하였다.

$$J \triangleq \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^D |\Phi_i(x_j)|}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^D |\phi_i(x_j)|} \quad (17)$$

식 (17)로 정의된 성능지수는 회전체의 구성요소 중 디스크에서의 모드함수값을 중요한 인자로 고려하였다. 정의된 성능지수에 근거하여 MR-SFD의 최적 설치위치는 다음 조건을 만족하도록 정의하였다.

$$x_o^* = \min_x \{ J(x_o, I) \}, \quad \forall x_o \in [0, I] \quad (18)$$

### 4.3 불균형 응답 제어

구조변경법 등을 이용하여 MR-SFD의 설치위치를 결정하였다면, 회전체의 운전속도(rotational

speed)에 따라 적절한 제어입력을 통해 회전체의 불균형 응답특성을 제어하는 것이 필요하다. MR-SFD를 장착한 연성회전체계의 운동방정식은 FEM 모형에 근거하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\Omega)\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{f}(t) - \mathbf{f}_c(t, I) \quad (19)$$

여기서,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{K}$ 는 각각 질량, 감쇠, 강성행렬을 의미한다. 또한,  $\mathbf{f}(t)$ 는 질량 불균형(mass imbalance)에 의한 힘을 나타내고,  $\mathbf{f}_c(t, I)$ 는 MR-SFD에 의한 제어력을 의미한다. 임의의 회전속도  $\Omega$ 에 대해서 식 (19)는 다음과 같이 주파수영역에 대한 형태로 정리된다.

$$\left\{ \mathbf{K} - \Omega^2 \mathbf{M} + j\Omega \mathbf{C}(\Omega) \right\} \mathbf{Q}(j\Omega) = \mathbf{F}(j\Omega) - \mathbf{F}_c(\Omega, I) \quad (20)$$

여기서,

$$\mathbf{F}_c(\Omega, I) = \left\{ \mathbf{K}^c(I) - \Omega^2 \mathbf{M}^c(I) + j\Omega \mathbf{C}^c(I) \right\} \mathbf{Q}(j\Omega)$$

를 의미한다. 식 (20)을 이용하면 불균형 응답량  $\mathbf{Q}(j\Omega)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}(j\Omega) &= \left[ \mathbf{K} + \mathbf{K}^c(I) - \Omega^2 \left\{ \mathbf{M} + \mathbf{M}^c(I) \right\} \right. \\ &\quad \left. + j\Omega \left\{ \mathbf{C} + \mathbf{C}^c(I) \right\} \right]^{-1} \mathbf{F}(j\Omega) \quad (21) \\ &= \mathbf{R}(j\Omega, I) \mathbf{F}(j\Omega) \end{aligned}$$

여기서,  $\mathbf{R}(j\Omega, I)$ 는 receptance 행렬을 나타낸다. 만약 불균형력  $\mathbf{F}(j\Omega)$ 에 대한 정보가 주어졌다면, 식 (21)을 이용하여 불균형 응답량  $\mathbf{Q}(j\Omega)$ 를 손쉽게 구할 수 있으며, 입력진류에 따른 응답량 변화를 검토하여 적절한 제어입력을 결정하는 것이 가능하다. 그러나 불균형력  $\mathbf{F}(j\Omega)$ 에 대한 정보는 운전 중인 상황에서도 변화하므로 반응동형 액추에이터(actuator)를 이용하여 이를 알아내는 것은 불가능하다. 따라서, 본 논문에서는 강건설계기법(robust design concept)을 적용하여 불균형력에 민감하지 않은 제어방법을 사용하였다. 식 (21)에서 불균형력  $\mathbf{F}(j\Omega)$ 를 입력으로 가정하고,  $\mathbf{R}(j\Omega, I) \times \mathbf{F}(j\Omega)$ 를 출력으로 가정하면,  $\mathbf{R}(j\Omega, I)$ 에 대한 2-norm 해석은 시스템의 이득(gain)으로 해석할 수 있다. 특히, 최대 특이값(maximum singular value)  $\sigma(\mathbf{R})$ 은 최대 이득값과 같다.<sup>(9)</sup> 따라서 제어입력은 불균형력  $\mathbf{F}(j\Omega)$ 에 대해서 다음 식과 같이 최대 이득값을 최소화하도록 결정되어야 한다.

$$I^o(\Omega) = \min \left\{ \max(\sigma(\mathbf{R})) \right\}, \quad \forall I \in [I_{\min}, I_{\max}] \quad (22)$$

### 4.4 수치예제

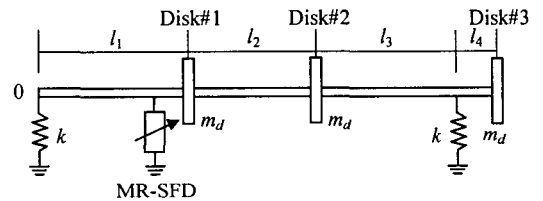


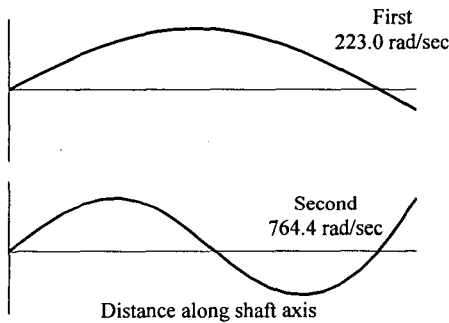
Fig.7 Dimensions of flexible rotor-bearing system with MR-SFD

MR-SFD의 설치위치 결정 및 제안된 제어방법에 대한 타당성을 검증하기 위하여 Fig.7에 도시된 것과 같은 등방 회전체계를 구성하고 MR-SFD를 적용하였다. 또한, 수치해석을 위해 사용된 각 변수들의 값이 Table 2에 나열되어 있다.

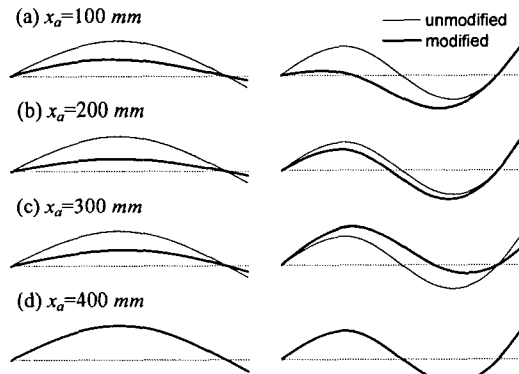
**Table 2 Dimensions of rotor-bearing system**

Shaft	Disk
$\rho=17,500 \text{ kg/m}^3$	$m_d=0.55 \text{ kg}$
$E=2.0 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$	$(J-I)_d=0.00049 \text{ kg-m}^2$
$D=9.5 \text{ mm}$	<b>Bearing</b>
$l_1=14 \text{ cm}, l_2=12 \text{ cm},$	$k=2.5 \times 10^7 \text{ N/m}$
$l_3=14 \text{ cm}, l_4=4 \text{ cm}$	

구조변경법을 적용하기 위하여, 회전체가 2개의 연성모드가 나타나는 속도구간에서 운전된다고 가정하였다. MR-SFD를 설치하기 전의 회전체에 대한 모드정보를 얻기 위하여, Fig.7에 그려진 회전축을 축방향에 대해서 22개의 하위요소로 나누고 FEM해석을 수행하였다. Fig.8에는 첫번째와 두번째 연성모드에 대한 모드형상과 고유진동수가 표시되어 있다.



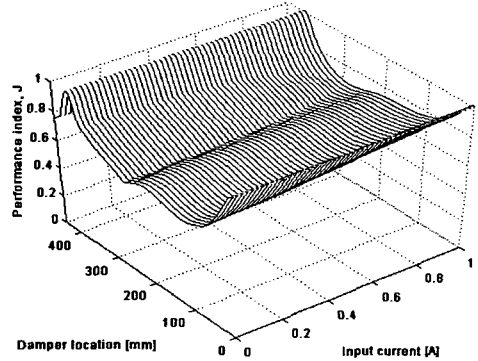
**Fig.8 Lowest two mode shapes and natural frequencies of unmodified system**



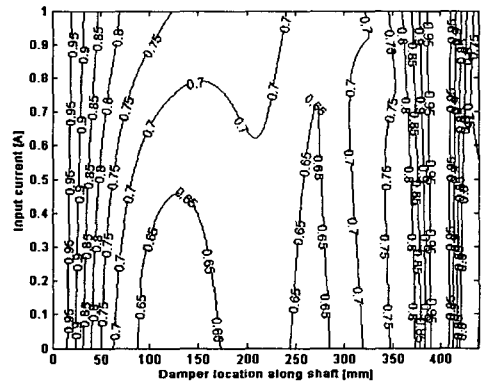
**Fig.9 Changes in mode shapes due to MR-SFD**

FEM해석을 통해 얻어진 수정전 시스템에 대한 모드정보를 구조변경법에 적용하여 MR-SFD 설치에 따른 모드형상의 변화를 검토하였다. Fig.9에는

MR-SFD의 설치위치를 변경하면서 계산한 모드형상의 변화가 그려져 있다.



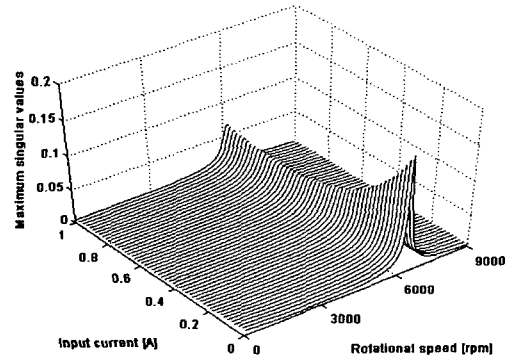
**(a) 3-dimensional map of performance index**



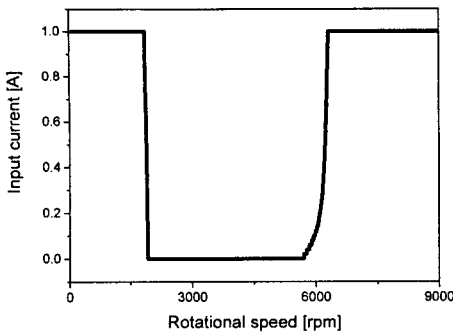
**(b) Contour plot for performance index**

**Fig.10 Determination of the MR-SFD location**

구조변경법을 사용하여 입력전류의 변화 및 설치위치의 변경에 따른 모드형상의 변화를 계산하고, 이를 이용하여 식 (17)에서 정의한 성능지수  $J$ 를 계산하였다. Fig.10에는 계산된 성능지수에 대한 3차원 분포도와 contour가 각각 나타나 있다. Fig.10에 도시한 결과를 바탕으로 MR-SFD의 최적위치  $x_a$ 를 성능지수가 최저값을 가지는 영역 중 280 mm로 결정하였다.



**(a) Maximum singular values distribution**



(b) Scheduled input current levels

Fig.11 Scheduling input current levels via robust design concept

MR-SFD에 대한 동특성 모형과 설치위치 정보를 식 (19)의 FEM모형에 적용하고 운전속도와 입력전류에 따른 최대 특이값의 분포를 계산하였다. Fig.11에는 최대 특이값의 분포도와 식 (22)에 따라 얻어진 입력전류값이 그려져 있다.

결정된 입력전류값을 운동방정식에 적용하고 운전속도를 변화시키면서 불균형 응답의 변화를 관찰하였다. Fig.12에는 모의실험을 통하여 계산된 불균형 응답량이 나타나 있다. 모의실험을 통해 예측된 결과를 보면, MR-SFD를 설치하여 적절한 입력전류를 인가할 경우 2차 위험속도에서 각 디스크 요소에서의 응답이 효과적으로 줄어들음을 확인할 수 있다. 특히, 디스크 1번과 3번의 경우 그 응답이 70% 가까이 감소함을 알 수 있다.

이러한 결과들을 통하여 반응동형 MR-SFD를 회전체 불균형 응답 제어에 적용할 경우, 기존의 시스템을 사용하는 것보다 효과적으로 회전체의 진동문제를 해결할 수 있다는 것을 알 수 있다.

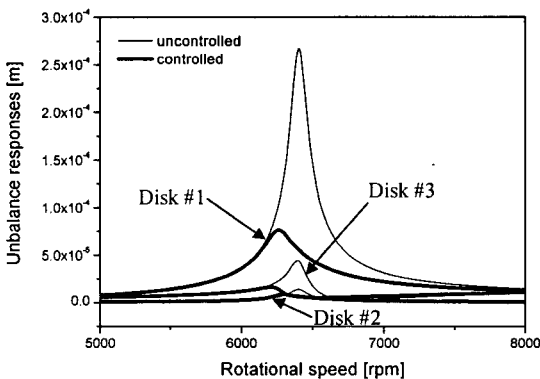


Fig.12 Unbalance response control via MR-SFD

## 5. 결론

본 연구에서는 연성회전체의 불균형 응답을 효과적으로 제어하기 위하여, MR유체를 작동유체로 적용한 반응동형 스퀴즈 필름 댐퍼를 제안하고,

이를 설계하여 그 동특성을 실험적으로 모형화하였다. MR-SFD의 설계시 주어진 제어입력 영역에 대해서 재료의 자기포화가 발생하지 않도록 자기장 해석을 통해 설계의 타당성을 검증하였으며, MR-SFD의 실용적인 측면을 향상시키기 위하여 벨로우즈 형태의 실링을 설계하였다. 설계된 MR-SFD를 제작하고, 이를 이용하여 다양한 조건하에서의 실험을 수행하여 얻어진 결과를 통해 그 동특성을 모형화하였다.

또한, 제안된 MR-SFD의 불균형 응답 제어성을 검증하기 위하여 연성회전체에 대한 응답 제어로 적용을 시도하였다. 먼저, 구조변경법을 사용하여 MR-SFD의 최적위치를 선정하고, 강건설계기법에 따라 운전영역내에서 적절한 제어입력을 결정하였다. FEM모형을 이용하여 회전체의 불균형 응답 성능을 예측한 결과를 통해, MR-SFD가 연성회전체의 불균형 응답 성능을 효과적으로 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

현재 제안된 이론적 해석방법을 실험을 통해 검증하는 연구가 진행되고 있다.

## 참고 문헌

- [1] Morishita, S. and Mitsui, J., 1992, "Controllable squeeze film damper (an application of electro-rheological fluid)," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol.114, pp.354-357.
- [2] Jung, S.Y., 1995, "Analysis of short squeeze film dampers operating with electro-rheological fluids," *Journal of KSTLE*, Vol.11, pp.5-11.
- [3] Lee, N.S., Choi, D.H., Seok, K.Y., Lee, Y.B., and Kim, C.H., 2000, "Vibration control of a flexible rotor with a slotted-ring sealed electro-rheological squeeze film damper," *IMECH 7th International conference*, pp.499-506.
- [4] Carlson, J.D., Catanzarite, D.N., and St. Clair, K.A., 1996, "Commercial magneto-rheological fluid devices," *Proceedings 5th International Conference on ER Fluids, MR Suspensions and Associated Technology*, pp.20-28.
- [5] Mecker, D., 2002, *Finite element method magnetics user's manual*, <http://femm.foster-miller.com>.
- [6] Kim, K.J. and Lee, C.W., 2003, "Identification of dynamic characteristics of squeeze film damper using active magnetic bearing system as an exciter," *Trans. KSNVE*, Vol.13, No.7, pp.508-516.
- [7] Kim, Y.D. and Lee, C.W., 1985, "Determination of the optimal balancing head location on flexible rotors using a structural dynamics modification algorithm," *Proc. Instn. Mech. Engrs*, Vol.199, pp.19-25.
- [8] Lee, C.W., 1993, *Vibration analysis of rotors*, Kluwer Academic Publishers
- [9] Shahian, B. and Hassul, M., 1993, *Control system design using MATLAB®*, Prentice Hall.