

< 논 문 >

# 초전도 자기베어링-플라이휠 시스템의 베어링 모델링

## Bearing Modeling of Superconducting Magnetic Bearings-Flywheel System

김 정 근\* · 이 수 훈\*\*

Jung-Guen Kim and Soo-Hun Lee

(1999년 2월 6일 접수 ; 1999년 7월 26일 심사완료)

**Key Words** : Superconducting Magnetic Bearings(초전도 자기 베어링), Flywheel Energy Storage System (플라이휠 에너지 저장 장치), Frequency Response Function(주파수 응답함수), Least Square Method(최소 자승법)

### ABSTRACT

The purpose of Superconducting Magnetic Bearing Flywheel Energy Storage System (SMB-FESS) is to store unused nighttime electricity until it is needed during daytime. An analytical model of the SMB-FESS is necessary to identify the system behavior. At first, We have to model the superconducting magnetic bearings that have different characteristics from mechanical and the electric magnetic bearing. Modeling the SMB is same as estimating the bearing parameter. The theoretical modal parameter is calculated through the equation of motion and the experimental modal parameter is estimated through the impact testing (modal testing). The bearing parameter is searched by using the non-linear least square method until the theoretical result corresponds to the experimental result. The suggested modeling method is verified by comparing experimental and analytical frequency response function.

### 기 호 설 명

- $a$  : 수평 베어링 작용점의 질량중심에서 수직거리
- $L$  : 수직 베어링 작용점의 질량중심에서 수평거리
- $K_r$  : 반경방향 강성
- $K_a$  : 축방향 강성
- $C_r$  : 반경방향 감쇠
- $C_a$  : 축방향 감쇠
- $m$  : 질량
- $J_t$  : 반경방향 질량 관성모멘트
- $J_b$  : 축방향 질량 관성모멘트

- $M$  : 관성행렬
- $G$  : 자이로스코픽 행렬
- $K$  : 강성행렬
- $C$  : 감쇠행렬
- $Q$  : 일반힘 벡터
- $q$  : 일반좌표 벡터
- $H(j\omega)$  : 변위 주파수응답함수 행렬
- $A(j\omega)$  : 가속도 주파수응답함수 행렬
- $\omega_n$  : 고유진동수
- $\zeta$  : 감쇠비

### - 첨 자 -

\* 아주대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 정회원, 아주대학교 공과대학 기계 및 산업공학부

anal : 해석적, expe : 실험적  
 $a$  : 축방향,  $r$  : 반경방향

### 1. 서 론

낮과 밤의 전력소비차로 생기게 되는 잉여전력의 저장을 위해 초전도 자기베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장 시스템이 연구되어지고 있다. 초전도 자기베어링은 무접촉 자기 부상식 베어링으로서 자기 안정성(self-stabilization)이란 특성을 지녀 다른 자세 제어시스템(motion control system)이 필요하지 않기 때문에 기존의 능동 자기 베어링 방식보다 높은 에너지 효율을 가질 수 있는 것으로 평가 받고 있다<sup>(1)</sup>. 전기에너지를 회전 운동에너지로 저장하기 위한 시스템은 수만 rpm의 가동조건을 갖는 회전체 시스템으로 구성된다. 시스템의 안전한 운전 영역, 거동특성과 운전조건 등을 파악하기 위해서는 베어링과 플라이휠로 구성된 회전체 시스템의 운동방정식을 유도하고 해석하여 위험속도, 불평형 응답 등의 해석결과를 얻어야 한다. 이를 해석하기 위해서는 시스템의 정확한 해석모델이 요구되며 기존의 자기베어링이나 기계적 베어링과는 다른 특성을 지닌 초전도 자기베어링 모델의 유도가 선행되어야 한다.

초전도 자기베어링의 부상력 및 수식화를 위해 Yang, Z. J. 등은 벡터 포텐셜 에너지(vector potential energy)를 이용해서 영구자석의 여러 배치(configuration)에 따라 수식을 유도했으나 다중링(multi-ring) 영구자석에 대해서는 아직까지 보고된 바 없으며 위의 연구결과를 적용하기 위해서는 초전도체와 영구자석의 특성을 나타내는 여러 물리변수가 필요하며 동특성 결정에 중요한 감쇠는 고려하지 않고 있다. 또한 반경과 축방향을 동시에 고려한 연구는 보고된 바 없다. 이러한 이론적 접근의 제한으로 최근에 Moon, F. C. 등은 선형강성(linear spring)과 이력곡선(hysteresis loop) 실험식으로 해석모델을 구성한 연구결과를 발표하였으나 소형의 영구자석에 대해서만 연구되어 베어링의 작용점에 대해서는 고려하고 있지 않다.

본 논문에서는 플라이휠의 거동이 작아 선형시스템으로 취급할 수 있다고 가정하고 이를 위한 모델을 구성하는데 목적이 있다. 모델링을 위해서 반경방향 강성, 감쇠와 축방향 강성, 감쇠 그리고 강성과 감쇠가 작용하는 작용점의 수평, 수직위치를 파라미터로 하여 운동방정식이 구성된다. 그러나 작용점을 시각적으로 확인 할 수 없기 때문에 이를 추정할 수 있는 방법이 필요하다.

단일 링 영구자석으로 형성된 자기베어링은 Fig. 1(a)와 같이 축방향, 반경방향 병진강성과 감쇠로

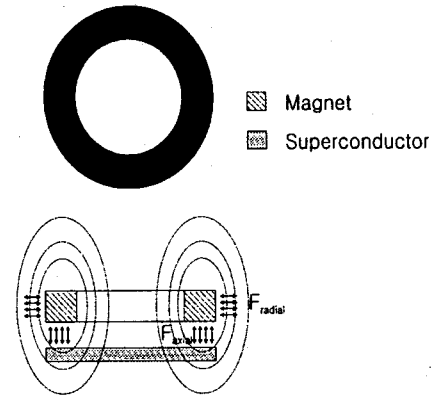


Fig. 1(a) Magnetic field of single-ring magnet

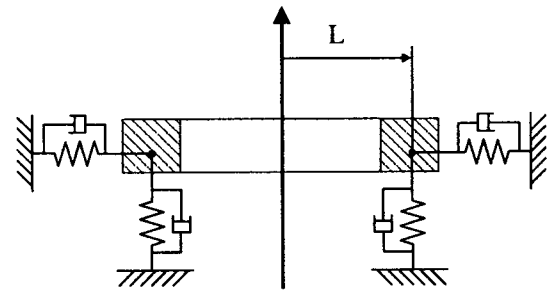


Fig. 1(b) Modeling of magnetic bearing with single-ring magnet

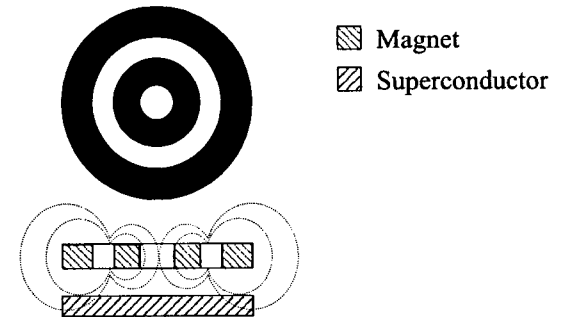


Fig. 2(a) Magnetic field of multi-ring magnets

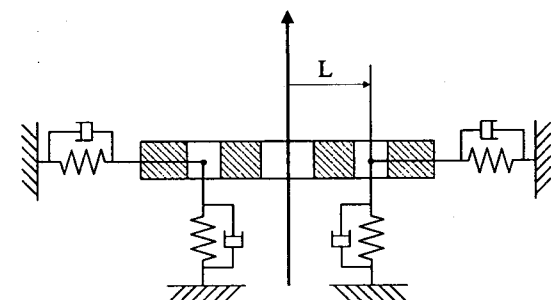


Fig. 2(b) Modeling of magnetic bearing with multi-ring magnets

모델링 할 수 있다. 영구자석의 기하학적 형태와 비례하여 자장이 형성된다고 가정할 수 있기 때문에 베어링 힘의 수평 작용점을  $L$ 이라고 가정할 수 있다. 이와 같은 단일 영구자석 초전도 베어링 모델에 대한 실험결과와 해석결과의 비교를 통하여, 제안된 모델이 실제 모델의 특성을 잘 반영하고 있음을 확인하였다<sup>(2)</sup>.

그러나 실제 에너지 저장장치의 안정성과 용량증대를 위해서 Fig. 2(a)와 같이 다중 링 영구자석을 사용하게 되는데 여기에 형성된 자기베어링 힘의 수평 작용점  $L$ 을 결정할 때에는, 각각의 단일 링 영구자석의 자장분포의 선형적인 합이 다중 링 영구자석의 자장분포와 일치하지 않는 비선형성으로 인해 주의가 필요하다. 플라이휠의 구동 및 발전을 위한 계자용 영구자석의 영향으로 작용점의 수직위치도 미지변수가 되며 순수반경방향 모드가 존재하지 않기 때문에 두개의 피치모드를 통하여 반경방향 강성과 감쇠를 추정하는 방법을 강구해야 한다.

본 논문에서는 자기베어링 파라미터들을 구하기 위해 초전도 자기베어링-플라이휠 시스템의 운동방정식을 유도하여 이론적인 모달 파라미터를 계산하고 모달 실험(modal testing)을 통한 주파수 응답함수로부터 모달 파라미터를 얻은 후, 최소자승법을 이용하여 두 모달 파라미터를 일치시키도록 하는 베어링 파라미터들을 추정하는 방법을 사용하였다.

## 2. 초전도 자기베어링의 모델링

### 2.1 운동방정식 유도

다중 링 영구자석에 의해 형성된 초전도 자기베어링을 갖는 플라이휠 시스템은 Fig. 3과 같이 축방향과 반경방향 강성과 감쇠, 작용점 위치  $a$ ,  $L$ 로 표

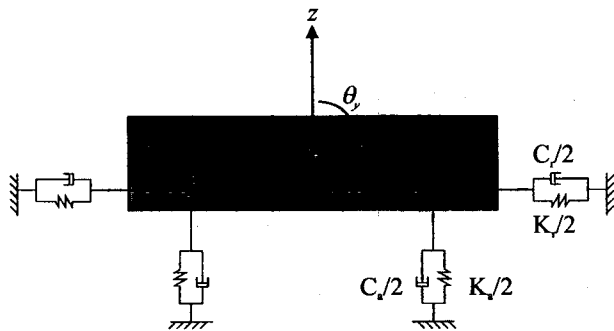


Fig. 3 Modeling of flywheel-bearing system with MMSB

현 할 수 있다.

베어링-플라이휠 시스템을 구성하는 파라미터를 정리하면 다음과 같다.

- $L$  : 수직 베어링 작용점의 질량중심에서 수평거리
- $a$  : 수평 베어링 작용점의 질량중심에서 수직거리
- $K_r$  : 반경방향(radial direction) 강성
- $K_a$  : 축방향(axial direction) 강성
- $C_r$  : 반경방향(radial direction) 감쇠
- $C_a$  : 축방향(axial direction) 감쇠

일반좌표계  $q = \{x, y, z, \theta_x, \theta_y\}^T$ 를 질량 중심에 위치시키고 시스템의 운동방정식을 유도하기 위해 라그랑지 식(Lagrange's equation)인 식 (1)을 이용한다<sup>(3)</sup>.

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (1)$$

시스템의 운동에너지(kinetic energy:  $T$ ), 포텐셜에너지(potential energy:  $V$ ), 소실에너지(dissipation energy:  $D$ )는 다음 식들로 표현된다.

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2) + \frac{1}{2}J_x(\dot{\theta}_x^2 + \dot{\theta}_y^2) + \frac{1}{2}J_p(\Omega^2 - 2\Omega\theta_x\dot{\theta}_y) \quad (2)$$

$$V = \frac{1}{2}K_r(x - a\theta_y)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{K_a}{2} \right) \{ (z - L\theta_y)^2 + (z + L\theta_y)^2 \} + \frac{1}{2}K_r(y + a\theta_x)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{K_a}{2} \right) \{ (z - L\theta_x)^2 + (z + L\theta_x)^2 \} \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{2}C_r(\dot{x} - a\dot{\theta}_y)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{C_a}{2} \right) \{ (\dot{z} - L\dot{\theta}_y)^2 + (\dot{z} + L\dot{\theta}_y)^2 \} + \frac{1}{2}C_r(\dot{y} + a\dot{\theta}_x)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{C_a}{2} \right) \{ (\dot{z} - L\dot{\theta}_x)^2 + (\dot{z} + L\dot{\theta}_x)^2 \} \quad (4)$$

식 (2)~(4)를 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (5)와 같이 행렬  $M, G, K, C$ 로 표현된 일반좌표에 대한 운동방정식이 유도된다.

$$M\ddot{q} + (G + C)\dot{q} + Kq = Q \quad (5)$$

여기서,

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_y \end{bmatrix} \quad G = \Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_p \\ 0 & 0 & 0 & -J_p & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_r & 0 & 0 & 0 & -aK_r \\ 0 & K_r & 0 & aK_r & 0 \\ 0 & 0 & K_a & 0 & 0 \\ 0 & aK_r & 0 & L^2K_a + a^2K_r & 0 \\ -aK_r & 0 & 0 & 0 & L^2K_a + a^2K_r \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_r & 0 & 0 & 0 & -aC_r \\ 0 & C_r & 0 & aC_r & 0 \\ 0 & 0 & C_a & 0 & 0 \\ 0 & aC_r & 0 & L^2C_a + a^2C_r & 0 \\ -aC_r & 0 & 0 & 0 & L^2C_a + a^2C_r \end{bmatrix}$$

### 2.2 고유치 해석

식 (5)에서 감쇠행렬을 제외한 자유거동 방정식을 이용하여 고유치 해석을 수행하면 다음 3개의 고유진동수(natural frequency)를 얻게 된다.

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K_a}{m}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{A-B}{2mJ_t}}, \quad \omega_3 = \sqrt{\frac{A+B}{2mJ_t}} \quad (6)$$

여기서,

$$B = \sqrt{-4mJ_t L^2 K_a K_r + A}, \quad A = (J_t + ma^2)K_r + mL^2 K_a$$

이다. 각 고유진동수에 해당하는 고유진동형(mode shape)은 식 (7)에 나타내었다.

$$q_n = \{x, z, \theta\}^T$$

$$q_1 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad q_2 = \begin{Bmatrix} \frac{-A+B}{2maK_r} \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad q_3 = \begin{Bmatrix} \frac{-A-B}{2maK_r} \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \quad (7)$$

순수한 축방향 모드가 한 개 존재하고 나머지 두개의 모드는 축방향과 반경방향 모드가 연성되어 나타나는 피치 모드(pitch mode)이다.

### 2.3 주파수 응답함수 해석

시스템의 주파수 응답함수는 베어링 특성치의 추출에 사용된다. 식 (8)과 같은 일반적인  $M, K, C$  행렬을 갖는 시스템의 주파수 응답함수 해석은 다음과 같다<sup>(4)</sup>.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = Q \quad (8)$$

가진력  $Q$ 를  $Q_0 e^{j\omega t}$  라고 가정하면 응답  $q$ 는  $q = H(j\omega) Q_0 e^{j\omega t}$  로 가정할 수 있다. 이를 식 (8)에

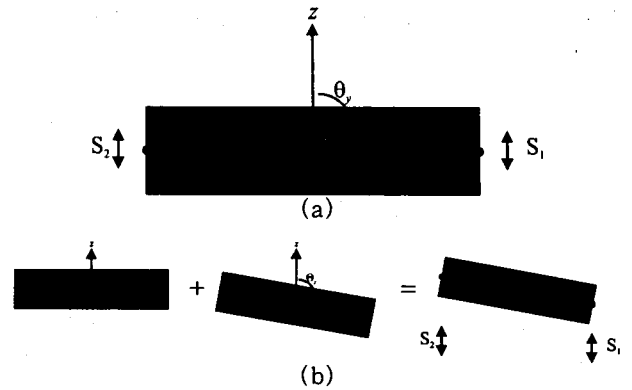


Fig. 4 Geometrical relation of two coordinates

대입하면,

$$[-\omega^2 M + j\omega C + K]H(j\omega)Q_0 = Q_0 \quad (9)$$

이 되고 주파수 응답함수  $H(j\omega)$ 는

$$H(j\omega) = [-\omega^2 M + j\omega C + K]^{-1} \quad (10)$$

로 유도된다. 가속도계를 이용한 모달 실험을 통해 얻게 되는 주파수 응답함수(accelerance)과의 비교를 위해 해석적 주파수 응답함수(compliance)를 변환한다. 또한 플라이휠 형상이나 시스템 구성과 같은 여러 제약 조건으로 인해 실제 실험을 통하여 얻게 되는 응답은 Fig. 4(a)에서  $s_1$ 과  $s_2$ 인데 해석을 통하여 얻게 되는 응답은  $z$ 와  $\theta_y$ 가 된다. 따라서 실험에 사용되는 좌표계와 해석모델의 좌표계가 달라서 직접 비교할 수 없으므로 Fig. 4(b)와 같은 기하학적 관계를 통해서  $z$ 와  $\theta_y$ 를  $s_1, s_2$ 로 변환하여 비교하게 된다.

결과적으로 실험을 통한 주파수 응답함수(accelerance)  $A_{\text{expe}}(j\omega)$ 와 해석 주파수 응답함수(compliance)  $H_{\text{anal}}(j\omega)$ 를 비교할 때는 식 (11)을 이용한다.

$$[A_{\text{expe}}(j\omega)]_{1z} = -\omega^2 \{ [H_{\text{anal}}(j\omega)]_{zz} + L^2 [H_{\text{anal}}(j\omega)]_{\theta, \theta} \}$$

$$[A_{\text{expe}}(j\omega)]_{2z} = -\omega^2 \{ [H_{\text{anal}}(j\omega)]_{zz} - L^2 [H_{\text{anal}}(j\omega)]_{\theta, \theta} \} \quad (11)$$

## 3. 초전도 자기베어링 파라미터 추정방법

### 3.1 모드 구분

고유치 해석결과 식 (7)을 볼 때 실험으로 얻어진 주파수 응답함수에는 2~3개의 모드가 나타나게 된다. 축방향 병진 모드와 2개의 피치 모드를 구분한

다면 추정 작업은 간소화된다. 모드를 구분하기 위해서 최소 2개의 주파수 응답함수를 측정한다.

(1) 피치 모드와 축방향 병진 모드를 발생시키는 수직 가진에 대한 수직 응답

(2) 피치 모드만을 발생시키는 수평 가진에 대한 수평 응답

(1)에는 3개의 모드, (2)에는 2개의 모드가 나타나며 (2)에는 존재하지 않고 (1)에만 존재하는 모드가 축방향 병진모드가 된다. (1)의 나머지 2개의 피치 모드 중 모드 강도가 작은 것이 순수 반경방향 모드와 유사한 모드가 된다. 이 반경방향 유사 모드는 베어링 파라미터 탐색작업의 초기값 계산에 사용된다.

### 3.2 축방향 파라미터

구분된 축방향 모드는 피치모드와 독립된 1자유도 거동으로 취급할 수 있고 식 (12)를 통하여 강성과 감쇠를 얻게 된다<sup>(2)</sup>.

$$\begin{aligned} \omega_a &= \sqrt{\frac{K_a}{m}} \Rightarrow K_a = \omega_a^2 m \\ \zeta_a &= \frac{C_a}{2\sqrt{mK_a}} \Rightarrow C_a = 2\zeta_a \sqrt{mK_a} \end{aligned} \quad (12)$$

### 3.3 반경방향 파라미터와 작용점

축방향 강성과 감쇠를 제외한 4개의 미지 파라미터( $K_r, C_r, L, a$ )를 추정하기 위해 모달 파라미터(modal parameter)를 사용한다. 모달 파라미터는 모드 좌표계에 해당하는 것으로 베어링 파라미터와는

구분된다. 모달 파라미터는 복소 고유치 해석의 해인 식 (13)을 통하여 얻어진다.

$$s_{1,2} = -\zeta_{anal}\omega_{anal} \pm j\omega_{anal}\sqrt{1-\zeta_{anal}^2} \quad (13)$$

해석 모델에 대입된 베어링 파라미터가 실제와 동일하다면 해석 모델의 모달 파라미터가 실험으로 얻어진 모달 파라미터와 동일해야 한다. 본 논문에서는 실험으로 얻어진 모달 파라미터와 일치된 모달 파라미터를 갖게 하는 4개의 미지 베어링 파라미터를 탐색하는 방법을 사용하였다. 탐색방법은 비선형 최소자승법을 이용하였고 추정과정은 Fig. 5에 나타내었다.

모달 파라미터 추출 프로그램인 STAR 시스템을 이용하여 실험으로 얻어진 주파수 응답함수로부터 고유진동수와 모달 감쇠비를 얻는다. 실험으로 얻어진 고유진동수와 모달 감쇠비는 정확성을 갖는다고 가정하여 목표값으로 설정하고 식 (14)로 목적함수를 구성한다. 목적함수를 최소화하는 4개의 미지 베어링 파라미터를 탐색한다.

$$\begin{aligned} f(K_r, C_r, L, a) &= \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N \left( \frac{\omega_{expe} - \omega_{anal}}{\omega_{expe}} \right)^2} \\ &+ \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{n=1}^N \left( \frac{\zeta_{expe} - \zeta_{anal}}{\zeta_{expe}} \right)^2} \end{aligned} \quad (14)$$

제안된 방법은 대략적으로 예측 가능한 파라미터를 초기치로 사용했을 때 국부 최소값(local minimum)을 참값으로 탐색하게 된다. 순수 반경방향 모드와 유사한 피치 모드로부터 구한 근사값  $K_r, C_r, L, a$ 를 초기치로 대입한다. 모달 파라미터 계산과 비선형 최소자승법을 통한 최적값 탐색은 MATLAB-Control Toolbox<sup>(5)</sup>와 Optimization Toolbox<sup>(6)</sup>를 사용하였다.

## 4. 실험 및 추정 결과

### 4.1 모달 실험

실험을 통한 주파수 응답함수를 얻기 위하여 B&K 2035 신호분석기와 PCB사의 임팩트 해머, 가속도계, 증폭기를 사용하였다. 0.7 Hz~50 Hz의 대역통과 필터를 사용하였고, 임팩트 해머 신호는 시간 영역에서 transient 가중을, 가속도 신호는 exponential 가중을 하였고 5회 측정하여 평균하였다. 실험장치 구성도는 Fig. 6과 같다<sup>(7)</sup>.

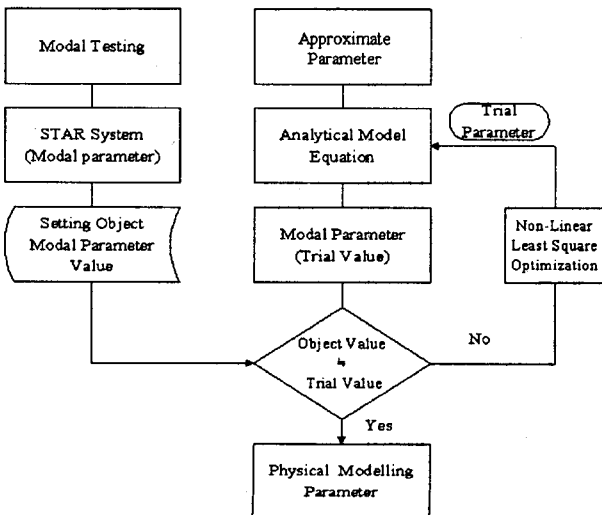


Fig. 5 Flow chart for estimating bearing parameters

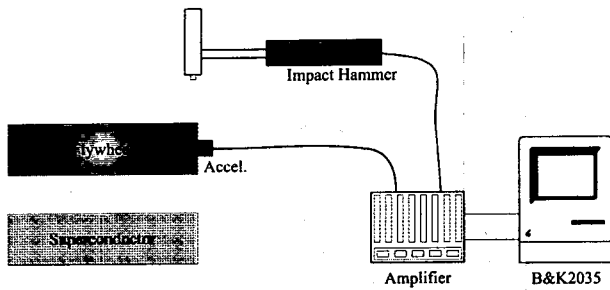


Fig. 6 Experimental setup

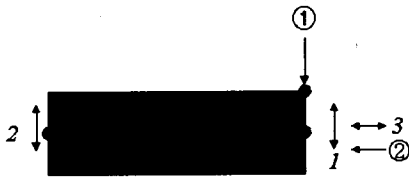


Fig. 7 Response and excitation points

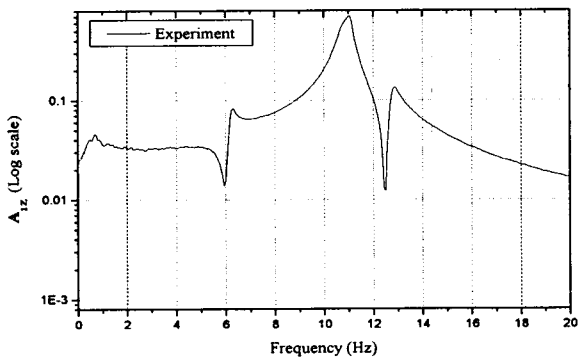


Fig. 8 Frequency response function,  $[A_{\text{exp}}(j\omega)]_{1z}$

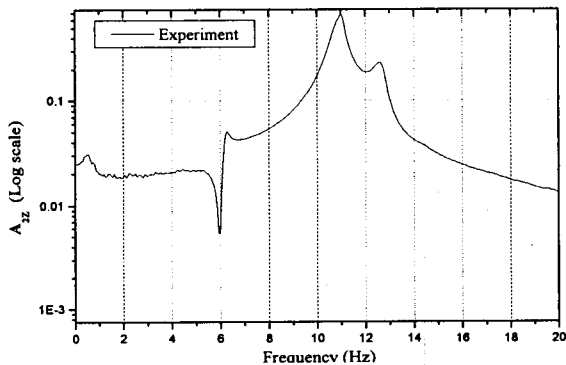


Fig. 9 Frequency response function,  $[A_{\text{exp}}(j\omega)]_{2z}$

Fig. 7에 표시된 가진점과 가속도계 부착위치에서의 응답을 이용하여 다음 3개의 주파수 응답함수를 구하였다.

\*  $[A_{\text{exp}}(j\omega)]_{1z}$  : ①위치 수직 가진에 대한 1위치 수직응답 acceleration.

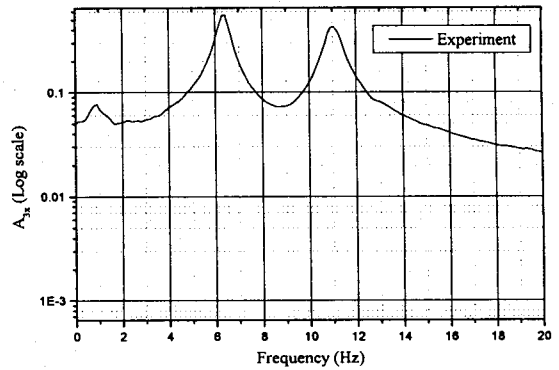


Fig. 10 Frequency response function,  $[A_{\text{exp}}(j\omega)]_{2z}$

Table 1 Modal natural frequencies and damping ratios

	Natural frequencies	Damping ratios
1st pitch-mode	6.25Hz	0.0330
2nd pitch-mode	11.0Hz	0.0263
3rd axial-mode	12.8Hz	0.0208

\*  $[A_{\text{exp}}(j\omega)]_{2z}$  : ①위치 수직 가진에 대한 2위치 수직응답 acceleration.

\*  $[A_{\text{exp}}(j\omega)]_{3z}$  : ②위치 수평 가진에 대한 3위치 수평응답 acceleration.

실험결과 얻어진 각각의 주파수 응답함수를 Fig. 8~10에 나타내었다.

상용 모달 파라미터 추출 프로그램인 STAR 시스템을 통하여 얻어진 고유진동수와 모달 감쇠비를 Table 1에 나타내었다.

실험 주파수 응답함수로부터 STAR 시스템을 이용하여 모드형상을 추출해 본 결과, Fig. 10에만 나타나지 않는 12.8 Hz가 순수 축방향 모드가 되며 Fig. 8~9에서 모드 강도가 작은 6.25 Hz가 순수 병진 반경방향 모드에 가까운 피치 모드이다. 1, 2차 모드의 감쇠비와 고유진동수가 목적함수 식 (14)의 목표값이 된다.

#### 4.2 파라미터 추정 결과

식 (12)를 통하여 계산된 축방향 강성과 감쇠  $K_a, C_a$  와 4개의 미지 파라미터의 근사 초기값(\*표시)은 Table 2와 같다. 초기값으로 찾아낸 국부 최적값은 Table 3에 나타냈으며 이 값이 추정된 베어링 파라미터가 된다.

Table 2 Initial values of bearing parameters

Parameters	Value
$K_a$	87449.306 N/m
$C_a$	45.23 N-s/m
$K_r^*$	19214.93 N/m
$C_r^*$	40.77 N-s/m
$L^*$	0.074 m
$a^*$	0.0349 m

Table 3 Estimated values of bearing parameters

Parameters	Value
$K_a$	87449.306 N/m
$C_a$	45.23 N-s/m
$K_r^*$	24877.0 N/m
$C_r^*$	50.52 N-s/m
$L^*$	0.0553 m
$a^*$	0.0341 m

### 4.3 추정 파라미터 검증

추정과정과 추정된 파라미터의 타당성을 검증하기 위해 Table 3의 결과를 해석모델에 대입하고, 식 (11)로 계산된 주파수 응답함수와 실험 주파수 응답 함수를 Fig. 11~13에 비교하여 나타내었다.

플라이휠과 베어링 분포의 대칭성으로 Fig. 11과 12의 모드강도는 일치해야 하나 실험치를 비교하면 차이가 존재한다. 이는  $A_{1z}$  실험시 가진과 측정에 오차가 존재했을 것으로 생각되며 모달 파라미터 추출시 반공진(Anti-resonance)이 존재하는  $A_{1z}$ 를 제외하고  $A_{2z}$ 와  $A_{3z}$ 를 사용했기 때문에  $A_{1z}$ 의 해석과의 비교에서 차이가 발생한 것으로 생각된다. 0.5 Hz 근처에 공진점이 있는 것으로 보이나 이 부분에서의 coherence 함수 값이 상당히 낮고, 실험에서 0.7 Hz의 고대역 통과 필터를 사용하였으므로 이를 공진점으로 판단하기는 힘들며, 초전도 자기베어링과 플라이휠 시스템의 공진점은 아닌 것으로 여겨진다. 반공진 부근과 저주파수 영역에서 비교결과에 오차가 있음을 확인할 수 있는데 이는 반공진 부근

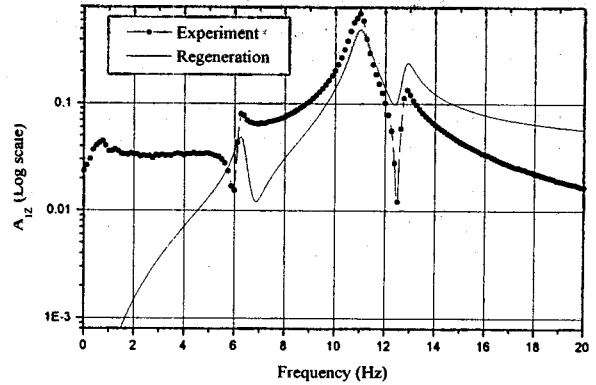


Fig. 11 Comparison between measured and synthesized FRF,  $[A(j\omega)]_{1z}$

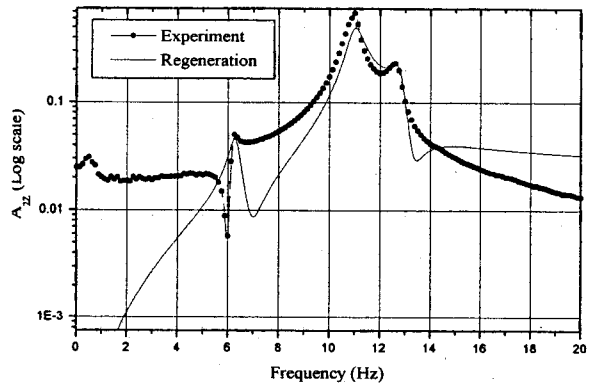


Fig. 12 Comparison between measured and synthesized FRF,  $[A(j\omega)]_{2z}$

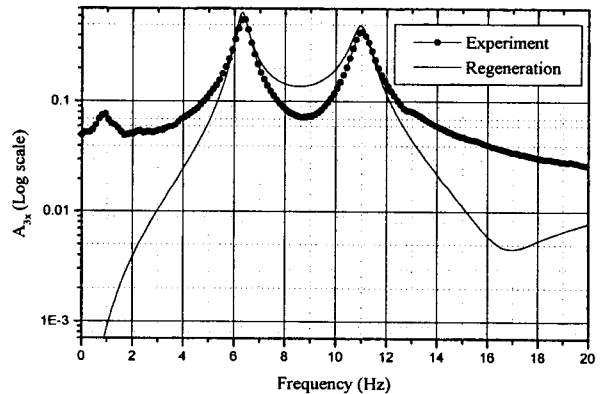


Fig. 13 Comparison between measured and synthesized FRF,  $[A(j\omega)]_{3z}$

에서의 잡음비의 증대와 임팩트 가진에 의한 저주파수에서 발생하는 오차와 저주파수에 가중이 덜한 가속도계 특성에 의한 것이다<sup>(7)</sup>. 이 오차와 모달 감쇠비 추출의 오차가 해석 주파수 응답함수와 실험치

사이의 차이를 유발하게 된다. 변위계와 가진기를 이용한 모달 실험을 수행하여 얻은 모달 파라미터를 이용한다면 좀더 정확한 베어링 파라미터를 추정할 수 있을 것이다. 추정된 파라미터를 이용해 재생해낸 주파수 응답함수가 전반적으로 실제 시스템의 동특성을 반영하고 있음을 볼 수 있다. 따라서 제안된 파라미터 추정방법과 유도된 시스템 운동방정식의 타당성을 확인 할 수 있다.

## 5. 결 론

에너지 저장을 위한 초전도 자기베어링-플라이휠 시스템의 회전체 해석을 위한 선형모델을 구성하고 필요한 파라미터를 추정하였다. 본 논문에서는 초전도 자기베어링의 동적 특성을 나타내는 베어링 파라미터를 효과적으로 구하기 위한 방법을 제안하였다. 모달 실험을 통한 주파수 응답함수로부터 모달 파라미터를 추출하고 유도된 운동방정식으로부터 이론적 모달 파라미터를 계산한 후 두 값을 일치시키는 베어링 파라미터를 비선형 최소자승법을 이용하여 구했다. 이 결과들을 이용하여 재생해낸 주파수 응답함수는 실험에 의한 주파수 응답함수와 전반적으로 일치함을 보여 추정방법의 타당성을 검증할 수 있었으며 미지변수의 대입으로 초전도 자기베어링-플라이휠 시스템의 해석모델을 완성할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 한국원자력연구소의 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일환으로 수행되었음.

## 참 고 문 헌

- (1) 김찬중, 김기백, 백해응, 홍계원, 1995, "초전도체를 이용한 에너지 저장장치," 한국원자력연구소.
- (2) 김종수, 이수훈, 이호진, 김찬중, 홍계원, 1998, "초전도 자기베어링을 이용한 에너지 저장장치용 플라이휠의 동역학적 거동에 관한 연구," Proceedings of the 8th Korean Conference on Materials and Applications of Superconductivity.
- (3) John M. Vance, 1988, "Rotordynamics of Turbomachinery," John Wiley and Sons, pp. 121~122.
- (4) Leonard Meirovitch, 1967, "Analytical Methods in Vibrations," Macmillan, pp. 18~22.
- (5) 1986, "Control System ToolBox for Use with Matlab," Math Works, pp. 2-48~2-49.
- (6) 1986, "Optimization ToolBox for Use with Matlab," Math Works, pp. 3-24~3-26.
- (7) Ewins, D.J., 1984, "Modal Testing," John Wiley and Sons, pp. 87~152.