

본 연구는 한국원자력연구소의 원자력 연구개발 중·장기 계획사업의 일환으로 수행되었음.

초전도자기베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치의 진동특성에 관한 연구

김종수*, 이수훈**

A Study on Vibration Characteristics of Flywheel Energy Storage System Using Superconducting Magnetic Bearings

Jong-Soo Kim*, Soo-Hun Lee**

ABSTRACT

The purpose of superconducting magnetic bearing flywheel energy storage system(SMB-FESS) is to store unused nighttime electricity as kinetic energy and convert it to electricity during daytime. The SMB-FESS is proposed as an efficient energy storage system because there is no mechanical problems, such as friction and wear. The flywheel over SMB is rotated at a high speed, 50,000rpm. The major source of energy loss in the SMB-FESS is vibration of flywheel. Therefore, the vibration characteristics of SMB-FESS should be identified.

In this study, the axial/radial stiffness and damping coefficient of SMB are measured by a vibration test. Natural frequencies and natural modes of flywheel and magnet are analyzed by a finite element method. The modal analysis of system is performed using the modal parameters of each component and the measured stiffness/damping coefficient. So, natural frequencies and mode shapes of the joined system can be obtained. According to critical speed analysis, the system has two rigid conical modes in the low speed range. Nevertheless, the system has not been affected by the critical speed in the main operating range.

Key Words : Superconducting Magnetic Bearings (초전도 자기베어링), Energy Storage System (에너지 저장 시스템), Stiffness (강성), Damping Coefficient (감쇠계수), Finite Element Method (유한요소법), Critical Speed (위험속도)

1. 서 론

플라이휠 에너지 저장장치(Flywheel Energy Stor-

age System)는 심야시간대의 잉여전력을 운동에너지의 형태로 저장하였다가 전력이 필요한 낮 시간대에 다시 전기에너지로 변환하여 사용하기 위한 에너지 저장장치이

* 아주대학교 대학원 기계공학과
** 아주대학교 기계 및 산업공학부

다. 에너지 손실을 줄이기 위해서는 비접촉식 베어링을 이용해 플라이휠을 부상시켜 회전시키는 것이 가장 적합하며 효율적 이용을 위해서는 에너지 손실이 1일 10% 미만이어야 한다. 액체질소를 이용한 77°K의 온도에서 초전도 현상을 유지하는 초전도체의 특성을 이용한 기술은 고속, 저마찰, 안정성을 갖는 무접촉 베어링에 응용할 수 있다. 초전도 자기 베어링은 자기안정성(Self-Stability)이라는 특성을 지니는데 이로 인해 기존의 마그네틱 베어링 시스템과는 달리 별다른 자세제어 시스템이 필요 없이 높은 회전속도까지 안정한 거동을 할 수 있게 하므로 에너지 저장장치로 이용하기에 아주 적합하다. 최근 몇 년전부터 초전도 자기베어링의 특성과 이를 이용한 플라이휠 에너지 저장장치에 대한 연구가 세계 각국에서 현재까지 활발히 수행되고 있다. 플라이휠 에너지 저장시스템의 실용화를 위해서는 저밀도, 고강도의 재료 개발과 회전속도의 증가, 모터/발전기의 출력 향상등으로 에너지 저장용량을 높여야 한다. 또한 여러 요인에 의한 에너지 손실원을 찾아 이를 줄이도록 해야 하는데 에너지 손실원 중 가장 주요한 요인은 플라이휠의 진동에 의한 것이다. 고속으로 회전하는 플라이휠에 진동이 생기게 되면 에너지 손실뿐만 아니라 안정성에도 문제가 생겨 위험을 초래하게 되므로 시스템의 진동특성을 파악하는 것은 매우 중요하다.

본 논문에서는 초전도 자기베어링의 진동특성을 알아보고, 이를 이용한 플라이휠의 위험속도 해석을 통해 작동중에 공진의 영향을 받는지에 대해 연구하였다. 실험을 통해 초전도 자기베어링의 횡방향과 종방향에 대한 강성 및 감쇠계수를 간극에 따라 측정함으로써 실험식을 유도하였다. 유한요소법(Finite Element Method)을 이용해 플라이휠과 영구자석, 초전도체를 모델링하여 고유진동수와 고유모드를 구해냈으며, 앞서 측정한 베어링의 특성을 이용해 전체 시스템의 고유진동수와 고유모드를 계산하여 위험속도 해석을 수행하였다.

2. 초전도 자기베어링의 원리 및 특성

초전도 자기베어링 플라이휠 에너지 저장장치(SMB-FESS)의 구성은 크게 다음 세 가지 요소로 이루어져 있다.

- 에너지를 저장하기 위한 플라이휠 시스템
- 로터를 지지하기 위한 초전도 자기베어링 시스템
- 에너지 입/출력을 위한 모터/발전기 시스템

그리고 초전도 자기베어링은 다음 두 요소로 이루어져 있다.

- 임계온도로 냉각되어 있는 초전도체
- 초전도체 위에 부상되어 회전하는 영구자석

SMB-FESS는 두 개의 큰 공간을 가지고 있는데 위쪽 공간에는 플라이휠과 영구자석, 모터/발전기 부분이 들어 있고, 공기와의 마찰을 없애기 위해 1.0×10^{-6} torr로 진공 상태가 되어야 한다. 아래쪽 공간에는 고온 초전도체가 들어 있고 77°K로 냉각되어야 한다. 이를 위해 액체 질소가 사용된다.

플라이휠 에너지 저장장치의 전체 개념도를 Fig. 1에 나타내었다.

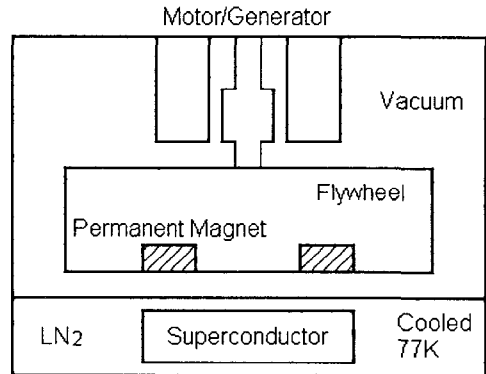


Fig. 1 Schematic Diagram of SMB-FESS

초전도체의 부상원리는 다음과 같다⁽¹⁾. 영구자석이 초전도체에 가까워지면 초전도체의 내부로 들어오는 자속을 막도록 초전도체 내에 초전도 보호전류(Superconducting Shielding Current)가 흐르게 된다. 초전도체 외부의 자장의 배열은 마치 초전도체 위에 있는 영구자석까지의 거리와 같은 거리에, 초전도체 표면 아래쪽으로 가상의 자석이 있는 것과 같다. 그리고, 실제 자석과 가상의 자석 사이의 반발력이 실제 자석의 무게와 같아지는 높이에 영구자석은 부상하게 된다(Fig. 2). 초전도체에는 Pinning Center라는 비초전도 영역이 있는데 영구자석의 자속이 이 Pinning Center가 있는 곳에 고정되어서 영구자석은 모든 방향으로 안정하게 된다. 또한 초전도 자기베어링의 자성은 인력(Attractive Force)과 척력(Repulsive Force)을 동시에 지닌다. 이러한 자기 안정성으로 인해 마그네틱 베어링 시스템과는 달리 별다른 제어 시스템 필요 없이 안정하게 구동할 수 있는 것이다.

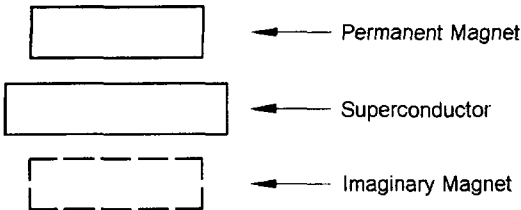


Fig. 2 Levitation Principle of Permanent Magnet

3. 초전도 자기베어링의 강성 및 감쇠계수 측정

앞서 말했듯이 본 연구에서 쓰이는 플라이휠 에너지 저장시스템은 Y-Ba-Cu-O 계열의 초전도체와 Nd-B-Fe 계열의 영구자석 사이의 초전도 자기 현상을 이용한 초전도 자기베어링을 이용한다. 베어링의 동적성능은 주로 강성(Stiffness)과 감쇠계수(Damping Coefficient)와 같은 동적특성으로 결정되므로 초전도 자기베어링으로 지지되어 있는 플라이휠의 거동을 예측하기 위해서는 강성과 감쇠계수값을 정량적으로 알아내는 것이 필수적이다. 초전도 자기베어링의 부상력의 변화는 여러가지 요인 가운데 초전도체와 영구자석 간의 간극에 가장 많은 영향을 받는다. 따라서 강성과 감쇠계수값도 간극에 따라 변화 할 것이라 예상되며, 또한 시스템의 설계에 있어서도 간극은 상당히 중요한 변수가 되므로 여러 간극에 대해 축방향과 반경방향에 대한 강성값과 감쇠계수값을 실험을 통해 얻어 초전도 자기베어링의 특성을 규명하였다.

3.1 실험장치와 실험방법

실험을 위해 간단한 형상의 플라이휠을 제작하였다. 플라이휠의 직경은 80mm, 두께는 20mm로 하였고 사용된 영구자석의 크기는 외경 62mm, 내경 35mm, 두께 9mm이며, 같은 외경을 갖는 두께 20mm인 링 형태의 초전도체를 사용하였다. 플라이휠과 영구자석을 합친 총 질량은 0.25kg이었다.

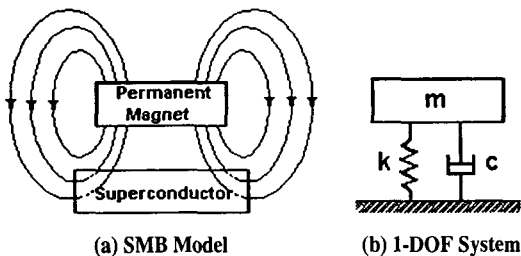


Fig. 3 SMB Model as One DOF System

Fig. 3과 같이 플라이휠-베어링 시스템을 1자유도 시스템으로 모델링하였고⁽²⁾⁽³⁾ 가속도계와 임팩트해머를 이용한 충격가진실험(Impact Hammer Test)으로 실험을 수행하였다⁽⁴⁾. 실험장치도를 Fig. 4에 나타내었다.

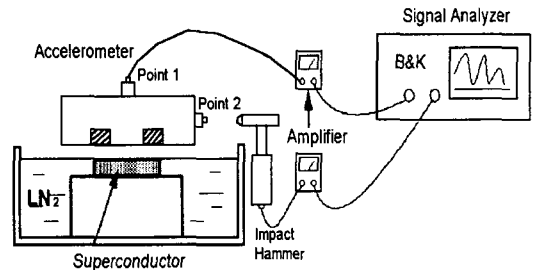


Fig. 4 Experimental Setup

Fig. 4의 실험장치에서 축방향 결과는 점 1을 가진 후 점 1에서 응답을 얻었고, 반경방향 결과는 점 2를 가진 후 점 2에서 응답을 얻었다. 간극을 0.5mm에서 8mm까지 변화시켜가며 아홉번의 실험을 수행하였다.

3.2 실험 결과

B&K 2035 신호분석기를 이용해 주파수응답함수(Frequency Response Function)와 임펄스응답함수(Impulse Response Function)를 얻었다. 대표적으로 간극 4mm에서의 축방향에 대한 두 실험결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타냈다.

감쇠비 ζ , 감쇠계수 c , 강성 k 와 주파수 f 의 관계는 1자유도 진동모델의 운동방정식으로부터 다음 식 (1)과 같다.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

$$k = (2\pi f)^2 m, \quad c = 4\pi m f \zeta \quad (1)$$

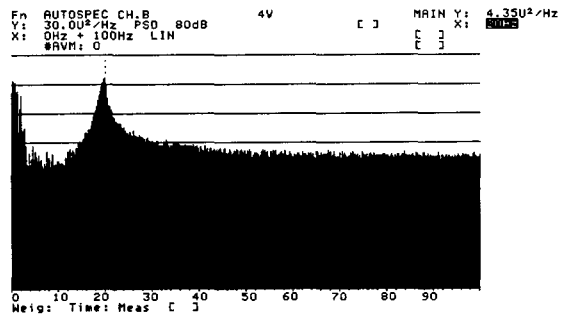


Fig. 5 Axial Natural Frequency at 4mm Gap

여기서, m 은 영구자석을 포함한 플라이휠의 총 질량이다.

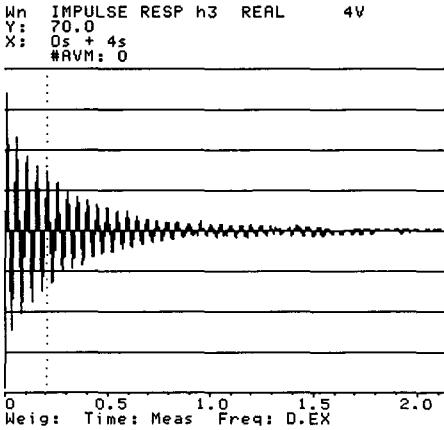


Fig. 6 Impulse Response Function at 4mm Gap

Fig. 6의 임펄스 응답함수는 감쇠비 ζ 를 알아내는데 이용된다. Fig. 5에서 f , Fig. 6에서 ζ 를 얻은 후 식 (1)을 이용하여 각 간극에 따른 축방향과 반경방향의 강성 k 와 감쇠계수 c 를 계산하였고 그 결과를 Fig. 7~10에 그래프로 나타내었다.

Fig. 7~ 8에서의 점선은 커브피팅(Curve Fitting)한 결과를 나타낸다.

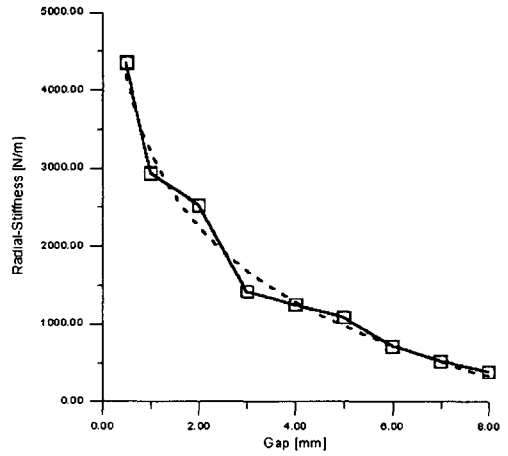


Fig. 8 Radial Stiffness

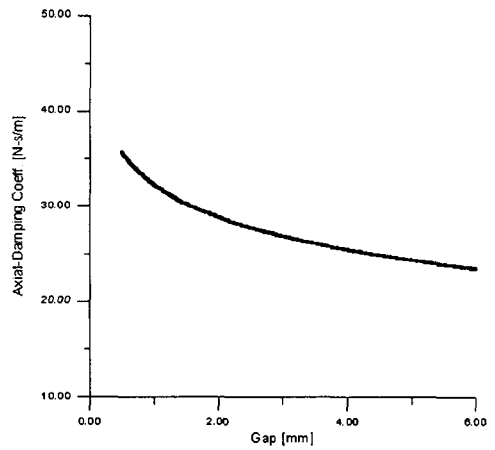


Fig. 9 Axial Damping Coefficient

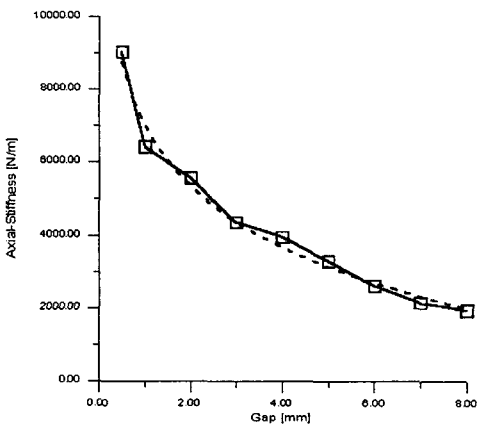


Fig. 7 Axial Stiffness

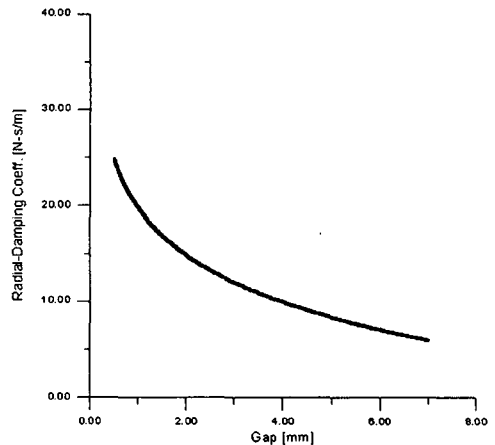


Fig. 10 Radial Damping Coefficient

3.3 실험식 유도과 결과정리

Fig. 7~10으로부터 간극을 변수로 하는 강성과 감쇠 계수의 실험식을 커브피팅을 이용해 유도하였다. 그 결과는 식 (2)~(5)와 같으며 단위는 강성은 [N/m], 감쇠계수는 [N-s/m]이다.

• 축방향 강성(Axial Stiffness) :

$$k_{Axial} = 7047.6 - 2435.41 \times \ln(t) \quad (2)$$

• 반경방향 강성(Radial Stiffness) :

$$k_{Radial} = 3220.71 - 1391.76 \times \ln(t) \quad (3)$$

• 축방향 감쇠계수(Axial Damping Coefficient) :

$$c_{Axial} = 32.2989 - 4.9284 \times \ln(t) \quad (4)$$

• 반경방향 감쇠계수(Radial Damping Coefficient) :

$$c_{Radial} = 19.8567 - 7.1226 \times \ln(t) \quad (5)$$

여기서 t 는 초전도체와 영구자석의 간극으로서 단위는 [mm]이다. 결과에서 알 수 있듯이 강성값은 부상력과 마찬가지로 간극이 작아질수록 커지는 것을 알 수 있으며 감쇠계수값도 같은 경향임을 알 수 있다. 반경방향의 강성값은 축방향 값의 약 40% 정도이며 반경방향 감쇠계수는 축방향의 약 45% 정도인 것으로 나타났다. 이러한 초전도 자기베어링의 동적 특성들은 쓰이는 영구자석의 자장세기나 초전도체의 성능과 형상에 따라 변할 것이다. 따라서 베어링의 강성을 높이기 위해서는 간극을 줄이는 방법 외에 영구자석의 자력증가나 초전도체의 임계전류 밀도를 증가시키는 방안이 연구되어야 한다.

4. 유한요소법을 이용한 시스템의 고유모드 해석

4.1 플라이휠의 설계

저장되는 에너지의 양은 회전속도의 제곱에 비례하므로 저장용량을 늘리기 위해서는 회전속도를 최대한 증가시켜야 한다. 회전시 작용하는 응력을 줄임으로써 회전속도를 증가시킬 수 있다. 회전시 플라이휠에 작용하는 응력을 최소화하기 위해 일정응력을 받는 플라이휠의 형상함수⁽⁶⁾를 이용하였다. 이 플라이휠은 50,000 rpm까지 회전이 가능하며 그 형상은 Fig. 11에 나타냈고 제원은 Table 1과 같다.

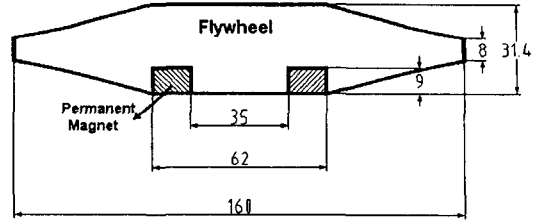


Fig. 11 Shape of Flywheel (Unit : mm)

Table 1 Specification of Flywheel

Mass(with P.M.)	1.2 kg
Outer Diameter	160 mm
Thickness	31.4 mm
Material	7075 Al Alloy

4.2 플라이휠과 영구자석의 고유모드 해석

시스템의 진동특성 파악을 위해 먼저 SMB-FESS의 주요요소인 플라이휠과 영구자석에 대해 각각 고유진동수(Natural Frequency)와 고유모드(Natural Mode) 해석을 수행하였다.

범용유한요소해석 프로그램인 I-DEAS를 이용하여 Fig. 11과 같은 형상의 플라이휠을 모델링하여 고유모드 해석을 수행하였다. 해석결과인 주요 고유진동수를 Table 2에 표시했다.

Table 2 Natural Frequencies of Components

	(unit : Hz)		
	1st N/F	2nd N/F	3rd N/F
Flywheel	5.075	9.024	12.522
Magnet	7.041	11.571	18.040

플라이휠이 작동영역내에서 탄성거동을 하게되면 그 제어가 어려워지게 된다. 일반적으로 회전체의 최고속도가 플라이휠의 첫 번째 굽힘모드의 70% 이내에 있을 때 강체 속으로 간주하는데⁽⁶⁾ 회전최고속도는 900Hz(50,000rpm)이 내이므로 이 플라이휠은 충분히 강체 거동(Rigid Behavior)을 할 것이라 판단된다.

4.3 전체 구조물의 고유모드 해석

위험속도(Critical Speed)는 가진력 함수의 주파수 중 하나가 계의 고유진동수와 일치하는 회전속도를 말하며,

이 주파수에서 공진이 일어나 휘링(whirling)의 진폭이 커져 제어가 어렵고 위험을 초래하게 된다⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

플라이휠-SMB를 로터-베어링 시스템으로 간주하고 SMB-FESS의 회전공진 주파수(Whirling Natural Frequency)를 알아내기 위해 전체 구조물의 모드 해석을 통해 시스템 고유진동수와 고유모드를 알아냈다. 이를 위해 "I-DEAS System Dynamics Analysis"를 사용하였는데 이는 기계계의 거동을 해석하기 위한 시스템 모델링 및 해석 프로그램이다⁽⁹⁾. 유한요소해석을 통해 얻어진 플라이휠과 영구자석의 고유진동수 및 고유모드들을 이용하여 주요 요소들을 정의하였다. 강성이 1.0E+6N/m인 볼트 커넥터를 이용하여 플라이휠과 영구자석을 결합하였고, 베어링커넥터를 이용하여 영구자석과 초전도체를 연결하였다. 베어링커넥터의 특성은 앞의 실험에서 측정된 강성과 감쇠계수 값을 이용하여 정의하였다. 초전도체는 실제로 고정되어 있으므로 경계조건을 이용하여 초전도체 요소를 지반에 고정시켰다. 이러한 방법으로 시스템 전체를 정의하고, 모달변수(Modal Parameter)를 이용하여 시스템의 고유진동수 및 가진에 대한 응답을 구한다. 이러한 방법으로 연결한 전체시스템 모델을 Fig. 12

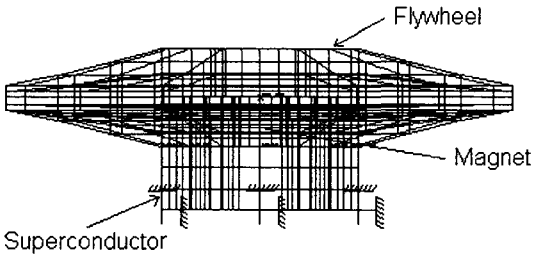


Fig. 12 Joined System Model

에 나타내었다.

간극에 따른 위험속도의 변화를 알아보고자 강성을 변화시키며 해석을 반복 수행하였다. 대표적으로 2mm 간격일때의 시스템의 특성과 해석결과를 나타내었다. 시

Table 3 System Characteristics at 2mm Gap

Mass	1.2 kg
Axial Stiffness	5,567 N/m
Radial Stiffness	2,527 N/m
Axial Damp. Coeff.	28.88 N-s/m
Radial Damp. Coeff.	14.92 N-s/m

스템의 특성은 Table 3과 같다.

해석결과와 하나인 주파수 응답함수(Frequency

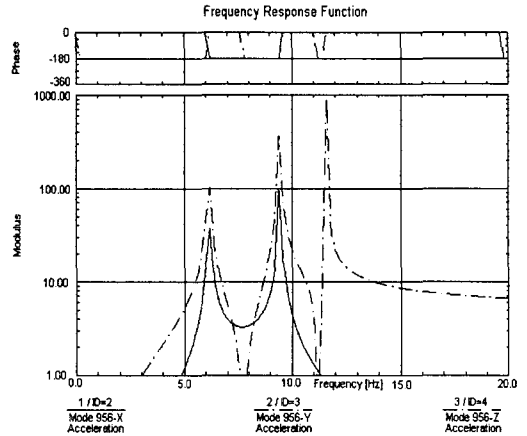


Fig. 13. Frequency Response Function

Response Function)를 Fig. 13에 나타냈다.

그림에서 점선으로 표시된 것은 축방향 위치에서의 반응이며 실선으로 표시된 것은 반경방향에서의 반응을 나타낸다. 여기에서 반경방향의 응답이 위험속도라 간주할 수 있는 휘링 고유진동수가 된다. 두 개의 강체 모드(Rigid-Body Mode)와 한 개의 굽힘모드(Bending Mode)가 발견되었다. 각각의 모드형상은 Fig. 14와 Fig. 15와 같으며 전체 결과를 Table 4에 정리하였다.

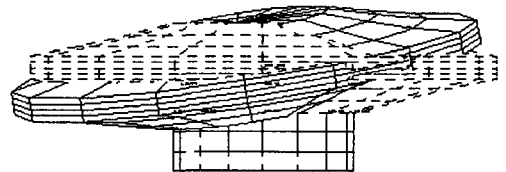


Fig. 14 The First Mode of System
(Conical Mode : 342 rpm)

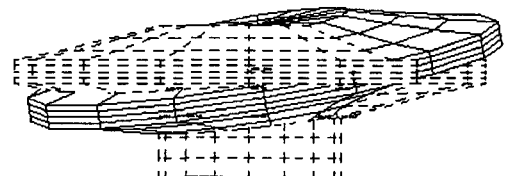


Fig. 15 The Second Mode of System
(Conical Mode : 525 rpm)

Table 4 Analysis Result at 2mm Gap

No.	Whirling Natural Frequency [rpm]	Mode Shape
1	342	Conical Mode
2	525	Conical Mode
3	304,500	1st Flywheel Bending Mode

Fig. 14~15에서 보듯이 첫 번째 모드는 베어링 위치를 절점으로 하는 원추형 강체 모드(Conical Mode)이며 두 번째 모드는 로터의 기하학적 중심 부근을 절점으로 하는 원추형 강체 모드이다. 세 번째 모드는 플라이휠의 첫 번째 굽힘모드인 것으로 나타났다. 이 중 주의해야 할 것은 첫 번째와 두 번째의 원추형 모드인데 이는 작동영역 안에서 위험속도가 일시적으로 존재하기 때문이다. 초기에 모터로 로터를 가속 회전시킬 때 위험속도인 342 rpm과 525 rpm 부근에서 주의가 요망되므로 이 영역을 지날 때까지는 빨리 통과할 수 있도록 하고 안내 베어링 등의 설치로 안정성을 높여야 한다. 그러나 에너지 저장 장치의 주요 회전속도는 3만~5만 rpm이므로 이 시스템은 작동영역 내에서 공진의 영향을 받지 않고 안정적으로 거동하리라 예상된다.

베어링의 강성에 따른 해석결과를 이용하여 위험속도 선도를 Fig. 16에 나타냈다.

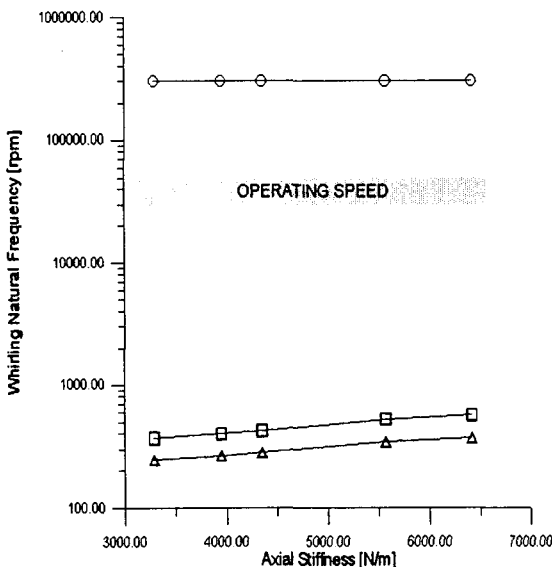


Fig. 16 Critical Speed Map

5. 결론

본 연구에서는 초전도 자기베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치의 진동특성을 실험과 유한요소해석을 통해 알아보았다. 충격가진실험을 통해 초전도 자기베어링의 강성 및 감쇠계수를 간극을 변화시켜가며 측정해 보았고, SMB-FESS를 로터-베어링 시스템으로 간주하여 유한요소법을 통한 전체 구조물의 고유모드 해석을 통해 시스템의 고유진동수를 얻어내 위험속도 해석을 하였다. 주요결과는 다음과 같다.

1. 실험결과 초전도 자기베어링의 강성과 감쇠계수는 초전도체와 영구자석간의 간극에 따라 반비례적으로 변화하며 반경방향의 값은 축방향 값의 약 40~45% 정도로 나타났다. 실험결과 각각에 대한 실험식을 유도하였다.
2. 플라이휠과 영구자석 요소의 고유모드해석 결과 플라이휠은 작동영역 내에서 강체 거동을 할 것이라 예상된다.
3. 위험속도 해석 결과 첫 번째와 두 번째 위험속도는 각각 베어링위치와 로터의 중심을 절점으로 하는 원추형 강체모드이며 2mm 간극일 때 그 값은 342rpm과 525rpm이다.
4. 처음에 모터로 로터를 가속시킬 때 위험속도 부근에서 주의가 요망되나 주 작동영역 내에서는 안정적으로 거동하리라 예상된다.

추후 연구되어야 할 과제는 모터/발전기로부터의 토크(Torque)에 의한 영향과 불평형질량에 대한 응답 등 시스템의 안정성에 대한 연구가 더 이루어져야 하며 시스템을 구동시키며 실험을 통한 진동특성 파악이 이루어져야 하겠다.

참고 문헌

1. 김찬중, 김기백, 박해웅, 홍계원, "초전도체를 이용한 에너지 저장장치," 한국원자력연구소, 1995.
2. H. Fukuyama, T. Takizawa, "Stiffness and Damping Coefficients for Superconducting Magnetic Bearings Using MPMG2-YBaCuO,"
3. Ryoichi Takahata, Hirochika Ueyama, "Characterization of Superconducting Magnetic Bearings (Vibration Damping and

- Hysteresis of Magnetic Force in Superconductor),”
4. D. J. Ewins, “Modal Testing,” John Wiley and Sons, 1984.
 5. A. C. Ugural, S. K. Fenster, “Advanced Strength and Applied Elasticity,” Elsevier, 251~252, 1981.
 6. 최상규, 김영철, 경진호, “플라이휠 에너지 저장 장치 회전체계의 동역학적 설계 및 해석,” 한국 소음 진동공학회 춘계학술대회논문집, 283~289, 1997.
 7. Fredric F. Enrich, “Handbook of Rotordynamics,” McGraw-Hill, 1992.
 8. John M. Vance, “Rotordynamics of Turbomachinery,” John Wiley and Sons, 1988.
 9. SDRC, “System Dynamics Analysis,” SDRC, 1990.