

플라이휠 시스템의 에너지 저장/발생시 동역학적 안정성연구

장응재*, 이수훈**

A Study on the Stability of the Flywheel System During the Storage and Generation of Energy

Woong Jae Chang*, Soo hun Lee**

ABSTRACT

A vibration in a high-speed machine may lead to machinery malfunction and even catastrophic failure. So solving the vibration problem is a fundamental requirement for the stability of the high-speed machine. The flywheel energy storage system using superconducting magnetic bearings is a device to store electrical energy as rotational kinetic energy by motor and to convert it to electrical energy by generator when necessary. The high-speed rotating flywheel has large amplitude at a critical speed. And it has an unstable behavior by the electric torque at the first stage of the energy generation. In this paper, the stability analysis is performed with an analytical model and equations of motion - which is considered the effect of the electric torque - to identify the stable driving condition and the dynamic behavior.

Key Words : Superconducting Magnetic Bearings(초전도 자기베어링), Flywheel Energy Storage System(플라이휠 에너지 저장장치), Electric Torque(전기적 토크), Stability Analysis(안정성해석)

1. 서론

에너지의 저장, 발생 및 변환에 사용되는 터빈 압축기 등의 회전기계의 현재 추세는 운전속도의 고속화를 통하여 고성능화를 추구하고 있다. 회전기계의 고속화에는 회전축의 진동문제가 따르게 된다. 이 진동은 회전기계의 효율 저하는 물론 기계의 파괴를 유발할 수 있다. 따라서 이의 해결은 피로파괴의 위험을 피할 수 있을 뿐만 아니라 기계의 효율 향상과 조용하고 안전한 운전에 기여할 수 있는 것이다.

초전도 자기베어링-플라이휠 에너지 저장장치

(SMB-FESS)는 효율적으로 에너지를 저장하고 에너지 손실을 최소화하기 위하여 80°K 정도의 임계온도에서 초전도 현상이 발생하는 원리를 이용한 초전도 자기베어링으로 플라이휠을 지지하고 있다. 초전도 자기베어링은 자기 안정성(Self-stabilization)을 가지기 때문에 기존의 전자석 자기베어링 시스템과는 달리 별도의 자세 제어 시스템을 갖지 않고도 고속에서 안정성을 유지할 수 있는 것으로 평가 받고 있다⁽¹⁾.

본 논문에 이용된 시스템(Fig. 1)은 20,000 rpm에서 65 Wh의 저장용량을 가지는 소형 플라이휠 에너지 저장장치로써 안정성과 용량증대를 위해서

* 아주대학교 대학원 기계공학과
** 아주대학교 기계 및 산업공학과

다중링 영구자석으로 형성된 초전도 자기베어링을 이용하였고, 모터/발전기의 고정자(Stator)는 플라이휠 상단에 부착된 회전자(Permanent magnet)와 5 mm의 간극을 갖는 무접촉 상태이다.

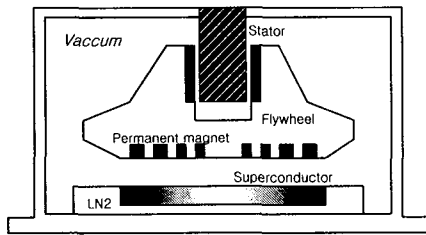


Fig. 1 Schematic diagram of SMB-FESS

회전체 시스템은 임의의 회전속도에서 큰 진폭을 나타내는 위험속도를 지니는데 작동영역 내에서 위험속도의 영향을 받아 회전자와 고정자가 충돌하게 되면 고속 회전에서는 심각한 문제를 야기할 수 있다. 또한 본 시스템은 에너지 저장장치의 특성상, 고속으로 회전하는 플라이휠을 순간적으로 감속하여 에너지를 발생시킨다. 이것은 플라이휠의 회전 반대방향으로 전기적 토크를 작용시켜 플라이휠을 감속하게 되는데, 이때 전기적 토크는 회전하는 플라이휠에 제동을 걸어주는 효과를 주어 거동을 불안정하게 한다. 따라서 동역학적 해석을 통한 시스템의 안정성 검증이 필수적이다.

김정근 등은 각각의 단일 링 영구자석의 자장 분포의 선형적인 합이 다중 링 영구자석의 자장 분포와 일치하지 않는 비선형성과 플라이휠의 구동 및 발전을 위한 영구자석의 영향을 고려하여 자기 베어링 파라미터들을 추정하였다⁽²⁾. 또 김종수 등은 초전도 자기베어링-플라이휠 시스템에 대한 운동방정식을 일정 회전속도에 대해서 유도하고 위험속도 해석과 불평형 응답 해석을 수행하였으나 실제 에너지 저장/발생시의 해석이 아닌 저속에서의 해석이었다⁽³⁾. 그밖에 국내·외적으로 초전도 자기베어링을 이용한 에너지 저장장치에 대해 활발한 연구의 수행으로 소용량 시작품까지 개발되었으나, 이들 역시 위험속도 해석과 불평형 응답 해석만으로 안정성해석을 수행하였다. 또 플라이휠을 가속 및 감속시키는 전기적 토크의 영향을 고려하지 않고 능동 자기베어링과 같은 부가적인 장치를 장착하여 진동을 저감시키고자 하고 있다⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

본 논문에서는 시스템의 안정성을 예측·검증하기 위하여 플라이휠을 가속 및 감속시키는 전기적 토크의 영향을 반영한 초전도 자기베어링-플라이휠 시스템의 운동방정식을 유도하였다. 실제 에너지 저장/발생시의 운전조건을 이용하여 플라이휠의 거동을 예측하고 안정성 해석을 수행하였다.

2. 시스템 모델링

초전도 자기베어링-플라이휠 시스템에서 다중 링 영구자석에 의해 형성된 초전도 자기베어링은 Fig. 2와 같이 강성과 감쇠, 작용점 위치로 모델링할 수 있다⁽²⁾.

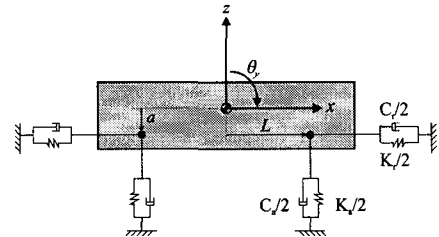


Fig. 2 Modeling of flywheel-bearing system

Fig. 2에서 K_r 과 C_r 은 반경방향 강성과 감쇠계수이고, K_a 와 C_a 는 축방향 강성과 감쇠계수이다. L 은 질량중심에서 수직 베어링 작용점까지의 수평 거리이며, a 는 수평 베어링 작용점까지의 수직 거리이다. 라그랑지 식과 오일러 식을 이용하여 자이로스코프 효과와 에너지 저장/발생시 모터/발전기의 고정자와 플라이휠 상단에 부착된 회전자 사이에 발생하는 전기적 토크를 고려한 시스템의 운동방정식을 식(1)과 같이 유도하였다⁽⁶⁾⁽⁷⁾.

$$M\ddot{q} + (G + D)\dot{q} + (H + S)q = Q \quad (1)$$

여기서,

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_a \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} me\Omega^2 \cos\Omega t \\ me\Omega^2 \sin\Omega t \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G = \Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_p \\ 0 & 0 & -J_p & 0 \end{bmatrix} \quad H = \Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_p \\ 0 & 0 & -J_p & 0 \end{bmatrix}$$

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

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

$$\mathbf{q} = \{x \quad y \quad \theta_x \quad \theta_y\}^T$$

식(1)에서 \mathbf{M} 은 관성행렬, \mathbf{D} 는 감쇠행렬, \mathbf{S} 는 강성행렬이고, \mathbf{G} 는 관성축과 회전축의 불일치로 인한 자이로스코프 행렬, \mathbf{H} 는 에너지 저장/발생시의 모터/발전기의 고정자와 플라이휠 상단에 부착된 회전자 사이에 발생하는 전기적 토크에 의한 회전속도의 가속 및 감속을 반영한다. 또 불평형 질량이 질량중심 평면상에 존재한다고 가정하면 불평형량 me 에 의한 가진력은 회전 모멘트 항은 존재하지 않고 x, y 방향 가진력만 회전속도의 함수로 표현할 수 있다. 초전도 자기베어링은 인력과 척력을 동시에 지니기 때문에 축방향으로는 안정하고, 반경방향의 거동이 시스템 안정성에 중요하므로 축방향 자유도는 제외하였다.

해석에 사용된 플라이휠의 물성치와 베어링 파라미터의 값을 Table 1 에 나타냈다.

Table 1 Properties of flywheel and bearings

Properties	Values
m	13.52 Kg
J_l	0.0657 Kg-m ²
J_p	0.1072 Kg-m ²
K_a	87449.3 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
e	0.000058 m

강성과 감쇠계수, 작용점 위치와 같은 베어링 파라미터는 모달 실험(Modal testing)을 통해 얻은 모달 파라미터와 운동방정식을 이용해 구한 해석

적 모달 파라미터를 일치시키도록 하는 베어링 파라미터를 탐색하는 방법을 이용하여 추출하였다⁽²⁾. 동역학적 안정성 해석시에는 초전도 자기베어링을 선형 강성과 감쇠로 묘사할 수 있을 정도로 플라이휠의 거동이 작다고 가정하였으며, 관심있는 해석속도까지는 정적/동적 상태에 따른 베어링 특성의 변화가 거의 없다고 가정하여 정지상태에서 추출한 베어링 강성과 감쇠계수를 이용하였다⁽⁴⁾. 불평형 질량은 회전감속 실험(Spin-down test)의 결과와 해석결과를 이용해 불평형량을 유추하였다.

약 1,200 rpm 에서부터 회전감속실험을 수행하였으며 실험결과 375 rpm 의 위험속도에서 0.7 mm 의 변위가 검출되었다. 식 (1)의 운동방정식을 이용하여 시뮬레이션한 결과 393 rpm 에서 0.73 mm 의 변위가 검출되어 실험결과와 유사하였다⁽³⁾.

3. 에너지 저장/발생시 안정성해석

3.1 운전조건

플라이휠 에너지 저장장치에서 고정자와 회전자는 에너지 저장시에는 전동기, 에너지 발생시에는 발전기로 작용을 한다. 전동기와 발전기의 전력은 다음과 같이 주어진다.

$$P = \tau \cdot \Omega \quad (\text{watt}) \quad (2)$$

여기서, τ 는 회전자에 작용하는 토크로 관성모멘트와 각가속도의 곱으로 표현된다.

전력이란 단위 시간당 일의 증가 비율을 말하는 것으로, 에너지 저장장치의 효율적인 활용을 위해서는 각가속도를 크게 하여 전력을 크게 하는 것이 좋다. 그러나 각가속도는 플라이휠의 거동에 많은 영향을 주는 인자임을 고려할 때 시스템의 안정성을 유지할 수 있는 운전조건 결정은 중요한 과업임에 틀림없다.

3.2 에너지 저장시 안정성해석

에너지 저장시의 경우에는 위험속도에서의 플라이휠의 거동을 고려하여 안정성 해석을 수행해야 한다. 플라이휠을 가속시키는 전기적 토크가 플라이휠의 회전방향과 동일한 방향으로 작용하므로 위험속도에서의 거동특성이외에는 불안정한 거동이 일어나지 않는다.

플라이휠이 정지상태에서 전동기의 전기적 토

크로 인하여 가속되어 20,000 rpm 까지 회전속도가 증가하는 것을 시뮬레이션 하였다. 해석은 시스템 설계조건인 20,000 rpm 까지 가속시키는 시간을 3

분으로 하여 반경방향 변위응답을 예측하였다. 또 3 분을 기준으로 가속도 크기에 따른 플라이휠의 거동특성을 알아보기 위하여 가속시간 1 분과 5 분의 조건에서 응답을 예측하였다. Fig. 3 은 플라이휠 중심에서의 반경방향 변위를 나타낸다.

0 rpm 에서 20,000 rpm 까지 가속시키는 가속시간이 짧을수록, 즉 플라이휠에 작용하는 전기적 토크가 클수록 플라이휠의 반경방향 변위가 작아지고, 위험속도는 높아진다. 이러한 사실은 Dimarogonas 와 Genta 가 언급한 위험속도를 지나는 회전체의 가속이론에 부합한다⁽⁸⁾⁽⁹⁾.

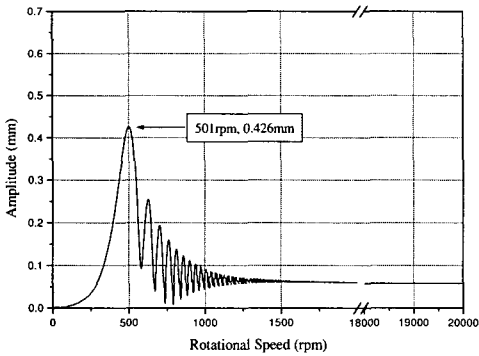
에너지 저장시의 시스템의 안정성 해석을 위해서는 고정자와 회전자인 플라이휠의 접촉이 예상되는 플라이휠 상단에서의 변위를 고려해야 한다. 가속시간이 1 분일 경우에는 플라이휠 상단에서의 최대 변위가 0.488 mm 이고, 3 분일 경우에는 0.636mm, 5 분일 경우에는 0.70mm 로 5.0mm 의 간극에 크게 못 미치는 결과이다. 따라서 시스템은 에너지 저장시에 안정성 있다고 할 수 있다.

3.3 에너지 발생시 플라이휠 거동특성

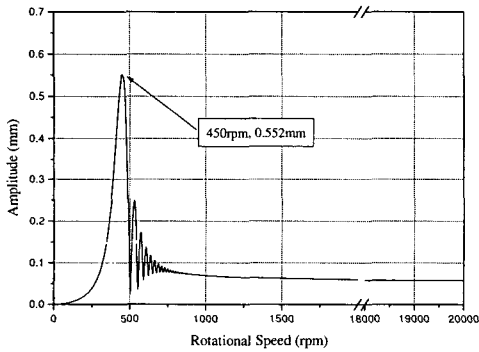
에너지 발생시의 경우에는 위험속도에서의 플라이휠의 거동뿐만 아니라 일정 속도로 회전하는 플라이휠을 감속시키는 에너지 발생 초기의 거동을 고려하여야 한다. 고속 회전하는 플라이휠을 감속시키는 전기적 토크가 플라이휠의 회전방향과 반대방향으로 작용하므로 플라이휠을 제동하는 효과를 주며 불안정한 거동이 일어날 것이다.

20,000 rpm 으로 회전하고 있는 플라이휠에 에너지 발생을 목적으로 회전 반대방향으로 전기적 토크를 주어 0 rpm 까지 감속하는 것을 시뮬레이션 하여 감속도 크기에 따른 플라이휠의 거동특성을 알아보았다.

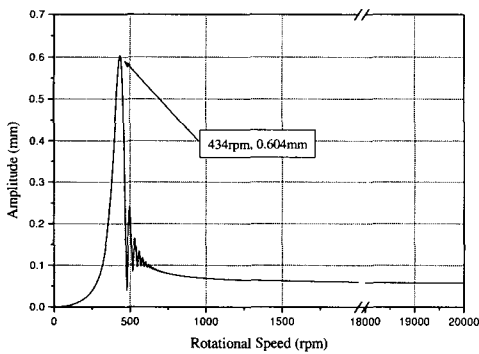
플라이휠 중심에서의 반경방향 변위를 나타낸 Fig. 4 에서 보듯이 전기적 토크가 작용하는 초기에 응답이 크게 나타난 후 안정적인 거동을 하고 위험속도에서 다시 불안정 거동을 한다. 에너지 발생초기의 응답이 위험속도에서의 응답보다 상대적으로 아주 큰 값을 갖는 것을 알 수 있다. 따라서 에너지 발생시에는 시스템의 안정성 유지를 위해 감속초기의 응답에 주의를 해야 한다. 또, 에너지 발생초기의 감속도가 클수록, 즉 전기적 토크가 클수록 플라이휠의 불안정한 거동이 오랫동안 지속되는 것을 보여 준다.



(a) 1 min.

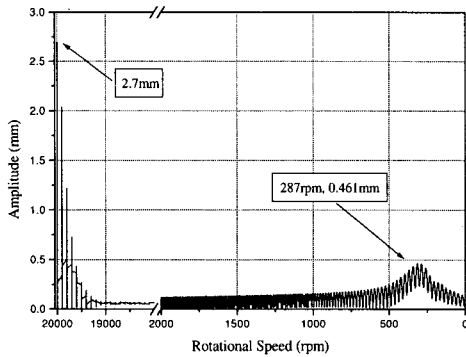


(b) 3 min.

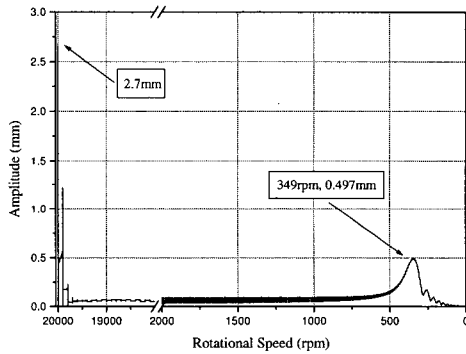


(c) 5 min.

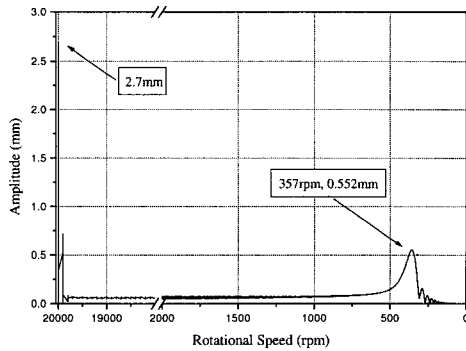
Fig. 3 Response of the flywheel during acceleration



(a) 1 min.



(b) 3 min.



(c) 5 min.

Fig. 4 Response of the flywheel during deceleration

3.4 에너지 발생시 안정성해석

에너지 저장장치의 역할 중에서 중요한 한가지는 에너지 발생시에 안정적인 전력의 공급이다.

이에 따라, 에너지 발생시 전력을 일정하게 유지하기 위한 속도식과 가속도식을 식(2)로부터 유도하였다.

$$\Omega = \left\{ -2 \frac{P}{J_p} t + \omega_0^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{rad/sec}) \quad (3)$$

$$\dot{\Omega} = -\frac{P}{J_p} \left\{ -2 \frac{P}{J_p} t + \omega_0^2 \right\}^{-1/2} \quad (\text{rad/sec}^2) \quad (4)$$

여기서, ω_0 는 에너지 발생초기의 회전속도이다.

식(4)는 에너지 발생시 일정한 전력을 발생하기 위해서는 플라이휠의 회전속도가 감소함에 따라 감속도의 크기가 커져야 한다는 것을 말해주고 있다. 이는 플라이휠에 작용하는 전기적 토크 역시 커지는 것을 의미한다. 식(4)의 감속조건을 이용하여 100, 200, 300 watt 의 일정한 전력을 얻을 수 있는 경우에 대해서 에너지 발생시 안정성 해석을 수행하였다.

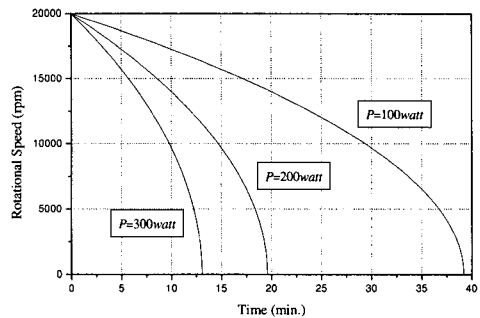
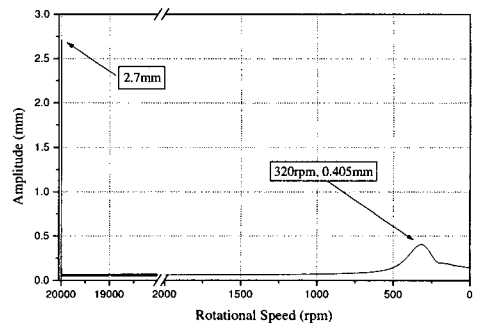
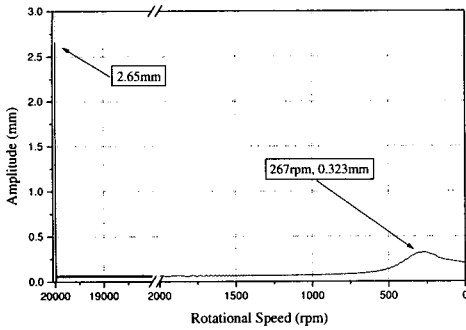


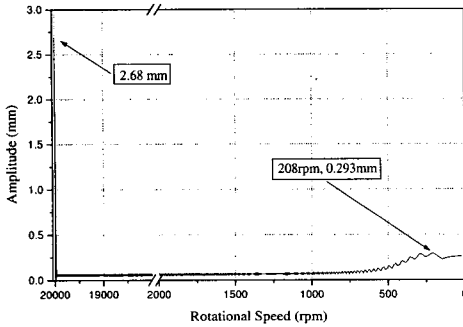
Fig.5 Deceleration curve



(a) 100 watt



(b) 200 watt



(c) 300 watt

Fig. 6 Response of the flywheel during deceleration for constant power

Fig. 5 는 전력이 100, 200, 300 watt 일 때의 시간에 대한 감속곡선을 나타낸 것이고, Fig. 6 은 플라이휠 중심에서의 반경방향 변위를 나타낸다. 모든 경우에서 플라이휠 상단의 반경방향 최대변위가 5 mm 의 간극 보다 작은 2.7 mm 이하이며, 이로써 시스템은 운전조건 하에서 안정성을 유지할 것으로 예상된다.

4. 결론

본 논문에서는 초전도 자기베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치에서 고속 회전하는 플라이휠의 거동을 불안정하게 하는 요인들에 대해 규명하고 에너지 저장시와 발생시의 동역학적 안정성에 관해 연구하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

1. 플라이휠을 가속 및 감속시키는 전기적 토크의 영향, 즉 회전속도 가속/감속에 의한 가진력과 가진 토크항을 고려하여 초전도 자기베어링-플라이휠 시스템의 운동방정식을 유도하였다.
2. 실제 운전조건에서의 시뮬레이션을 통하여 에너지 저장/발생시의 감속도의 크기에 따른 플라이휠의 거동특성을 알아보고, 안정성해석을 수행하였다.
3. 에너지를 발생하는 동안 일정한 전력을 얻을 수 있는 속도식과 가속도식을 유도하고 그 운전조건에서 안정성해석을 하였다. 그 결과 에너지 발생초기의 최대변위가 2.7 mm 로 회전자와 고정자의 간극보다 작아 시스템이 안정성을 유지할 것으로 예측된다.

참고문헌

1. 김찬중, 김기백, 백해웅, 홍계원, "초전도체를 이용한 에너지 저장장치," 한국원자력연구소, 1995.
2. 김정근, 이수훈, "초전도 자기베어링-플라이휠 시스템의 베어링 모델링," 한국소음진동공학회, 제 9 권, 제 5 호, pp. 891~898, 1999.
3. 김종수, 이수훈, "초전도 자기베어링-플라이휠 시스템의 회전체 해석 및 실험," 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 9 호, pp. 104~109, 1999.
4. 김영철, 최상규, 성태현, 이준성, "고온초전도베어링의 회전체역학적 특성," 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 1999.
5. Y. Miyagawa, H. Kameno, R. Takahata, H. Ueyama, "A 0.5kWh Flywheel Energy Storage System using a High-Tc Superconducting Magnetic Bearing," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL. 9, NO. 2, pp. 996~999, 1999.
6. Fredric F. Ehrich, "Handbook of Rotordynamics," McGraw-Hill, pp. 2.13~28, 1992.
7. John M. Vance, "Rotordynamics of Turbomachinery," John Wiley & Sons, 1988.
8. Andrew Dimarogonas, "Vibration for Engineers," Prentice Hall, pp. 544~545, 1996.
9. Giancarlo Genta, "Vibration of Structures and Machines," Springer-Verlag, pp. 235~237, 1995.