

고온초전도베어링의 회전체역학적 특성

성태현, 이준성, 한영희, 김영철, 최상규, 김상준
 한전 전력연구원 전력계통연구소, 한국기계연구원 구조시스템연구부 회전체연구그룹

Rotordynamic Performance of High- T_c Superconductor Bearings

T-H Sung, J-S Lee, Y-H Han, Y-C Kim, S-K Choi, and S-J Kim
 Power Utilization Technology Group, Power System Laboratory,
 Korea Electric Power Research Institute, KEPCO
 *Rotordynamics Research Group, Structural Systems Department,
 Korea Institute of Machinery & Materials

sungth@kepri.re.kr

Abstract — The dynamic properties of the high- T_c superconductor journal bearings used in the KEPRI flywheel energy storage system was experimentally estimated by using the imbalance excitation method. The test reveals that the superconductor bearings have very low stiffness compared to that of typical oil film bearings with similar geometry and almost the same amount of damping as in roller bearings, which may not be helpful for the system to pass through the critical speeds. However, it was found out that the cross-coupled stiffness and damping terms were almost negligible so that the system could be more stable than the one using oil film bearings. Also, with proper design of the rotor-bearing system and accurate balancing of the rotor, the high- T_c superconductor bearing is one of the most viable alternatives to the conventional ones due to its oil-free, non-contact running capability in a vacuum environment, which is literally essential for highly efficient flywheel energy storage systems.

1. 서론

최근 $10^4 A/cm^2$ 이상의 임계전류밀도를 갖는 덩어리 고온초전도체가 개발되어, 플라이휠 에너지 저장장치에 응용하기 위한 고온초전도 베어링 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 한전전력연구원에서 세계 최초로 수평형 로터에 적용시켜 운전에 성공한 초전도베어링은 반경방향과 축방향으로 동시에 하중을 지지할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 한편, 이러한 초전도베어링을 플라이휠 에너지 저장장치에 응용하기 위해서는 베어링의 하중 지지능력이나 강성 및 감쇠력과 같은 베어링의 정·동특성을 파악하는 것이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 이미 개발된 초전도베어링의 동특성을 파악하기 위하여 초전도 베어링 동특성 실험장치를 제작하여, 정지상태의 회전체에 대해 충격시험법(Impact Test)에 의해 고유진동수 및 동적 계

수를 측정하였으며, 이를 토대로 이 회전체에 대한 회전체동역학적 해석을 수행하였다. 그리고 불평형응답법(Unbalance Response Method[3,4])을 이론적으로 검토하고, 실제로 회전체를 운전시키면서 이 방법에 의해 초전도베어링의 동적 계수를 추출하였다.

2. 초전도베어링 동특성 실험장치

초전도베어링 실험장치를 그림 1과 같이 제작하여 정반 위에 설치하였다. 그림 2는 부상시켜 회전하고 있는 초전도베어링 실험장치의 사진이다. 이 실험장치는 회전체의 무게를 11~31 kg까지 변화시킬 수 있도록 축의 가운데에 부가질량(디스크)을 달 수 있도록 하였다. 표 1은 부가질량 부착에 따른 회전축의 질량을 정리한 것이다. 베어링의 저어널은 높이 25 mm의 실린더형 Nd-B-Fe 자석을 N-S/S-N/N-S/S-N의 배열로 끼워 구성하였으며, 자석과 자석 사이에는 두께 3 mm의 연철 디스크가 끼워졌다. Position guide는 액체질소로 초전도베어링을 냉각하는 동안 초기 위치를 잡아주는 역할을 한다. 냉각 후에는 position guide를 제거하게 된다. AC servo 모터로 회전체를 구동하며, 근접센서를 이용하여 회전축의 변위를 측정하도록 하였다.

3. 회전체계의 기초 진동실험

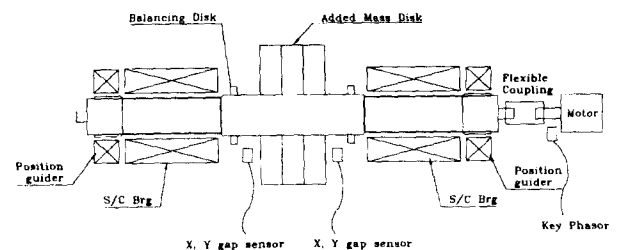


Fig. 1. Superconductor bearing test rig layout.

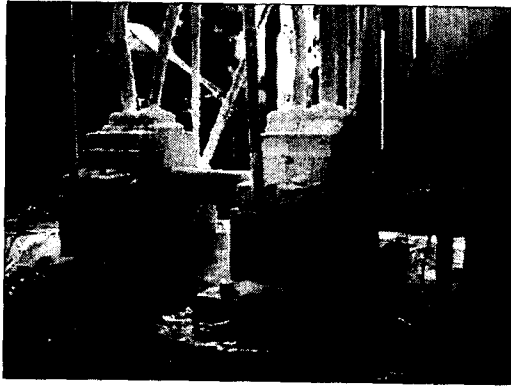


Fig. 2. Superconductor bearing test rig.

시험 회전체가 순수하게 강체모드로 거동할 수 있는 운전속도 범위를 파악하기 위해서 축의 굽힘 고유진동수를 측정하였다. 먼저 유한요소법을 이용하여, 축 전체가 한 재료로 이루어진 것으로 가정하여 free-free 상태에서 축의 고유진동수를 계산하여 보니, 디스크가 3개 부착되었을 때 축의 1차 굽힘 고유진동수는 34,032 rpm으로 예측되었다. 그러나 실제 회전체는 축에 자석을 떨어넣은 형태로 조립되어 있으므로 이보다 크게 떨어질 가능성이 많다. 따라서 실제 조립된 축을 실에 매달아 놓고 free-free 상태에서 impact test를 수행하였다. 그림 3은 FRF 측정 예이며, 표 2는 측정결과를 요약한 것인데, 예상대로 계산치보다 약 40% 이상 공진점이 떨어짐을 확인하였다. 따라서 표 2에서 측정된 고유진동수의 30% 이하의 속도까지는 충분히 운전이 가능하리라 판단된다.

초전도 베어링 실험장치의 강체 고유진동수를 예측하고 정지상태에서 베어링의 동적 계수를 알아보기 위하여 회전체를 초전도베어링으로 부양시킨 후 정지된 상태에서 impact test를 수행하였다. 그림 4, 5는 1번 베어링에서 x방향으로 가진하여 x 방향으로 시간응답과 주파수응답을 측정한 예이다. 결국 시스템의 고유진동수는 1번 베어링에서 18.5 Hz, 2번 베어링에서 30.0 Hz로 나타났으며, 이에 따른 베어링 강성은 1번 베어링이 70,000 N/m, 2번 베어링이 200,000 N/m로 추정된다. 그리고 베어링의 감쇠비는 0.03~0.05 정도로 낮은 값으로 측정되었다. 강성 및 감쇠의 연성항은 거의 없는 것으로 보인다

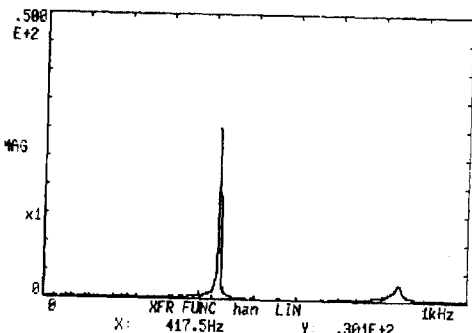


Fig. 3. Flexible mode FRF measurement of the rotor.

Table 1. Mass configurations of the test shaft.

	M(kg)	$I_p(\text{kgm}^2)$	$I_t(\text{kgm}^2)$	M(kg)
axle	11.052	0.0043096	0.334115	10.92
+1 disk	17.785	0.0408096	0.352715	17.62
+2 disks	24.518	0.0773096	0.374615	24.33
+3 disks	31.251	0.1138096	0.402495	31.03

Table 2. 1st bending natural frequency of the rotor at free-free.

	Hz	rpm
디스크 미부착시	417.5	25050
부가질량 1개 부착시	357.5	21450
부가질량 2개 부착시	340	20400
부가질량 3개 부착시	332.5	19950

4. 회전체계의 동적거동 예측

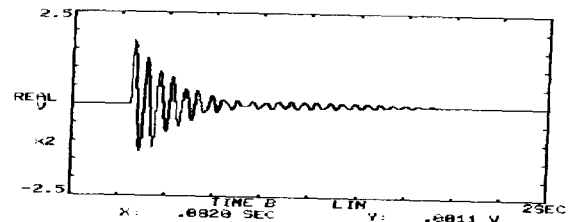


Fig. 4. Impact time response. (X1,X1)

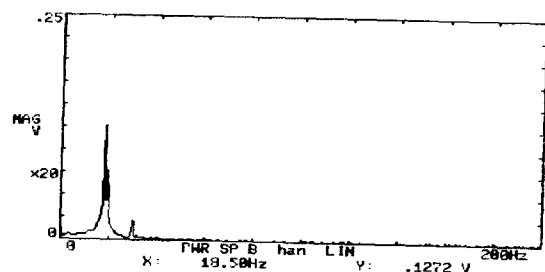


Fig. 5. Impact frequency response. (X1,X1)

우선 회전체계의 동적 거동을 예측하기 위하여 비 감쇠 고유진동수 해석을 수행하였다. 회전체계를 그림 6과 같이 모델링 하면 다음 식 (1)과 같이 된다.

$$M\ddot{q}_k + (\Omega G + C)\dot{q}_k + Kq_k = F_k \quad (1)$$

여기서,

$$M = \frac{1}{(l_1 + l_2)^2} \begin{bmatrix} Ml_2^2 + I_1 & 0 & Ml_1l_2 - I_1 & 0 \\ 0 & Ml_2^2 + I_1 & 0 & Ml_1l_2 - I_1 \\ Ml_1l_2 - I_1 & 0 & Ml_1^2 + I_1 & 0 \\ 0 & Ml_1l_2 - I_1 & 0 & Ml_1^2 + I_1 \end{bmatrix}$$

$$G = \frac{1}{(l_1 + l_2)^2} \begin{bmatrix} 0 & -I_p & 0 & I_p \\ I_p & 0 & -I_p & 0 \\ 0 & I_p & 0 & -I_p \\ -I_p & 0 & I_p & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{xx}^1 & K_{xy}^1 & 0 & 0 \\ K_{yx}^1 & K_{yy}^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{xx}^2 & K_{xy}^2 \\ 0 & 0 & K_{yx}^2 & K_{yy}^2 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} C_{xx}^1 & C_{xy}^1 & 0 & 0 \\ C_{yx}^1 & C_{yy}^1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{xx}^2 & C_{xy}^2 \\ 0 & 0 & C_{yx}^2 & C_{yy}^2 \end{bmatrix}$$

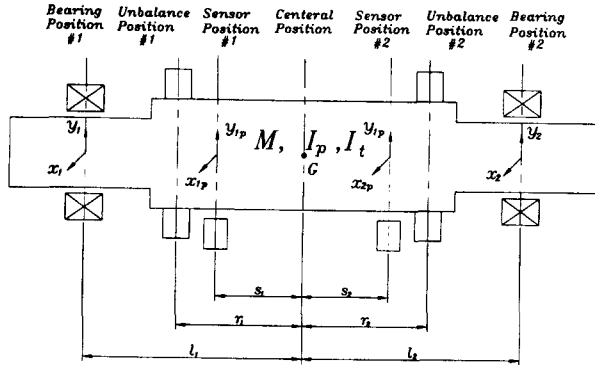


Fig. 6. Modeling of the rotor-bearing system.

표 1의 각각의 회전체가 다음 식 (2)~(5)의 동적 계수로 가정된 초전도베어링 위에서 운전된다 고 가정하였을 때 Campbell 선도를 그렸다.

$$K_1 = \begin{bmatrix} 150000 & 0 \\ 0 & 180000 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 160000 & 0 \\ 0 & 120000 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 200 \end{bmatrix} \quad (4) \quad C_2 = \begin{bmatrix} 150 & 0 \\ 0 & 300 \end{bmatrix} \quad (5)$$

그림 7은 디스크가 없을 때의 Campbell 선도이고, 그림 8은 디스크를 3개 달았을 때의 Campbell 선도이며, 모두 2,000 rpm 이하에서 2개의 강체 모드 공진점을 만나게 됨을 알 수 있다. 그림 9는 1, 2차 전진 강체 고유모드 형상을 그린 것이다.

불평형 응답 해석을 통하여 초전도베어링 회전체의 동적 응답을 살펴보았다. 그림 10은 베어링을 식 (2)~(5)의 동적 계수로 가정하고 불평형량을 다음 식 (6)과 같이 가정하였을 때의 디스크를 부착하지 않은 상태에서의 불평형 응답선도를 나타낸 것이며, 그림 11은 이 때의 Orbit 형상을 나타낸다.

$$\begin{aligned} m_1 &= 4g & \phi_1 &= 0 \text{ deg} \\ m_1 &= 6g & \phi_1 &= 180 \text{ deg} \end{aligned} \quad (6)$$

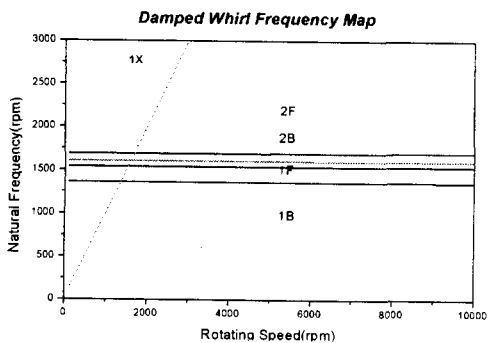


Fig. 7. Campbell diagram(without disk).

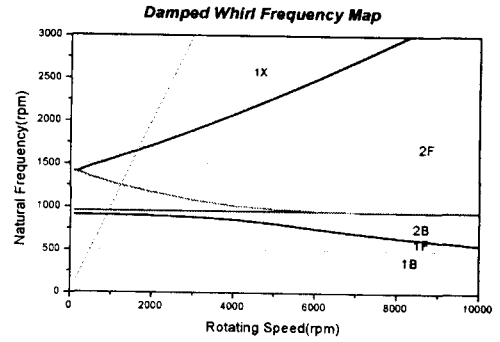
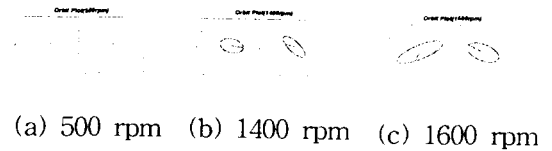


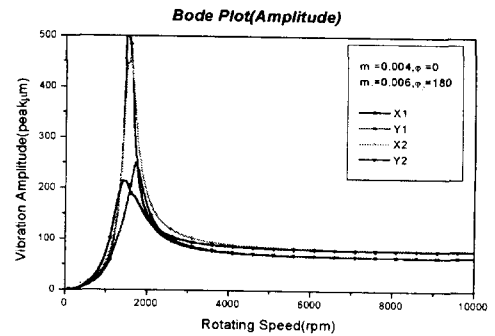
Fig. 8. Campbell diagram(with 3 disk).



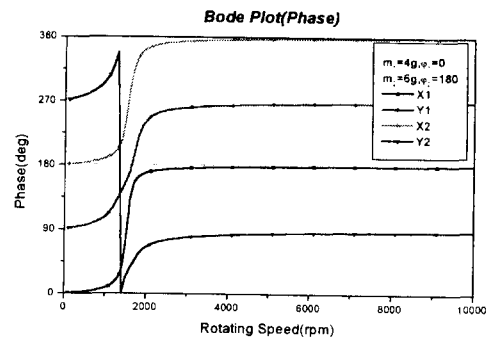
(a) 500 rpm (b) 1400 rpm (c) 1600 rpm

(d) 2000 rpm (e) 9000 rpm

Fig. 9. Mode shapes of the rotor.



(a) Amplitude



(b) Phase

Fig. 10. Unbalance response plot.

회전체는 1,000~2,000 rpm 사이에 2개의 공진점을 만나게 되며, 이후 10,000 rpm까지는 안정된 회전을 하게 됨을 알 수 있다.

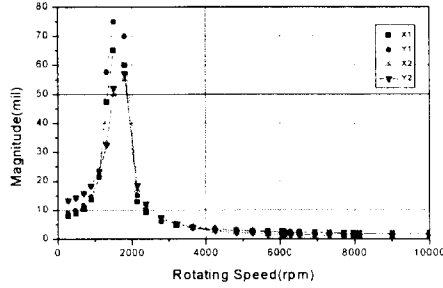
그림 12는 초전도베어링 실험장치를 10,000

rpm까지 실제로 운전시키면서 주파수 응답을 측정 한 것이다. 1,000~2,000 rpm 사이에서 공진 현상 이 발생하며, 공진을 통과한 후 10,000 rpm까지는 정속하게 회전함을 확인하였다.

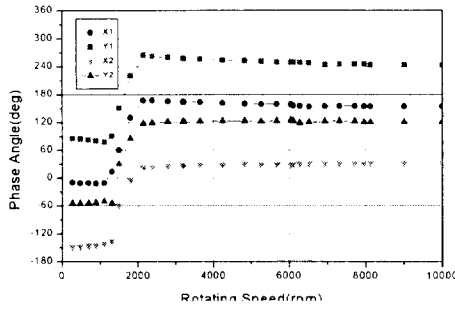


(a) 1st Forward (b) 2nd Backward

Fig. 11. Unbalance response orbit plot.



(a) Amplitude



(b) Phase

Fig. 12. Running test.

5. 베어링 동적 계수 규명 실험

회전체가 회전하고 있을 때의 초전도베어링 동적 계수를 규명하기 위하여 불평형응답법[3,4]을 사용하였다. 불평형응답법은 식 (1)로부터 불평형 힘 F_k 와 그 응답 q_k 를 측정함으로써 베어링 동적 계수 K 와 C 를 역으로 알아내는 방법이다.

베어링 지점에서의 반력과 불평형 지점에서의 가진력은 다음의 힘 관계식이 성립한다.

$$F_k = T_f F_u \quad (7)$$

여기서,

$$T_f = \frac{1}{l_1 + l_2} \begin{bmatrix} l_2 + r_1 & 0 & l_2 - r_2 & 0 \\ 0 & l_2 + r_1 & 0 & l_2 - r_2 \\ l_1 - r_1 & 0 & l_1 + r_2 & 0 \\ 0 & l_1 - r_1 & 0 & l_1 + r_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$F_u = R\Omega^2 \begin{bmatrix} m_1 \cos(\Omega t - \Phi_1) \\ m_1 \sin(\Omega t - \Phi_1) \\ m_2 \cos(\Omega t - \Phi_2) \\ m_2 \sin(\Omega t - \Phi_2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

그리고 회전체가 강체 모드를 가진다고 가정하면, 베어링 지점에서의 동적 응답과 센서로부터 측

정된 동적 응답은 다음의 관계식이 성립한다.

$$q_k = T_q q_p \quad (10)$$

이 때,

$$T_q = \frac{1}{s_1 + s_2} \begin{bmatrix} s_2 + l_1 & 0 & s_1 - l_1 & 0 \\ 0 & s_2 + l_1 & 0 & s_1 - l_1 \\ s_2 - l_2 & 0 & s_1 + l_2 & 0 \\ 0 & s_2 - l_2 & 0 & s_1 + l_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$q_p = \begin{bmatrix} X_{1p} \cos(\Omega t - \Phi_{1px}) \\ Y_{1p} \cos(\Omega t - \Phi_{1py}) \\ X_{2p} \cos(\Omega t - \Phi_{2px}) \\ Y_{2p} \cos(\Omega t - \Phi_{2py}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서 $\Phi_{1px}, \Phi_{1py}, \Phi_{2px}, \Phi_{2py}$ 는 각각의 센서에서 측정된 불평형 응답의 각위치를 나타내고, $X_{1p}, Y_{1p}, X_{2p}, Y_{2p}$ 는 그 크기를 나타낸다.

식 (1)에서 회전속도를 Ω 로 두고 Fourier 변환하면, 주파수영역에서의 시스템 모델은 다음과 같이 된다.

$$[K - \Omega^2 M + j\Omega(\Omega G + C)]Q(j\Omega) = F(j\Omega) \quad (13)$$

이 식을 실수부와 허수부로 나누어 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} K - M\Omega^2 & -\Omega(\Omega G + C) \\ \Omega(\Omega G + C) & K - M\Omega^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q^r \\ Q^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^r \\ F^i \end{bmatrix} \quad (14)$$

이때, F^r, F^i, Q^r, Q^i 는 다음과 같이 표현된다.

$$F^r = T_f U^r \quad (15) \quad F^i = T_f U^i \quad (16)$$

여기서

$$U^r = R\Omega^2 \begin{bmatrix} m_1 \cos(\Phi_1) \\ m_1 \cos(\Phi_1 + 90) \\ m_2 \cos(\Phi_2) \\ m_2 \cos(\Phi_2 + 90) \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$U^i = -R\Omega^2 \begin{bmatrix} m_1 \sin(\Phi_1) \\ m_1 \sin(\Phi_1 + 90) \\ m_2 \sin(\Phi_2) \\ m_2 \sin(\Phi_2 + 90) \end{bmatrix} \quad (18)$$

그리고,

$$Q^r = T_q S^r \quad (19) \quad Q^i = T_q S^i \quad (20)$$

여기서

$$S^r = \begin{bmatrix} X_{1p} \cos(\Phi_{1px}) \\ Y_{1p} \cos(\Phi_{1py}) \\ X_{2p} \cos(\Phi_{2px}) \\ Y_{2p} \cos(\Phi_{2py}) \end{bmatrix} \quad (21) \quad S^i = - \begin{bmatrix} X_{1p} \sin(\Phi_{1px}) \\ Y_{1p} \sin(\Phi_{1py}) \\ X_{2p} \sin(\Phi_{2px}) \\ Y_{2p} \sin(\Phi_{2py}) \end{bmatrix} \quad (22)$$

식 (14)에서 만약 이미 알고 있는 불평형량과 그 응답을 이용하게 되면 다음 식에 의해 베어링 동적 계수를 구할 수 있게 된다.

$$KQ^r - \Omega CQ^i = F^r + \Omega^2 MQ^r + \Omega^2 GQ^i = P^r \quad (23)$$

$$KQ^i + \Omega CQ^r = F^i + \Omega^2 MQ^i - \Omega^2 GQ^r = P^i \quad (24)$$

만약 베어링 동적 계수의 연성항(cross-couple term)이 무시될 수 있다면, 식 (23)과 (24)는 다음의 식들과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Q_{1x}^r & -Q_{1x}^i \\ Q_{1x}^r & Q_{1x}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{1x} \\ \Omega C_{1x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1x}^r \\ P_{1x}^i \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{1y}^r & -Q_{1y}^i \\ Q_{1y}^r & Q_{1y}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{1y} \\ \Omega C_{1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{1y}^r \\ P_{1y}^i \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{2x}^r & -Q_{2x}^i \\ Q_{2x}^r & Q_{2x}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{2x} \\ \Omega C_{2x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2x}^r \\ P_{2x}^i \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} Q_{2y}^r & -Q_{2y}^i \\ Q_{2y}^r & Q_{2y}^i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{2y} \\ \Omega C_{2y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{2y}^r \\ P_{2y}^i \end{bmatrix} \quad (28)$$

이상의 방법에 의해 단 한번의 운전으로도 8개의 초전도 베어링 동적 계수를 모두 구할 수 있게 된다. 물론 여러 차례의 실험결과를 평균하게 되면 계산의 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

그런데 이 방법에서 유의해야 할 점은, 회전체는 항상 잔류 불평형량이 존재하게 되므로 불평형 가진 응답에서 가진 없이 얻은 초기 응답을 뺀 값을 사용해야 한다는 것이다. 따라서 식 (13)에 초기 응답을 고려하여 다시 표현하면 다음과 같다.

$$Q(j\Omega) = Q^r + jQ^i = \begin{pmatrix} (X_1^r - X_{10}^r) + j(X_1^i - iX_{10}^i) \\ (Y_1^r - Y_{10}^r) + j(Y_1^i - Y_{10}^i) \\ (X_2^r - X_{20}^r) + j(X_2^i - X_{20}^i) \\ (Y_2^r - Y_{20}^r) + j(Y_2^i - Y_{20}^i) \end{pmatrix} \quad (29)$$

이상의 방법에 의한 초전도베어링의 동적 계수 추출을 검증하기 위한 시뮬레이션을 수행하여 보았다. 즉, 베어링을 식 (2)~(5)의 동적 계수로 가정하고 불평형량을 식 (6)과 같이 가정하였을 때 얻은 응답 그림 10을 이용하여, 역으로 식 (2)~(5)의 동적 계수가 나오는지 시뮬레이션을 해보았다. 표 3은 그 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

불평형응답법에 의해 베어링 동적 계수 추정을 수행하기 위한 실험을 수행하였다. 그림 13(a)는 1번 평면에 5.546g $\angle 0^\circ$, 2번 평면에 4.46g $\angle 180^\circ$ 의 불평형을 가진시켰을 때 4,199 rpm에서 얻은 orbit 응답이다. 이 동적 응답을 이용하여 계산된 베어링 동적 계수는 다음 식 (30)~(33)과 같다.

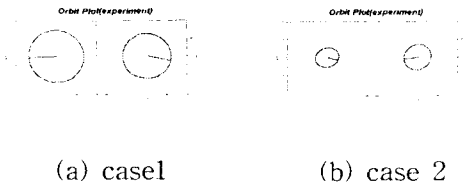


Fig. 13. Unbalance response orbit pattern at 4199 rpm.

$$K_1 = \begin{bmatrix} 310509 & 0 \\ 0 & 393328 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 298396 & 0 \\ 0 & 308726 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 8 & 0 \\ 0 & 83 \end{bmatrix} \quad (32)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 137 & 0 \\ 0 & 94 \end{bmatrix} \quad (33)$$

그림 13(b)는 1번 평면에 4.46g $\angle 180^\circ$, 2번 평면에 5.546g $\angle 0^\circ$ 의 불평형을 가진시켰을 때 4,199 rpm에서 얻은 orbit 응답이다. 이 동적 응답을 이용하여 계산된 베어링 동적 계수는 다음 식 (34)~(37)과 같다.

$$K_1 = \begin{bmatrix} 324463 & 0 \\ 0 & 282217 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 280108 & 0 \\ 0 & 330468 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 175 & 0 \\ 0 & 12 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 204 & 0 \\ 0 & 179 \end{bmatrix} \quad (37)$$

따라서 베어링의 강성은 3×10^5 N/m정도이며

감쇠는 200 Ns/m이하의 작은 값으로 생각된다.

Table 3. Bearing ID simulation results.

(a) Bearing #1

Rpm	#1 BRG			
	K _{xx}	K _{yy}	C _{xx}	C _{yy}
500	149999.2	179999.0	100.7	199.8
1400	150002.7	180002.2	99.9	200.1
1600	150007.4	180007.7	100.0	199.9
2000	150004.6	179986.1	100.1	199.9
9000	149974.9	180036.3	98.6	201.3
정답	150000.0	180000.0	100.0	200.0

(b) Bearing #2

Rpm	#2 BRG			
	K _{xx}	K _{yy}	C _{xx}	C _{yy}
500	159995.8	120001.4	151.5	299.8
1400	160012.0	119990.7	149.8	300.0
1600	159988.9	120039.5	150.0	300.1
2000	160002.6	119960.2	150.0	299.6
9000	159934.1	120193.7	147.4	303.7
정답	160000.0	120000.0	150.0	300.0

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 초전도 베어링 동특성 실험장치를 설계 제작하여 이 회전체계 및 초전도 베어링에 대한 동특성을 파악하였다.

회전축은 1,000~2,000 rpm 사이에서 2개의 강제모드 공진을 만나며, 10,000 rpm 까지도 강제모드로 안정되게 작동한다. 불평형응답법에 의해 얻은 초전도베어링의 강성계수는 3×10^5 N/m정도이며 감쇠계수는 200 Ns/m이하의 작은 값이다. 베어링의 강성과 감쇠의 연성향은 거의 없는 것으로 보인다.

[참고 문헌]

- [1] M.Komori, S.Matsuoka, and S.Fukata 'Development of a hybrid-type superconducting magnetic bearing System', Applied Superconductivity, Vol. 4, pp253~259, 1996.
- [2] M.Komori, A.Tsuruta, S.Fukata, T. Matsushita, 'Superconducting bearing systems using high-T_c superconductors', IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.5, pp 634~637, 1995.
- [3] A.K.Tieu, Z.L.Qiu, 'Identification of sixteen dynamic coefficients of two journal bearing from experimental unbalance responses', Wear 177, pp63-69, 1994.
- [4] C-W.Lee, S-W.Hong, 'Identification of bearing dynamic coefficients by unbalance response measurements', Proc. Inst. Mech. Eng., Vol. 203, pp93-101, 1989.