

초전도베어링을 이용한 플라이휠 로터의 동특성

⁰김 영 철*, 최 상 규*, 이 준 성**, 한 영 희**, 성 태 현**

Dynamic Behavior of a Flywheel Rotor System Using Superconductor Bearings

Young-Cheol Kim*, Sang-Kyu Choi*,
Jun-Sung Lee**, Young-Hee Han**, and Tae-Hyun Sung**

ABSTRACT

Recently, several attempts have been made to apply high Tc superconductor bearings of thrust type to flywheel energy storage system (FESS) throughout the world. Radial type superconductor bearings, however, have never been tried to the real FESS. KEPRI has developed its own radial type bearings and is now currently applying them to a FESS designed by KIMM, for the first time.

In this paper preliminary test results of bearing performance and dynamic behavior of the flywheel rotor system mounted on them are presented. The dynamic properties, i.e, stiffness and damping, of the superconductor bearings were experimentally estimated using the static loading test as well as the impact test. The test revealed that stiffness value of the present superconductor bearings is about 67,700N/m and the damping value 29Ns/m. It was also found out that these bearings have some levitation drift problems due to excessive vibrations encountered while passing through the critical speeds. With recommend backup bearings to limit the vibration amplitudes of the rotor it is predicted that the flywheel rotor will show stable operations in the design speed range.

1. 서론

현재 플라이휠 에너지저장장치(flywheel energy storage system)에 응용하기 위한 초전도 자기베어링 연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다[1,2]. 최근 국내(한국전력연구원)에서도 반경방향과 축방향으로 동시에 하중을 지지할 수 있는 초전도베어링이 개발되어 세계 최초로 수평형 로터에 적용시켜 운전에 성공하였으며, 현재 이를 플라이휠 에너지저장장치에 응용하기 위한 연구가 계속 진행 중에 있다[3].

* 한국기계연구원 회전체연구그룹

** 한국전력연구원 전력계통연구실

플라이휠 에너지저장장치는 높은 에너지저장밀도, 높은 에너지출력밀도, 반영구적인 수명 및 환경 친화성 등의 장점을 가지고 있으며, 회전시에 발생하는 에너지의 손실을 최소화하기 위한 비접촉 베어링(noncontacting bearing) 기술과 고강도 및 높은 에너지밀도를 구현하는 복합재휠(composite wheel) 기술 및 전동발전(motor/generator)기술이 그 핵심기술이라 할 수 있다. 이 중에서도 특히 비접촉 베어링기술은 전자석을 이용하여 회전체의 위치를 능동적으로 제어하는 자기 베어링(magnetic bearing)[4]과 고온초전도 벌크를 이용하는 고온 초전도 베어링(high Tc superconductor bearing)으로 크게 나눌 수 있다. 자기 베어링은 강성 및 감쇠를 임의로

조절할 수 있으나, 반드시 능동제어장치를 필요로 하며 베어링 작동시 계속적으로 에너지가 소모되는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 초전도 베어링은 제어 장치가 필요 없이 외란에도 안정된 운전을 할 수 있으며 초전도체의 냉각 유지에 필요할 정도의 에너지만 소모되는 장점에 반해, 강성 및 감쇠가 비교적 낮고 그 값을 임의로 제어할 수가 없다.

초전도 플라이휠 에너지 저장장치가 제대로 동작하기 위해서는 무엇보다도 그 정상 운전속도 범위인 20,000~40,000rpm에서 동적 안정성이 확보되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 수평형 초전도 베어링의 부하특성 및 강성, 감쇠특성을 고찰하였으며, 이를 기초로 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 동특성 해석을 수행하였다.

2. 초전도베어링의 특성

2.1 초전도베어링 구조

Fig. 1은 초전도베어링의 회전자(또는 로터, rotor) 및 고정자(stator, 또는 베어링)의 구조를 나타낸 그림이다. 로터의 구조는 다수의 원통형 자석을 비자성체의 원통 안에서 동일 극이 이웃하도록 NS/SN/NS/SN의 순서로 배열하였다. 즉, 회전자에서 중심축으로

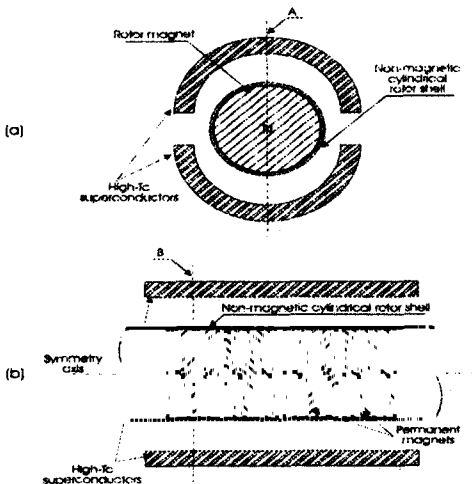


Fig. 1 Schematic cross sections of a high-Tc superconducting bearing.

Table 1 A specification of the test rotor and the superconductor bearings

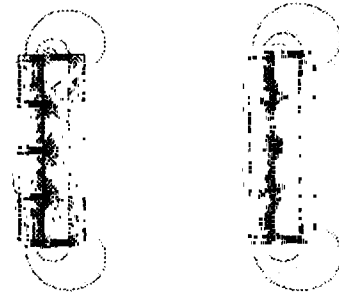
초전도베어링 내경	63mm
초전도베어링 길이	115mm
베어링 중심간 거리	315mm
로터와 베어링간 간극	9mm
로터 외경	54mm
로터의 총 길이	574mm
로터의 총 무게	9.5kg
로터의 자석 외경	50mm
로터의 자석 내경	15mm

의 자속 경로를 없앴으로써, 발생된 자기장이 로터의 반경 방향으로 향하게 하여 고정자와 고온초전도체와의 작용을 강화한 형태이다. 고온초전도체는 고정자 원통 외주면을 따라 설치된다.

본 연구에서는 초전도베어링의 특성을 파악하기 위하여, Table 1과 같은 초전도베어링 및 로터를 제작하였다. 이 로터에는 플라이휠과 같은 질량이 달려져 있지 않으며, 로터의 자석이 있는 축방향 지점에는 로터의 강도를 높이기 위하여 중심에 직경 15mm의 심(core)이 끼워졌다.

2.2 로터 내 자기장 분포

자석의 배치를 효율적으로 하기 위해, Fig. 2에서 보는 바와 같이 몇 가지 모델에 대해



(a)magnetic spacer (b)nonmagnetic spacer

Fig. 2 Magnetic flux distribution line in the test rotor

발생 자기장 분포를 유한요소법에 의해 계산해 보았다. Fig. 2(a)는 실린더형 자석을 서로 같은 극끼리 볼도록 배열하되 자석 사이에 연철디스크와 같은 자성 격판(magnetic spacer)을 사용한 경우이고, Fig. 2(b)는 공기나 스테인레스강과 같은 비자성 격판(non-magnetic spacer)을 사용한 경우이다. Fig. 3은 위의 두 경우에 대해, 축 중심으로 부터 반경방향으로 (a) 26mm, (b) 32.5mm, (c) 39mm 만큼 떨어진 위치에서, 반경방향

으로의 자기밀도를 축을 따라 표현한 것이다. 이상의 자기장 해석으로부터 우리는 다음과 같은 사실을 얻었다. ①자석을 반대 극끼리 맞닿게 배열한 자성체 구성에 비해, 자석의 동일 극끼리 서로 인접하도록 배열한 나머지 구성들에서는 훨씬 더 강하고 효과적인 자기장 분포를 얻을 수 있다. ②자석들 사이를 비자성 격판을 사용한 경우보다 자성 격판을 붙인 경우가, 자속 경로의 자기저항을 줄여줌으로써 약간 더 강하고 효과적인 자기장 분포를 제공한다. ③자석의 가운데로 회전자축을 통과시켜 회전자의 공간을 없애는 만큼 자기장은 더 약해진다.

2.3 정적 부하시험

초전도베어링의 실제의 부하지능력 및 강성치를 측정하기 위한 정적 부하시험을 수행하였다. Fig. 4는 부하시험을 수행하고 있는 초전도베어링 및 측정장치를 보여주고 있는데, 나사방식(screw type)의 부하장치를 만들어 수직 이동 거리를 조절하면서 동시에 로드셀(load cell)을 통해 하중을 측정할 수 있도록 하였다.

초전도베어링의 작동방법 및 부하측정 방법을 설명하면, 처음에는 축을 베어링 상단에 닿을 때까지 위치안내기(position guider)로 들어올린 후 초전도베어링에 액체질소를 공급하여 자기장 냉각(field cooling)을 시킨다. 충분히 냉각이 되면 위치안내기를 제거하여 축 자중(9.5kg)에 의한 축의 처짐이 발생되며, 이 때부터 축이 베어링 하단에 닿을

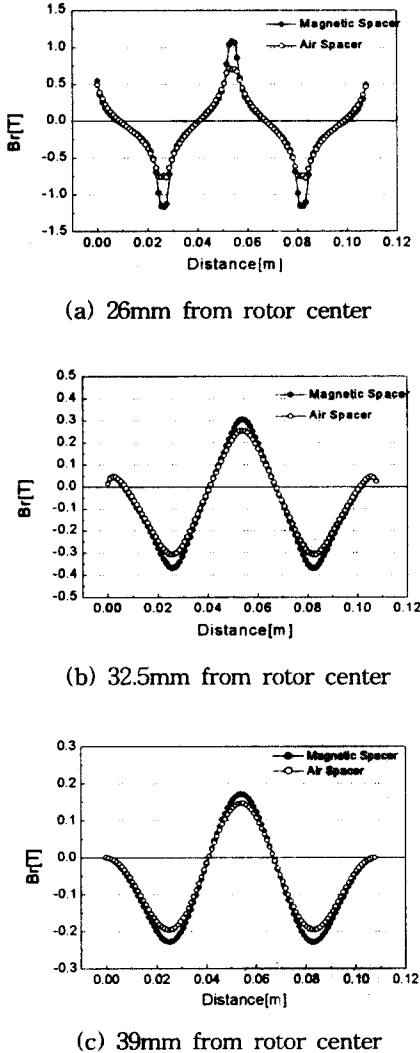


Fig. 3 Magnetic flux density to radial direction in the rotor



Fig. 4 A static loading test-rig of the superconductor bearing

때까지 부하를 아래 방향으로 가하면서 힘과 변위를 측정한다. 이렇게 초기 냉각 위치에서부터 베어링 하단까지(최대 9mm)를 여러 차례 반복하면서 힘과 변위를 측정하였다.

Fig. 5는 이상의 방법대로 축의 자중에 의한 처짐 이후 축이 베어링 하단에 닿을 때까지 하중을 가하면서 힘과 변위를 측정한 결과이다. ①축의 자중에 의한 초기 처짐 위치는 약 0.7mm이었으며, 베어링 하단에 닿을 때는 약 87kg의 하중이 작용하였다. ②하중을 가하는(loading) 경로와 제거하는(unloading) 경로가 상당한 차이를 보인다(히스테리시스 현상). ③반복하중을 가할 때 첫 번째 가하는 경로와 두 번째 가하는 경로가 상당한 차이를 보이고 있다. 즉 히스테리시스 현상으로 인해 하중을 완전히 제거하여도 처음 위치로 복원되지 않기 때문에, 두 번째 하중을 가하는 경로는 첫 번째 경로와 전혀 다른 경로를 보이고 있다. 이것은 축이 운전

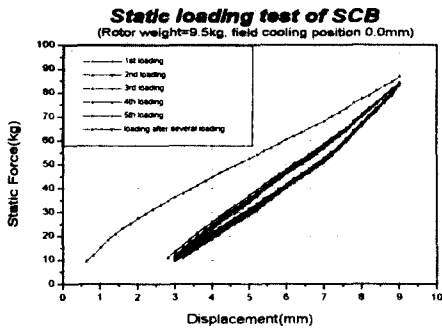


Fig. 5 Full loading test of a super-conductor bearing

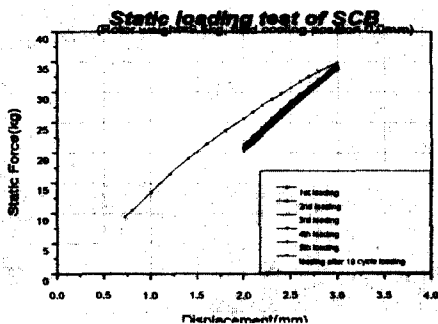


Fig. 6 30kg loading test of a super-conductor bearing

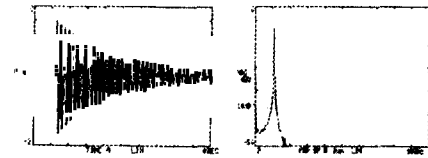
중에 공진 등과 같은 큰 변위를 일으키게 되면 그 평행위치가 이동될 가능성을 암시한다. ④두 번째 이후부터는 거의 비슷한 경로를 통과하게 되나, 아래방향으로 축이 약간씩 더 처지고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 6은 실제 플라이휠 로터 자중(28.7kg)을 중심으로 하여 변위가 2~3mm사이에서 움직이도록 반복하중을 가하면서 힘과 변위를 측정한 결과인데, Fig. 5로부터 얻은 결과들을 재확인 할 수 있다. 특별히 Fig. 6으로부터는, 플라이휠 로터가 장착되었을 때 초전도베어링의 강성은 64,700N/m이고, 감쇠는 아주 적은 값으로 예측되었다.

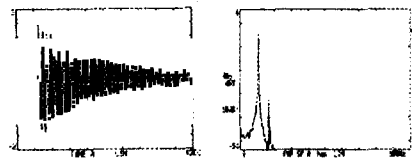
2.4 강성 및 감쇠계수 측정

초전도 베어링 실험장치의 강체 고유진동수 및 초전도베어링의 강성 및 감쇠를 알아보기 위하여, 위의 로터를 초전도베어링에서 부상시킨 상태에서 충격가진법(impact test)에 의해 시간응답 및 주파수응답을 얻었다.

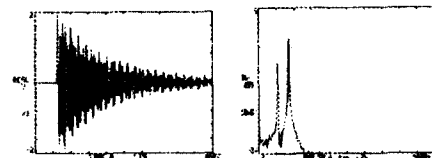
Fig. 7(a)는 축 중심을 X방향으로 가진하여 축 중심의 X방향 변위를 측정하여 얻은 결과인데, 병진 강체모드 고유진동수는 10.75



(a)R(X_{center},X_{center})



(b)R(X_{left},X_{center})



(c)R(X_{left},X_{left})

Fig. 7 Timebase and spectrum plots obtained from impact test

Hz(645rpm)에서 발생하며, 분석결과 얻은 강성치는 67,700N/m, 감쇠치는 29Ns/m이었다. 이 수치는 앞 부하시험결과와 잘 일치한다. Y방향 고유진동수도 11.25Hz로 측정되어 X방향과 거의 비슷한 것으로 관측되었다. Fig. 7(b)는 축 중심을 X방향으로 가진하여 좌측 베어링 근처에서 X방향의 변위를 측정하여 얻은 것인데, 병진 강제모드 고유진동수는 10.75Hz이고 회전 강제모드 고유진동수는 17Hz(1020rpm)에서 발생함을 알려준다. Fig. 7(c)는 좌측 베어링 근처에서 X방향으로 가진하여 좌측 베어링 근처에서 X방향의 변위를 측정하여 얻은 것인데, Fig. 7(b)와 같은 결과를 보여준다. Y방향으로의 회전 강제모드 고유진동수는 21.25Hz(1275 rpm)에서 발생하였다. 이상으로부터 플라이휠이 달려있지 않은 로터를 실제로 운전시켰을 경우, 1,500rpm 이하에서 2개의 강제모드를 통과할 것으로 보여진다.

2.5 고속 운전시험

초전도베어링의 고속 운전 안정성을 확인하기 위하여, 로터를 AC 서보 모터에 커플링으로 직접 연결시켜 구동시켰다. Fig. 8은 로터를 10,000rpm까지 운전시키면서 얻은 진폭응답곡선인데, 2,000rpm 이하에서 공진점을 통과하며, 그 이상의 속도에서는 진폭이 작은 상태로 안정되게 운전하고 있음을 볼 수 있다. 그리고 100rpm 이하의 속도에서 10mil 가량의 run-out이 발생하는데, 이는 질량 불평형의 영향보다는 자기 불평형량의 영향으로 생각된다.

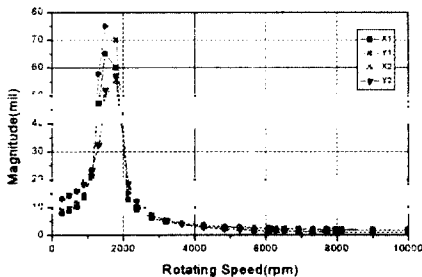


Fig. 8 Bode plot obtained from rotating shaft on superconductor bearing

3. 플라이휠 로터의 동특성

3.1 플라이휠 에너지저장장치

현재 개발중인 플라이휠 에너지저장장치는 약 28.7kg의 로터가 20,000~40,000rpm의 회전속도로 운전되도록 설계되었고, 이때 가용 에너지(usable energy)는 372Wh 정도이다. Fig. 9는 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 로터 단면도이며, Fig. 10은 제작된 플라이휠 에너지저장장치 시제품 중 일부 부품 사진이다.

사용된 복합재질의 재료는 T800/2500이며, 복합재질의 질량은 17.4kg, 극관성모멘트가 0.2032kgm², 횡관성모멘트가 0.139kgm², 이다. 축의 주재료는 스테인레스강이다. 비접촉식으로 전동 및 발전이 가능하도록 Halbach 배열형의 전동발전기 및 전력변환회로를 설계 제작하였는데, Fig. 10의 사진에서 보는 바와 같은 로터의 한쪽 끝단에 외전형(outer rotor type)으로 부착되어져 있다. 그리고, 운

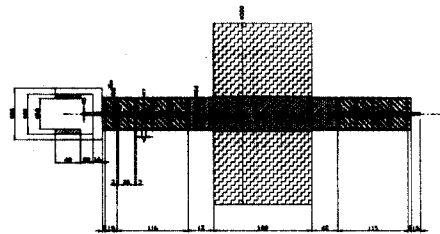


Fig. 9 Schematic cross section of the flywheel rotor

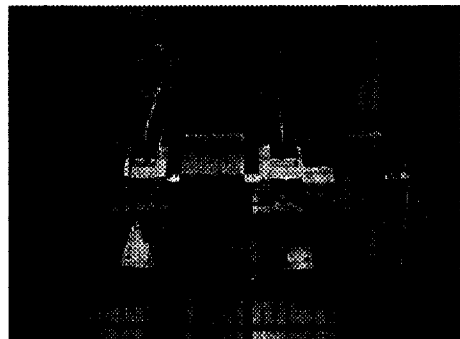


Fig. 10 A photo of the superconductor flywheel energy storage system

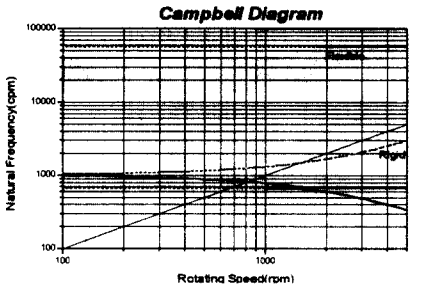
전 중 과도진동에 의한 초전도 베어링의 손상을 방지하고 과도한 에너지의 손실을 방지하기 위하여 보조베어링(back-up bearing)으로써 고풍스프링 댐퍼(leaf-spring damper)가 장착된다. 최종적으로 시스템은 공기저항이나 열전달 등에 의한 에너지손실을 최소화하기 위해 진공 중에서 운전된다.

3.2 플라이휠 로터의 동특성

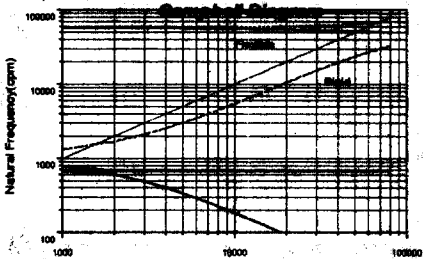
플라이휠 로터의 동특성을 파악하기 위해 유한요소법에 의해 모델링하면 다음 식과 같다.

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

이때 초전도베어링 한가운데 집중되는 것으로 가정된 강성 및 감쇠치는 충격 가진법(impact test)에 의한 실험 결과를 따랐는데, 강성치는 67,700N/m를, 감쇠치는 29Ns/m를 이용하였다. 그리고, 강성 및 감쇠가 수직방향과 수평방향이 각각 동일한 값을 가지며 그 연성항은 무시되는 것으로 가정하였다.



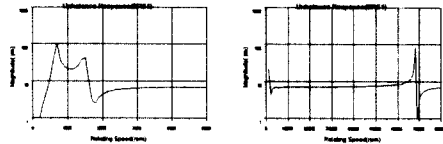
(a) At low speed



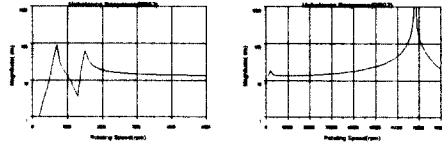
(b) At high speed

Fig. 11 Whirl natural frequency map of the superconductor flywheel rotor

Fig. 11은 플라이휠 로터의 선회 고유진동수 해석(whirl natural frequency analysis)을 수행한 결과이다. 650rpm 및 1,500rpm 근처의 2개의 강제 공진을 통과하며, 70,000rpm 근처에 1차 급힘 고유진동수가 존재함을 알 수 있다. Fig. 12는 플라이휠 양단에 동위상으로 각각 137gmm(1000rpm에서 G1등급기준)의 불평형량을 부과하였을 때 양쪽 베어링에서의 불평형응답 곡선이며, Fig. 13은 역위상으로 불평형량을 부과하였을 때 얻은 불평형응답(unbalance response) 곡선이다. 불평형응답 곡선은 선회고유진동수 해석결과와 잘 일치하며, 정밀 밸런싱 및 측정결과 함께 공진 통과용 보조베어링의 채용으로 20,000~40,000rpm의 속도범위에서 안정된 운전을 할 수 있을 것으로 기대된다.

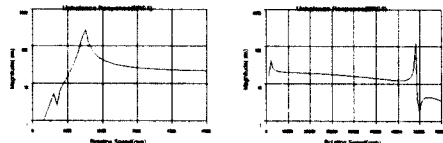


(a) Response at left bearing

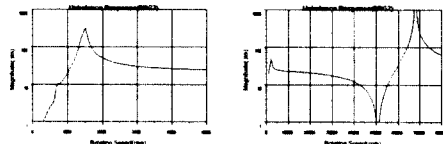


(b) Response at right bearing

Fig. 12 In-phase unbalance response of the superconductor flywheel rotor



(a) Response at left bearing



(b) Response at right bearing

Fig. 13 Out-of-phase unbalance response of the superconductor flywheel rotor

5. 결론

참고문헌

초전도 플라이휠 에너지 저장장치가 정상 작동하기 위해서는 무엇보다도 운전속도 범위인 20,000~40,000rpm에서 동적 안정성을 확보하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 수평형 초전도 베어링의 부하특성 및 강성, 감쇠특성을 고찰하고, 이를 기초로 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 동특성 해석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- [1] 초전도베어링은 최대 87kg 정도의 정적 하중에 견디므로, 28.7kg의 플라이휠 로터는 동적 상태에서 충분히 지지할 수 있다.
- [2] 초전도베어링은 첫 번째 하중경로에 대해 히스테리시스 특성이 강하여, 공진 통과 이후 평형위치의 변동이 예측된다. 그러나 두 번째 이후의 반복하중에 대해서는 경로의 재현성을 보이고 있으며 히스테리시스 감쇠 특성도 적은 것으로 보여진다.
- [3] 초전도베어링의 강성치는 67,700N/m, 감쇠치는 29Ns/m로 파악된다.
- [4] 초전도 플라이휠 에너지저장장치는 저속 (645rpm 및 1,020rpm)에서 2개의 강제 모드 공진을 통과할 것으로 예측된다. 공진 통과 대책으로는 정밀 밸런싱 수행 및 댐퍼 기능을 갖춘 보조베어링(back-up bearing)의 채용이 고려되고 있다.
- [5] 초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 운전속도 범위인 20,000~40,000rpm에서 강제 모드로 안정되게 작동할 것으로 예측된다.

현재 진공 중에서의 전체 시스템 성능시험이 진행 중에 있으며, 조만간 세계 최초의 수평형 초전도 베어링 장착용 플라이휠 에너지 저장장치의 개발이 완료될 것으로 기대된다.

- [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] 김영철, 최상규, 성태현, 이준성, '고온초전도베어링의 회전체역학적 특성', 한국소음진동공학회 '99추계학술대회논문집, pp417~423, 1999.
- [4] 최상규, 김영철, 경진호, '플라이휠 에너지저장장치 회전체계의 동역학적 설계 및 해석', 한국소음진동공학회지 제8권 제1호, pp81~86, 1998.