

# Mechanical Properties of a High-temperature Superconductor Bearing Rotor in a 10 kWh Class Superconductor Flywheel Energy Storage System

B. J. Park\*, S. Y. Jung, C. H. Kim, S. C. Han, B. C. Park, S. J. Han, S.G. Doo, Y. H. Han

*KEPCO Research Institute, Green Growth Laboratory, Daejeon, Korea*

(Received 16 August 2011 revised 18 August 2011 accepted 22 August 2011)

## 10 kWh급 초전도 베어링 회전자의 기계적 특성 평가

박병준\*, 정세용, 김철희, 한상철, 박병철, 한상진, 두승규, 한영희

### Abstract

Recently, superconductor flywheel energy storage systems (SFESs) have been developed for application to a regenerative power of train, a power quality improvement, the storage of distributed power sources such as solar and wind power, and a load leveling. As the high temperature superconductor (HTS) bearings offer dynamic stability without the use of active control, accurate analysis of the HTS bearing is very important for application to SFESs. Mechanical property of a HTS bearing is the main index for evaluating the capacity of an HTS bearing and is determined by the interaction between the HTS bulks and the permanent magnet (PM) rotor. HTS bearing rotor consists of PM and iron collector and the proper dimension design of them is very important to determine a supporting characteristics. In this study, we have optimized a rotor magnet array, which depends on the limited bulk size and performed various dimension layouts for thickness of the pole pitch and iron collector. HTS bearing rotor was installed into a single axis universal test machine for a stiffness test. A hydraulic pump was used to control the amplitude and frequency of the rotor vibration. As a result, the stiffness result showed a large difference more than 30 % according to the thickness of permanent magnet and iron collector. This is closely related to the bulk stiffness controlled by flux pinning area, which is limited by the total bulk dimension. Finally, the optimized HTS bearing rotor was installed into a flywheel system for a dynamic stability test. We discussed the dynamic properties of the superconductor bearing rotor and these results can be used for the optimal design of HTS bearings of the 10kWh SFESs.

*Keywords* : HTS bearing, rotor, magnet, array

### I. Introduction

초전도 플라이휠 에너지 저장장치 (Superconductor Flywheel Energy Storage System, SFESS)는 모터를 통한 회전으로 운동에너지를 저장하고 발전기를 통하여 저장된 운동에너지를

\*Corresponding author. Fax : +82 42 865 5202

e-mail : hampstead@kepc.co.kr

전기에너지 형태로 공급하는 저장 장치이다. 초전도 플라이휠은 크게 고속회전 에너지를 제공하는 모터, 에너지를 저장하는 플라이휠, 플라이휠을 지지하는 초전도 베어링(Superconductor Bearing), 회전에너지를 전기 에너지로 바꾸어 주는 발전기로 크게 구성되어 있다. 초전도 플라이휠이 다른 플라이휠과의 차이점은 무 접촉식의 초전도 베어링을 사용하여 휠을 지지하기 때문에 회전에너지의 각종 마찰손실을 줄일 수 있고 고속회전을 가능케 하므로 에너지 저장효율이 높으며 저장밀도가 높다는 장점이 있다 [1]. 또한 가동 중 특별한 운전조작 없이 회전자 를 지지할 수 있고 진공중에서 수명이 반 영구적이나 일단 시스템에 장착이 되면 설계 변경이 어렵다는 점에서 시스템 운전 전에 베어링의 정확한 지지 특성 파악이 필수적이다 [2]. 초전도 베어링은 크게 초전도 벌크와 냉각조(cryostat)로 구성되는 고정자(stator)와 플라이휠과 같이 회전하면서 고정자에 자기력을 제공하는 회전자(rotor)로 구성이 되며 고정자와 회전자 사이의 자기 자속(magnetic flux) 상호작용에 의해 기계적 특성이 결정되게 된다 [3]. 초전도 베어링 회전자는 영구자석(Permanent Magnet) 과 iron collector의 조합으로 구성되며 고속회전속에서도 부속품의 이탈없이 안정성을 제공하여야 하는 기계적 결합과 동시에 초전도 벌크에 강한 자기강성이 유도되도록 구성 되어야 한다. 초전도 베어링의 지지력은 회전자의 자기력에 의해 대다수가 결정되므로 자력냉각(field cooling) 시 회전자와 고정자 사이에 최적화된 자기포획(flux pinning) 조건이 베어링 성능을 향상시키는데 주요한 변수가 된다.

본 연구에서는 초전도 베어링의 기계적 성능을 향상시키기 위하여 실제 10 kWh급 초전도 플라이휠에 사용되는 초전도 베어링 회전자의 부품 array에 따른 자기강성의 변화에 대하여 살펴 보았다. 또한 최적 설계된 초전도 베어링 회전자의 조건에 따라 실제 10 kWh급 초전도 베어링을 제작하고 고속회전 운전 테스트를 실시 하여 회전자의 안정성을 평가 하였다. Fig. 1은 설계된 10 kWh급 초전도 플라이휠의 디자인 단면을 보여 주고 있다.

본 연구에서는 초전도 베어링 회전자의 제작 조건변화에 따른 강성변화 경향성을 분석하여

실제 초전도 베어링 제작시 효율적인 설계에 도움이 될 수 있도록 연구를 진행 하였다.

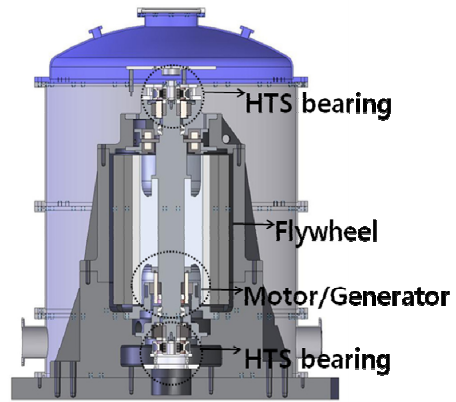


Fig. 1. Design of a 10 kWh superconductor flywheel energy storage system.

## II. 제작 및 시험

10 kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 초전도 벌크가 회전자 자석을 감싸고 있는 내륜형 타입으로 구성되며 냉각중 열침입을 최소화하는 베어링 지지 하우징이 고정자와 일체형으로 제작 된다. Fig. 2는 10 kWh급 초전도 베어링의 세부 구성도를 보여 주고 있다.

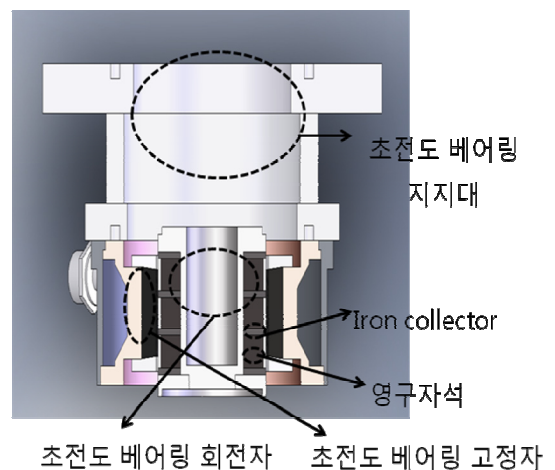


Fig. 2. Schematic design of HTS bearing for 10 kWh SFES.

초전도 베어링 고정자는 벌크의 자기 특성에 의해 그 성능이 결정되며, 초전도 베어링 회전자와의 거리가 가까울수록 고정력이 큰 것으로 보고 되었다 [4]. 하지만 실제 플라이휠 운전에는 회전체의 안정성을 위하여 설계된 백업 베어링 지름반경 1 mm를 고려하여, 초전도 회전자와 고정자의 거리는 시스템 충격에서 안정적인 거리인 1.5 mm 간격을 유지하며 냉각 운전 된다. 본 연구에서는 자력냉각 거리가 1.5 mm 구성하고 있는 초전도 베어링의 강성을 기준으로 회전자를 구성하고 있는 영구자석과 iron collector의 두께에 따른 강성의 변화를 평가 하기 위하여 Fig. 3와서 보는 바와 같이 유압 프레스식 자석조립 제작장치를 자체 제작하였다.

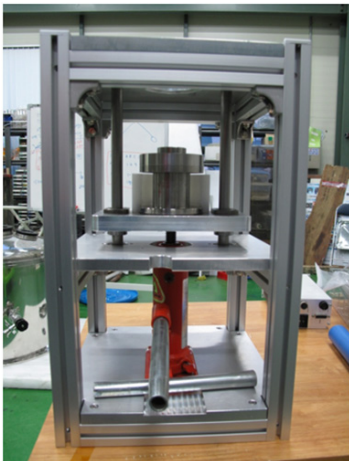


Fig. 3. Assembly equipment of a superconductor bearing rotor for a stiffness test.

제작된 유압프레스 장치는 iron collector와 영구자석을 순차적으로 가이드 축에 장착하여 프레스 후 기계적 볼팅 결합으로 회전자를 완성했다. 제작된 회전자는 10 kWh급 초전도 베어링 벌크 사이즈 ( $25 \times 28 \times 12 \text{ mm}^3$ )에 강한 자기 플럭스가 균질하게 주입될 수 있도록 직경 88.8 mm, 표면자장 0.5T인 Nd-Fe-B 영구자석을 이용하였다. 이때 평가에 사용된 초전도 단결정 벌크는 Sm seed를 이용한 YBCO로 제작되었다. 이후 조건 별로 제작된 회전자를 Fig. 4의 유압식 강성평가 장치를 이용하여 회전자 진동에 따른 강성변화를 측정하였다.

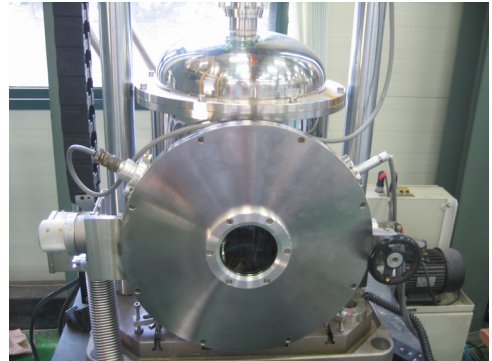


Fig. 4. Single axis universal test machine for stiffness measurement.

제작된 유압식 강성평가 장치 내에 장착된 초전도 벌크는 액체질소를 이용하여 직접냉각을 실시 하였으며 실제 10 kWh급 초전도 베어링에서 일어날수 있는 흔들림을 고려하여  $\pm 0.5 \text{ mm}$  구간에서 1 Hz의 주파수로 회전자를 3회 왕복하여 그 응력의 변화를 관찰하였다. 평가 결과 나타난 force의 변화를 변위에 따라 기록하였으며, 변위-힘의 그래프 기울기를 변위구간에서 선형으로 가정하고 강성으로 도출하였다.

자석 및 iron collector 두께에 따라 최적화된 회전자는 영구자석의 이탈 및 파괴를 막기 위하여 영구자석 표면에 보강 링을 장착 후 냉간 박음으로 제작 되었다. 이후 회전자의 고속회전 안정성을 평가하기 위하여 10 kWh급 초전도 베어링 고정자가 장착된 플라이휠에 삽입하여 실험을 진행 하였다.

### III. 실험 결과

초전도 베어링의 강성은 초전도 베어링 벌크 수에 따라 선형적으로 증가하며 회전자의 축방향 길이가 초전도 벌크 및 냉동기의 크기를 결정짓는 주요한 인자가 된다. 벌크 수가 증가할수록 베어링의 강성은 증가하지만 지지 해야 하는 플라이휠 자체 무게 및 크기도 증가하여 회전체 지지에 큰 부담이 되며 회전체의 휨을 유발시킬 수 있는 위험요소로 작용 할 수 있다. 따라서 베어링을 제한된 크기에서 지름방향의 강성을 키우는 것이 플라이휠의 무게를 증가시키지 않고 지지력을 키울 수 있는 주요한 이슈

가 된다.

본 연구에서는 초전도 베어링의 지름방향 강성을 증가시키기 위하여 초전도 베어링 회전자를 구성하고 있는 iron collector 두께에 따른 단결정 초전도 벌크의 강성변화를 살펴 보았다. 우선 회전자 조립 전에 장착된 단결정 초전도 벌크의 표면 자장특성을 살펴 보기 위하여 포획자장의 특성을 평가 하였다.

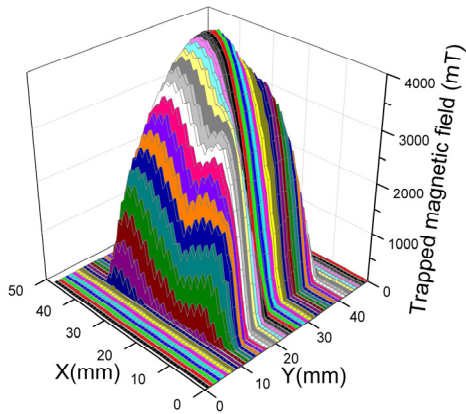


Fig. 5. Distribution of the trapped magnetic field of 10 kWh superconductor bearing bulk.

평가 결과 Fig. 5에서도 확인 할 수 있듯이 전형적인 단결정 성장의 포획자장 특성을 보여 주었으며 이는 균질한 자장특성이 요구되는 초전도 베어링 적용에 적합한 구조를 가지고 있다고 말할 수 있다. 일반 적으로 1.5톤 무게의 10 kWh급 플라이휠에 장착되는 규모가 큰 초전도 베어링 회전자의 경우 안정성 및 균질성을 위하여 일정 수준 이상의 영구자석 두께가 필요하다. 그러나 iron collector 두께가 지속적으로 작아지게 되면 잔류 자기를 흡수 할 수 없는 자기 포화 현상이 일어나기 때문에 본 연구에서는 이를 피하고자 자석의 두께를 15 mm로 고정하고 iron collector 두께를 2 mm 이상에서 변화시킨 후 강성 변화를 살펴 보았다.

측정 결과 Fig. 6에서도 확인 할 수 있듯이 iron collector 두께가 2 mm일 때 가장 큰 자기 강성 값인 29 N/mm를 보여 주었으며 iron collector 두께가 5 mm 일때의 강성값에 비해 60 % 이상의 차이를 보여 주었다. 이는 Iron collector가 회전자 자석의 자장을 자기포획에

주로 관여하는 단결정 벌크 종자 부분에 집중화 시켜 피닝효과를 극대화 하는 함과 동시에 실제 잔류자기를 최소화 하여 강성에 대다수 참여한 결과에 의한 것이라고 사료 된다. 따라서 본 실험에서는 제한된 크기(25\*28\*12 mm<sup>3</sup>)의 단결정 벌크에서 Iron collector의 두께가 2 mm일 때 가장 효율적으로 자장이 집중되었다고 말할 수 있다.

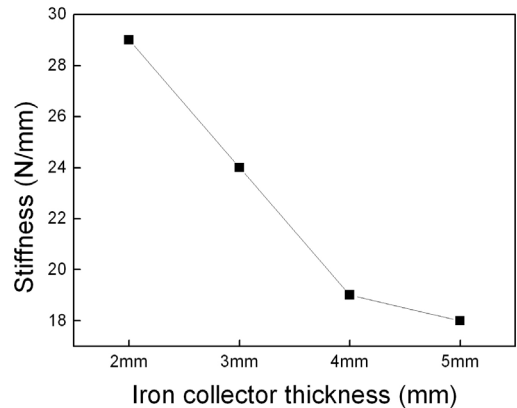


Fig. 6. Stiffness variation of a HTS bearing as a function of an iron collector thickness.

다음은 정해진 iron collector 두께에 따라 자석두께가 미치는 영향에 대하여 알아 보기 위해 iron collector를 2 mm로 고정을 하고 11 mm, 13 mm, 15 mm, 17 mm의 자석두께에 따른 강성 변화 살펴 보았다.

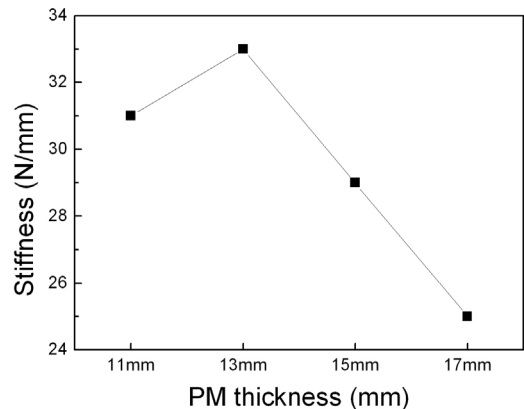


Fig. 7. Stiffness variation of HTS bearing as a function of PM thickness.

실험 결과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 자석두께에 따라 최대 30 %에 가까운 강성변화를 보여 주었으며 13 mm의 자석두께에서 가장 높은 값을 보여 주었다.

이는 13 mm 두께의 영구자석이 주요 관여하는 자기분포집중을 담당하는 2 mm의 iron collector 두께에 최적으로 자기포획 작용을 하였음을 지적하며, 제한된 크기의 벌크에 가장 적절히 플러스가 포획되었다라고 말할 수 있다.

10 kWh급 초전도 베어링 회전자는 15,000 rpm까지 고속회전을 하며 회전 중 공진주파수 영역에서 가장 큰 진동을 보인다. 이때 조립된 초전도 베어링 자석과 iron collector의 결합력이 약하면 부품간 슬립에 의한 이탈이 일어나게 되고 결국 시스템 파괴에 이를 수 있다. 본 연구에서는 영구자석 반발식으로 제작된 초전도 베어링 회전자의 안정성을 평가하기 위하여 Fig. 8에서와 같이 자석두께 13 mm, iron collector 두께가 2 mm로 구성된 초전도 베어링 회전자와 단결정 벌크로 이루어진 고정자를 제작하였다.

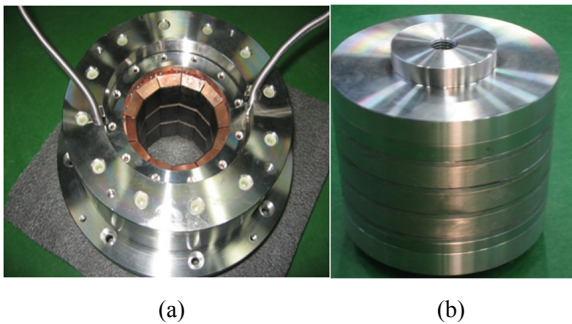


Fig. 8. Superconductor bearing (a) stator and (b) rotor for 10 kWh SFES.

제작된 초전도 베어링 회전자는 플라이휠 shaft에 삽입하여 최종 초전도 플라이휠을 완성하였으며 안정된 가속환경을 위하여 플라이휠 balancing 작업을 실시 하여 수정반경 115 mm에서 상부 및 하부에서 불평형 질량이 각각 0.36 g 이하가 되도록 교정을 완료하였다. Fig. 9는 초전도 베어링 회전자가 플라이휠에 조립 완료된 후에 발란싱 작업을 실시하는 그림이다.

이후 최종 완성된 플라이휠을 준비된 프레임에 삽입되어 고속회전 평가를 실시 하였다. 1차적으로 5,000 rpm까지 휠을 승속 및 감속 시

켜 그 변화를 살펴본 후에 이후 15,000 rpm 이상으로 회전 수를 증가시켜 승속과 감속을 반복하였다.

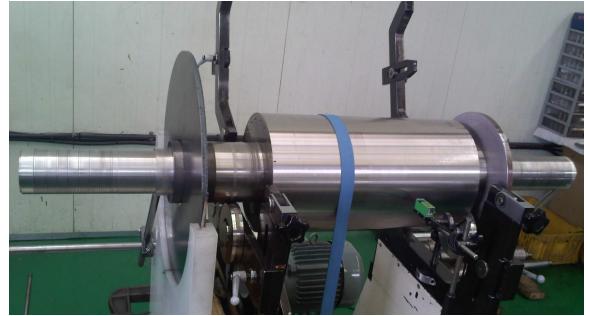


Fig. 9. Balancing of flywheel with a superconductor bearing rotor.

실험결과 Fig. 10에서도 확인 할 수 있듯이 15,320 rpm에서 회전체는 구성부품의 이탈 없이 안정되게 회전함을 확인 할 수 있었다. 결과적으로, 본 시스템에서 제작된 초전도 베어링 회전자는 플라이휠에 이탈 방지를 위한 주요 강성을 제공함과 동시에 고속회전에 적합한 구조를 가지고 있다 라고 말할 수 있다.

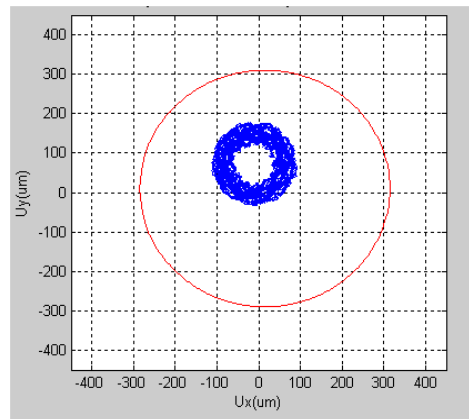


Fig. 10. Rotor motion of superconductor bearing at 15,320 rpm.

### III. 결론

10 kWh급 초전도 베어링 회전자의 강성 특

성을 주요 부품 조건에 따라 각각 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 초전도 베어링 회전자를 구성하고 있는 iron collector의 두께에 따라서 초전도 베어링의 강성은 18 N/mm에서 29 N/mm까지 증가함을 확인 할 수 있었다
2. 10 kWh급 초전도 베어링 회전자는 자석 두께에 따라 강성이 최고 30 %까지 변화함을 확인 할 수 있었다.
3. 초전도 베어링 회전자의 자석두께보다 iron collector 두께가 강성에 주요하게 관여 하고 있음을 확인 할 수 있었다.
4. 10 kWh급 초전도 베어링 회전자는 고속 회전 안정성을 위하여 반발식의 냉간박음 Press 형식으로 조립이 되었다.
5. 본 연구에서 영구자석 반발식으로 제작된 초전도 베어링 회전자는 고속회전에 적합한 구조로 설계되었음을 확인 하였으며 15,000 rpm까지 안정되게 회전 하였다.

이러한 결과 및 수치는 10 kWh급 초전도 플라이휠 베어링의 성능을 최적화하여 안정적인 시스템을 유지하는데 크게 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

## Acknowledgments

We express our sincere thanks to the contributors to this journal. This work was financially supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning.

## References

- [1] Y. H. Han, J. R. Hull, S. C. Han, N. H. Jeong, T. H. Sung, and Kwangsoo No, "Design and characteristics of a superconductor bearing", IEEE Tran, 15, 2249-2253 (2005) .
- [2] T. Coombs, A. M. Campbell, R. Storey, R. Weller, "Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels", IEEE Trans. Applied Supercon., 9, 968-971 (1999).
- [3] N. Kosizuka, "R&D of superconducting bearing technologies for flywheel energy storage systems", *Physica C* 445, 1103-1108 (2006).
- [4] B.J. Park, S. Y. Jung, T. H. Sung, Y. H. Han "Static properties of superconductor journal bearing substatore for superconductor flywheel energy storage system", *Progress in Superconductivity*, 10, 55-59, (2008).