

Static Properties of Superconductor Journal Bearing Substator for Superconductor Flywheel Energy Storage System

B. J. Park^a, S. Y. Jung^a, J. P. Lee^a, B. C. Park^a, N. H. Jeong^a, T. H. Sung^a, Y. H. Han^a

^a Korea Electric Power Research Institute, Superconductivity & Applications Group, Daejeon, Korea

Received 4 July 2008

초전도 저널베어링 Substator의 특성평가

박병준^a, 정세용^a, 이정필^a, 박병철^a, 정년호^a, 성태현^a, 한영희^a

Abstract

A Superconductor Flywheel Energy Storage System(SFES) mainly consists of a pair of non-contacting High Temperature Superconductor(HTS) bearings that provide very low frictional losses, a composite flywheel with high energy storage density. The HTS bearings, which offer dynamic stability without active control, are the key technology that distinguishes the SFES from other flywheel energy storage devices, and great effort is being put into developing this technology. The Superconductor Journal Bearing(SJB) mainly consists of HTS bulks and a stator, which holds the HTS bulks and also acts as a cold head. Static properties of HTS bearings provide data to solve problems which may occur easily in a running system. Since stiffness to counter vibration is the main parameter in designing an HTS bearing system, we investigate SJB magnetic force through static properties between the Permanent Magnet(PM) and HTS. We measure stiffness in static condition and the results are used to determine the optimal number of HTS bulks for a 100kWh SFES.

Keywords : Superconductor flywheel energy storage system, superconductor journal bearing, stiffness

I. Introduction

고온 초전도 베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장시스템(Superconductor Flywheel Energy Storage System)은 잉여 및 소실 에너지의 저장을 통한 에너지 절약효과, 무공해 에너지의 재생을 통한

환경보호효과가 화학전지와 (Chemical battery)와 같은 타 에너지 저장시스템에 비해 월등히 뛰어난 시스템이다. 또한 자기 부상력 및 자기 고정력을 이용하여 무접촉 베어링을 구성하였기 때문에 기계적인 베어링과는 달리 마찰로 인한 손실이 거의 없어 저장효율이 매우 높으며 에너지 저장 밀도가 높다는 장점이 있다 [1-2]. 초전도 베어링에 있어 강성은 영구자석 회전자와 초전도체의 상관관계로 결정되는 초전도 베어링의 중요한 특

*Corresponding author. Fax : +82 42 865 7804
e-mail : hampstead@kepri.re.kr

성으로 플라이휠 시스템의 설계를 위해서는 정확한 평가가 필요하다 [3]. 본 연구에서는 100 kWh 초전도 플라이휠 에너지저장시스템에 사용될 초전도 베어링의 정확한 베어링 특성을 파악하기 위하여 100 kWh급 SFES에서 일어날수 있는 진동과 이에 따른 초전도 베어링의 정적, 동적 강성을 알아보고자 하였다. Fig. 1에서는 실제 100 kWh 급 초전도 플라이휠에 사용되는 베어링의 디자인을 나타내고 있다.

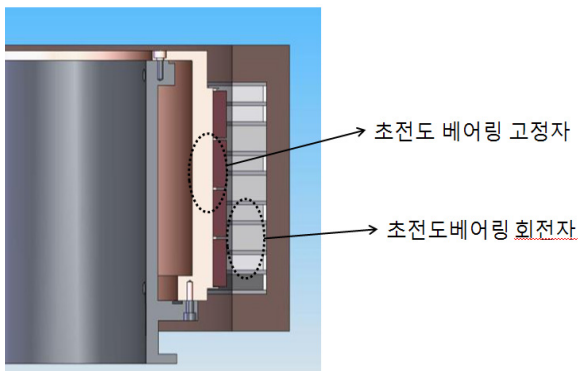


Fig. 1. Design of superconductor journal bearing for 100kWh SFES.

II. 제작 및 시험

100 kWh급 초전도 베어링의 성능을 유압식 인장시험기에서 허용되는 크기 내에서 측정하기 위하여 Fig. 2와 같이 2개의 모듈을 대칭으로 배치한 100 kWh급 초전도 베어링의 1/12 크기의 회전체 및 고정자를 별도로 제작하였다. 조립 및 분리의 용이성과 냉각 시 cryostat 수축에 의한 초전도 벌크의 파괴를 방지하기 위하여 외륜형 초전도 베어링 고정자를 module-based type로 제작하였다. 100 kWh급 베어링에 해당하는 고정자 모듈에는 35*35*10 [mm³] 크기의 YBCO 초전도체가 사용되었으며 회전자에는 초전도체에 강한 magnet flux가 도달할 수 있도록 NdFeB-35 영구자석(PM)을 이용하여 자체 디자인 하였다. 고정자 각각의 모듈에는 총 4개의 벌크가 장착되었으며 초전도체와 회전자가 일정한 간격을 유지할 수 있도록 벌

크의 표면을 가공하였다. 또한 대기저항을 최소화하기 위하여 10⁻⁶ [torr]를 유지하는 고진공 챔버를 제작하였고 초전도 벌크는 액체질소를 이용하여 구리 cryostat으로 간접 냉각하였다. 진공 챔버 내부에 LN₂가 순환되도록 한 후, 1/12 회전자를 인장시험기에 장착하고, 1/12 회전자의 자석과 초전도 벌크간 거리가 2 mm로 유지하며 하중시험을 준비하였다.

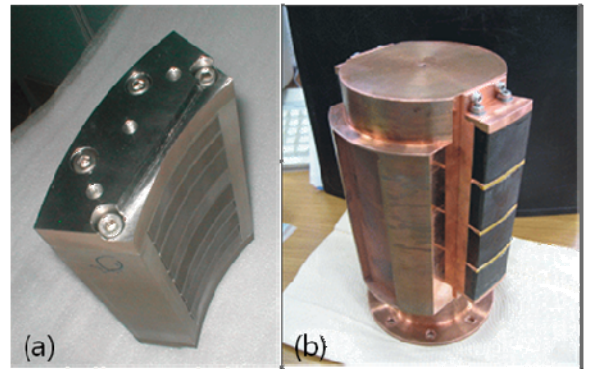


Fig. 2. Superconductor journal bearing (a) 1/12 subrotor b) 1/12 substator.

초전도 베어링 1/12 고정자의 pinning force를 측정하기 위해 field-cooling 된 위치에서 일정한 진폭으로 3회 이상 왕복 운동시켜 측정된 응력의 변화를 실시간으로 기록하였으며, 그 기율기로부터 초전도 베어링의 정적 강성을 구하였다. 동적 강성을 측정하기 위한 실험조건은 운전범위에서의 진동을 고려하여 선정하였다. 또한 회전자 회전시 초전도벌크에 도달하는 flux 분포가 sine 파와 유사하게 형성 되는 것으로 가정하여 실험 조건을 설계하였다. SFES의 운전조건을 고려하여 substator의 radial 방향의 베어링 특성을 각각 quasi-static 상태에서 평가 하였다.

III. 실험 결과

고정자에 부착된 초전도체의 안정적인 냉각을 확인하기 위해 초전도체의 여러 위치에 온도센서를 부착하여 온도 변화를 관찰하였다.

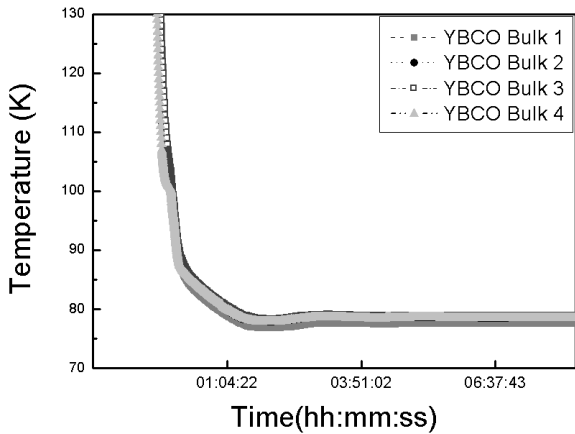


Fig. 3. Temperature of superconductor in substator during field cooling.

온도 측정 결과인 Fig. 3에서 보는 것과 같이 1/12 고정자에 장착된 초전도체 4개의 온도는 각각 $79\text{ K} \pm 0.5$ 으로 온도편차가 매우 적게 냉각됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 1/12 초전도 베어링의 초전도 벌크를 냉각하기 전과 후를 비교하여 quasi- static 상태에서 강성을 측정된 결과이다. 냉각을 진행하지 않은 실험에서는 회전자에 장착된 자석의 자장 및 기타요소에 의해 응력 변화가 발생하지 않음을 확인할 수 있었으며 영구자석과 초전도체 간의 상호 자장에 의하여 영구자석 회전자를 고정시키는 초전도체 고유의 pinning force만을 측정할 수 있도록 실험 장치가 설치되었음을 확인 하였다. 이후 초전도체를 냉각하고 $\pm 1\text{ mm}$ 구간에서 1 Hz의 주파수로 회전자 자석을 3회 왕복 한 결과 냉각 전에는 볼 수 없었던 자장의 힘에 따라 모듈에 hysteresis loop가 발생함을 알 수 있었다. 이때 강성은 측정된 pinning force 차이를 변위구간인 $\pm 1\text{ mm}$ 구간에서 선형으로 계산하였으며, 그 결과 모듈당 3.6 kgf/mm 를 나타내었다.

다음으로는 진동 주파수에 따른 자장변화를 분석하기 위하여 아래 Fig. 5 에서와 같이 0.2 Hz 단위로 속도를 증가시켜 변화를 살펴보았다. 실험 결과 1 Hz 미만에서는 속도에 따른 pinning force의 변화를 관찰 할 수 없었으며 이는 4 mm/sec (1Hz)의 미만의 저속영역에서는 강성에 영향을 줄 수 있는 magnetic flux 변화속도가 적어 측정된 초전

도 강성이 변화가 없었던 것이다. 그러므로 Fig. 5에서와 같이 강성에 영향을 주지 않는 1 Hz 이하의 quasi-static 조건에서 측정된 초전도 강성을 정적상태의 강성특성으로 이해하여도 무방할 것으로 사료된다.

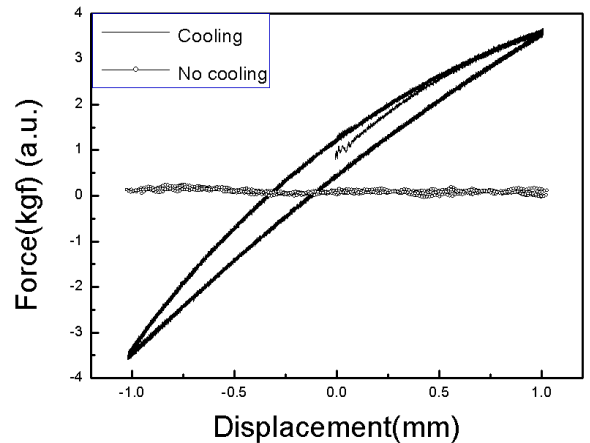


Fig. 4. Stiffness variation of substator module according to field cooling.

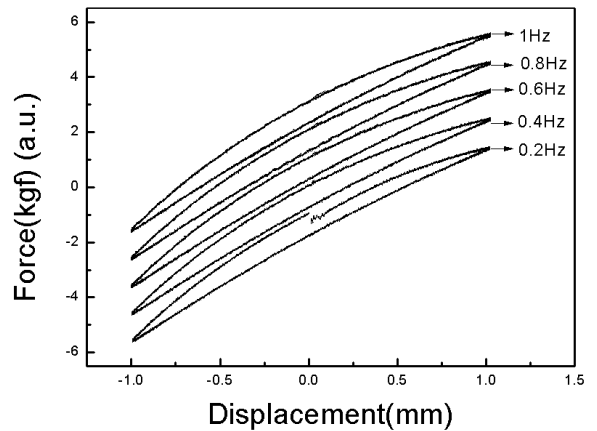


Fig. 5. Stiffness variation according to frequency.

Fig. 6에서는 주파수 진동을 1 Hz로 고정을 하고 0.2 mm ~ 1 mm의 진폭에 따라 강성의 변화폭을 살펴본 결과이다.

실험결과, 진폭이 적어지면 hysteresis가 적어지고 직선화 되는 것을 알 수 있으나, 진행한 모든 진폭 영역 대에서 강성의 차이가 1 % 미만으로

거의 동일한 크기의 stiffness를 확인 하였다. 이는 저 주파수 영역에서의 1 mm 이하의 작은 진폭변화는 pining force에 의한 강성에 거의 영향을 주지 않는 것을 지적한다. 이때 계산된 강성은 앞서 진행한 실험과 마찬가지로 모듈당 3.6 kgf/mm를 나타내었다.

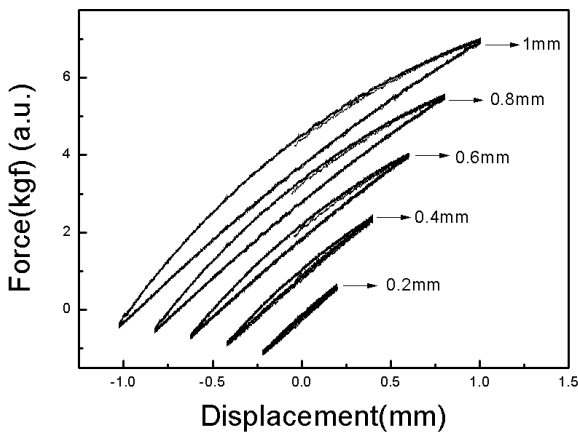


Fig. 6. Stiffness variation according to amplitude.

전력연구원에서 제작된 5 kWh SFES는 18,000 rpm 이상의 고속에서 운전이 이루어지며, 전 운전 영역에서 회전 진동의 허용치가 약 0.5 mm 이하이다. 이러한 조건과 유사한 상태에서 안정적으로 견딜 수 있는 베어링을 제작하기 위해서는 온도, 착자거리등의 주요 변수에 따른 초전도 베어링 강성 설계가 필수이며 이는 베어링의 초전도체 개수와 플라이휠 시스템 내에 위치를 결정짓는데 큰 역할을 할 것이다.

따라서 실제 로터와 베어링의 거리에 따른 강성변화를 알아보고자 Fig. 7과 같이 회전자의 영구자석과 고정자 초전도체 사이의 거리를 각각 1.5 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm로 변화시켜 냉각한 후에 그 변화를 관찰하였다. 앞서 진행한 실험과 동일하게 주파수 진동은 1 Hz로 고정하였고 ± 1 mm 구간을 3회 왕복 측정하였다.

위 그래프에 도식화된 초전도 모듈의 강성은 pining force가 변위구간에서 선형으로 변화한다 가정하고 강성을 ± 1 mm 구간에서 계산한 결과를 거리 별로 각각 나타낸 것이다. 실험결과 강성이

각각 2.1 kgf/mm에서부터 4.7 kgf/mm까지 거리가 감소함에 따라 큰 폭으로 증가함을 확인할 수 있었으며 이는 field cooling시의 거리가 시스템을 디자인 하는데 우선적으로 고려되어야 할 주요 인자임을 말해준다. 또한 pining force에 관련되는 주요 flux가 2 mm구간 이하에서 주로 관여하고 있음을 보여주고 있으며 이 영역에서의 0.5 mm의 작은 변화에도 강성은 30% 증가하였다.

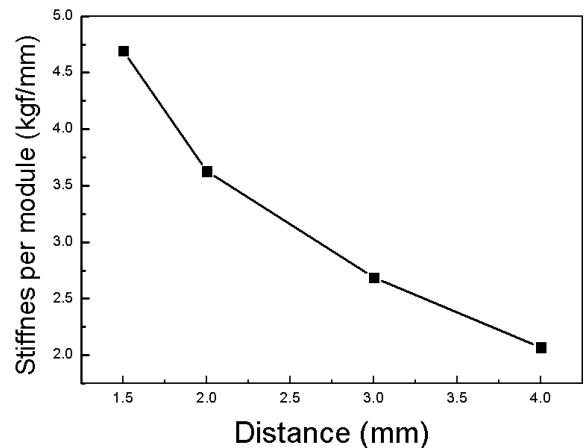


Fig. 7. Stiffness variation according to distance between PM and superconductor.

III. 결론

100 kWh급 초전도 베어링의 정적특성을 평가하기 위하여 베어링 크기의 1/12에 해당하는 substator를 제작하여 그 특성을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 평균 속력 4 mm/sec(1Hz) 미만에서 시행한 quasi-static 상태의 초전도 강성은 모두 일정한 값을 보여줬으며 이때 stiffness는 ± 1 mm구간에서 모듈당 3.6 kgf/mm를 나타내었다.
2. 저 주파수 영역(1 Hz이하)에서의 1 mm이하의 작은 진폭변화는 강성에 거의 영향을 주지 않는 것을 확인하였다.
3. Field cooling시 회전자와 고정자 사이의 거리가 강성에 영향을 주는 주요인자임을 확인하

였으며 특히 2 mm에서 1.5 mm로 변화할 때는 30 %의 강성변화를 확인 할 수 있었다.

이러한 결과는 초전도 플라이휠이 고속회전 할 때 일어날 수 있는 예상치 못한 상황을 대비하여 베어링의 성능을 최적으로 하는 주요인자를 제어 하고 보강함으로서 좀더 강하게 회전체를 부양시 킴과 동시에 안정적인 시스템에 기여할 수 있음을 보여 준다.

Acknowledgments

"This research was supported by a grant from Electric Power Technology Evaluation and Planning Center funded by the Ministry of Commerce, Industry, and Energy, Republic of Korea

References

- [1] T. H. Sung, S. C. Han, Y. H. Han, J. S. Lee, N. H. Jeong, S. D. Hwang and S. K. Choi, "Designs and analysis of flywheel energy storage system using High-Tc superconductor bearings," *Cryogenics* 42, pp. 357-362, 2002.
- [2] 한영희 외, "초전도 베어링을 이용한 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발," 초전도와 저온공학 7권 2호(2005), pp.17-20.
- [3] 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.* Vol.15, NO. 2, JUNE 2005.