

초전도 베어링의 마찰계수 측정

한영희, J. R. Hull*, 한상철, 정년호, 오제명, 성태현

전력연구원, 대전시 유성구 문지동 103-16

*Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439 USA

Friction of Superconductor Bearing

Y.H. Han, J. R. Hull*, S.C. Han, N.H. Jeong, J.M. Oh, and T.H. Sung

Korea Electric Power Research Institute,

103-16 Munji, Yusung, 305-380 Daejeon, South Korea

*Argonne National Laboratory, Argonne, IL 60439 USA

yghan@kepri.re.kr

Abstract - A high-temperature superconductor (HTS) journal bearing was studied for loss. Two HTS bearings support the rotor at top and bottom. The rotor weight is 4 kg and the length is about 300 mm. Both the top and bottom bearings have two permanent magnet (PM) rings with an iron pole piece separating them. Each HTS journal bearing is composed of six pieces of superconductor blocks of size 35x25x10 mm. The HTS blocks are encased in a cryochamber through which liquid nitrogen flows. The inner spool of the cryochamber is made from G-10 to reduce eddy current loss, and the rest of the cryochamber is stainless steel. The magnetic field from the PM rings < 10 mT on the stainless part. The rotational drag was measured over the same speed range. Results indicate that the 10 mT design criteria for magnetic field on the stainless part of the cryochamber is too high.

1. 서 론

고온초전도 베어링은 플라이휠 에너지 저장장치로서 기대되고 있다[1,2]. 고온초전도 베어링은 고온초전도체와 원통형 영구자석으로 이루어지며, 공기저항을 최소화하기 위하여 진공 중에서 작동하도록 되어 있다.

고온초전도 베어링에서의 회전 손실은 hysteresis, eddy current, windage 의 3가지로 분류할 수 있는데, 자속 밀도의 변화에 따른 초전도체 내에서의 hysteresis 손실은 속도와 무관하

고, 영구자석 주변의 전도체에 발생하는 eddy current 손실과 공기 저항은 속도에 비례한다.

이러한 손실은 에너지 저장장치의 효율을 결정하는 중요한 요인으로 고효율 에너지 저장장치에서 요구하는 0.1%/hr를 만족시키기 위해서는 매우 균일한 영구자석이 필수적이거나, 현실적으로는 어려운 점이 있어, 일정 불균일을 가진 영구자석을 사용했을 때의 마찰계수를 측정하고 이를 최소화하는 것이 필요하다.

2. 본 론

2.1 초전도 베어링

실험에 사용한 초전도 베어링은 Fig. 1과 같이 상하에 베어링이 있으며, 내부에 영구자석이 고정되어 있는 회전축으로 구성되어 있다. 회전축의 상부에는 알루미늄 판이 부착되어 있고, 외부에 고정된 모터에 의해 무접촉 자기 클러치 방식으로 회전시켰다. 회전자의 총길이는 약 300mm 이고 총중량은 4kg, 회전 관성 모멘트는 $1.32 \times 10^{-2} \text{ kgm}^2$ 이었다. 영구자석은 외경 40mm, 내경 20mm 이었다.

초전도 베어링의 고정자는 35x25x10 mm 크기의 초전도 체를 6각으로 배열한 구조로 G-10 재질로 만든 스푼에 고정되어 있으며, 나머지 부분은 스테인레스 스틸로 제작하였다. G-10 스푼과 스테인레스 스틸판은 Id 셸을 사용하여 진공을 유지하도록 하였고, 초전도체와 영구자석간의 최소간격은 3.67mm 이었다.

2개의 회전자 영구자석에 대한 자속 해석결과 Fig. 2와 같이 10 mT를 설계 기준으로 하였을 때, 영구자석 3개를 사용하는 경우에 스테인레스 스틸의 많은 부분이 겹쳐 eddy current 손실이 클 것으로 예상되었고, 영구자석 2개를 사용하는 경우에는 겹치는 부분이 거의 없으므로 영구자석 2개를 사용하는 회전자를 사용하였다.

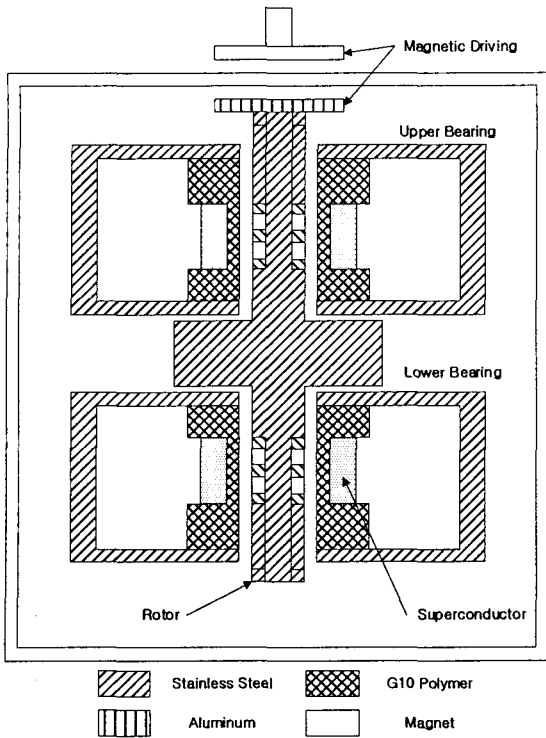


Fig. 1 Schematic diagram of superconductor journal bearings.

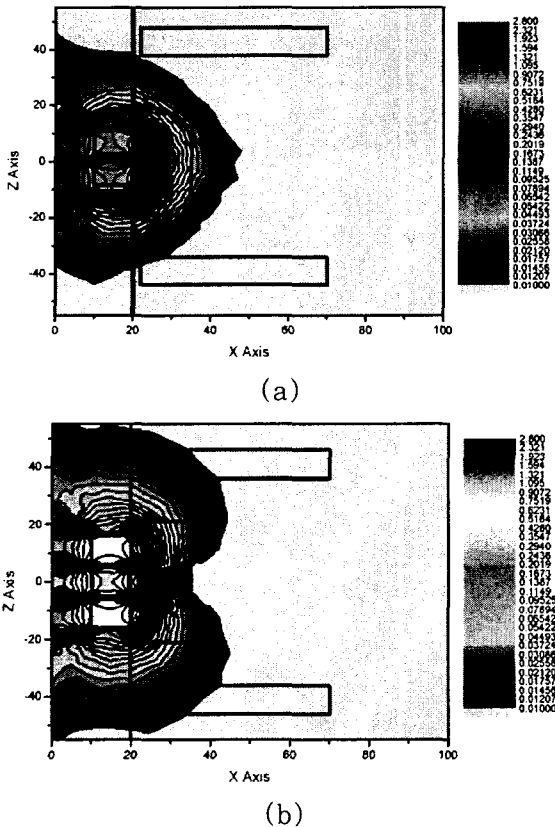


Fig. 2 Calculated magnetic field distributions of rotor for two HTS bearing designs. a) 3 PM rings. b) 2 PM rings. The Blackened area shows the region with magnetic field greater than 10 mT and less than 12 mT

2.2 실험방법

회전자의 자속밀도는 shim 부위에서 각도별로 측정하였으며, 회전 실험은 진공 챔버 내에서 진공도 5×10^{-5} torr 이하에서 진행하였다. 초기에 진공을 뽑고, 액체질소를 흘려 베어링을 냉각한 이후에 회전자의 고정쇠를 제거하는 방법으로 자장 중 냉각을 실시하였다. 상부에 고정된 모터로 자석 클러치를 통하여 회전자를 8000rpm 이상으로 회전시키고, 모터를 제거한 후에 회전자의 회전속도를 기록하였다. 이 회전속도의 변화 결과로부터 베어링의 마찰계수를 다음의 식으로 구하였다.

$$COF = -[(dE/dt)/E]v/(2g)$$

여기서 E 는 회전에너지, t 는 시간, v 는 영구자석 표면의 속도, g 는 중력 가속도를 표시한 것이다.

2.3 실험결과

Fig. 3은 회전자의 자속 밀도를 측정된 결과로 하부자석은 약 9.7%, 상부자석은 약 8.5%의 편차를 보이는 것을 알 수 있었다.

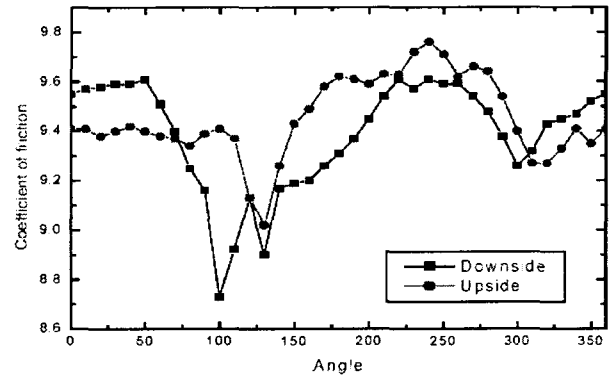


Fig. 3 Magnetic flux density as a function of azimuthal angle.

Fig. 4는 측정된 마찰계수로 두 번의 공진 영역을 통과함을 알 수 있었다. 첫 번째 공진 전에 회전자는 자장 중심을 따라 회전하였고 공진을 통과한 이후는 무게중심을 따라 회전하는 경향을 보였다. 외삽법으로 계산한 0 rpm에서의 마찰계수는 hysteresis 에 의한 것으로 0 ~ 500 rpm 영역에서는 1.5×10^{-5} 이었고, 2000 ~ 5000 rpm 영역에서는 2.5×10^{-5} 이었다. 두개의 값이 차이를 보이는 것은 느린 속도 영역에서의 값은 회전자가 자장 중심을 회전할 때의 마찰계수이고, 빠른 속도영역에서의 값은 회전자가 무게중심을 회전할 때의 마찰계수이기 때문으로, 회전자는 무게중심에 대해 회전 밸런싱을 한 상태이나 영구자석의 자속이 불균일하기 때문에 무게중심과 자장 중심이 달랐기 때문에 발생하는 현상이었다.

마찰계수는 대략적으로 회전수에 따라 1차적

으로 증가하는 현상을 보이는데, 이것은 영구자석과 초전도체 사이에 G-10 스펀을 사용하였음에도 eddy current 손실이 존재하는 것을 말하며, 베어링 설계 시에 적용한 10 mT 가 컷음을 의미한다.

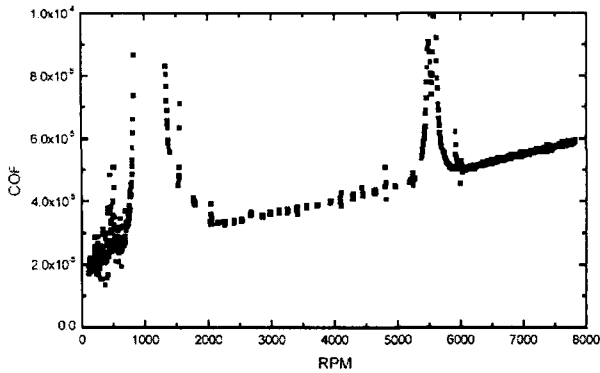


Fig. 4 Coefficient of Friction(COF) vs rotation rate in rpm.

3. 결 론

플라이휠 에너지 저장장치로 사용하기 위해서는 회전수는 20,000 rpm 이상이 될 것이며, 이 회전수에서 실험에 사용된 자속 편차가 8% 이상인 로터의 경우에는 eddy current 손실이 hysteresis 손실의 몇 배 이상으로 증가하게 될 것이다.

이 손실 값은 플라이휠에 적용하기에는 너무 큰 값으로 더 균일한 영구자석의 사용해야함은 물론 설계에 적용한 자속 10 mT 이하 기준을 더 작은 값으로 수정하여야 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] T. H. Sung, Y. H. Han, J. S. Lee, S. C. Han, N. H. Jeong, K. S. Oh, B. S. Park, and J. M. Oh, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 13, 2165-2168 (2001).
- [2] Mulcahy, T. M., Hull, J. R., Uherka, K. L., Abboud, R. G., and Juna, J., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 11, 1729-1732 (2001).
- [3] Hull, J., *Supercond. Sci. Technol.* 13, R1-R14 (2000).