

A Calculation of Superconductor Bearing Characteristics

H. J. Yun, Y. H. Han, S.C. Han, N. H. Jeong, K. J. Kim, B. S. Park,
J. M. Oh, T. H. Sung

Korea Electric Power Research Institute, Taejeon, Korea

초전도 베어링 특성 계산

윤희중, 한영희, 한상철, 정년호, 김경진, 박병삼, 오제명, 성태현

Abstract

For designing a flywheel system using superconductor, it is necessary to understand the basic characteristics of the classical superconductor bearing. It is difficult to expect the characteristics of superconductor bearings using models that have been introduced up to now. In the "Frozen image" concept, the force between the permanent magnet and the superconductor can be divided into two forces between permanent magnet and two imaginary magnets in the superconductor; one represents attraction force and the other represents a repulsion force. We calculated the characteristics of two superconductor bearings, such as an axial, the radial stiffness and the levitation force. This calculation method was very helpful to expect the characteristics of the superconductor bearings. Using this model, we established the optimum condition for the superconductor bearing.

Keywords : calculation, superconductor bearing, stiffness, image magnetic

I. 서론

초전도 베어링을 설계함에 있어 초전도 베어링 특성을 미리 예측하는 것은 매우 중요한데 이는 초전도체-자석간 관계를 통해서 알 수 있다. 지금까지 초전도체-자석간 관계를 표현한 여러 모델들이 [1-3] 제시되어 왔으나 이 모델들은 계산 과정이 매우 복잡하고 어려워서 쉽게 해를 구할 수 있는 방법이 필요하다. 본 논문은 초전도 베어링 특성을 파악하고자 "frozen image magnet model"을 이용하여 두개의 다른 베어링 모델을 적용해 초전도체-자석간 수치해

석 결과와 실험값을 비교 검토하였다.

II. 본론

1. Frozen image magnet model

Frozen image magnet model [3]은 초전도체위에 영구자석을 올려놓고 냉각을 시키면 초전도체 안에 두개의 가상 자석이 생성되어 인력과 척력이 공존하는 초전도 현상을 표현한 모델이다 [4]. Fig. 1과 같이 초전도체에 생성된 두개의 가상자석은 초전도체 표면을 기준으로 하여 영구자석과 대칭인 곳에 위치하게 된다. 첫 번째 가상 자석은 영구자석과 반대되는 착자 방향을 갖으며 냉각 시 생성된 위치에 고정된다. 두

*Corresponding author. Fax : +82 42 865 5804

e-mail : heejoong@kepri.re.kr

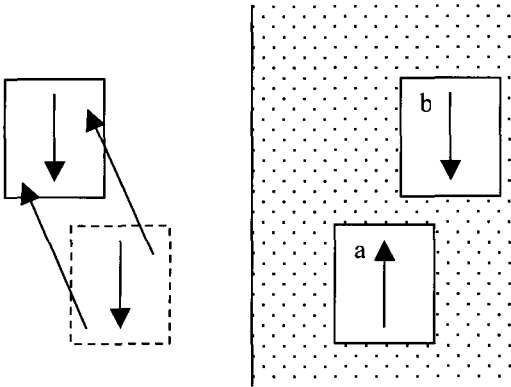


Fig. 1. Frozen image magnet model in which a superconductor is changed by two imaginary magnets after field cooling.

번째는 영구자석과 동일한 착자 방향을 가지며 초전도 표면을 기준면으로 하여 영구자석과 항상 대칭을 이루고 있다. 그래서 영구자석이 초전도체 표면쪽으로 미소변위 dx 만큼씩 이동을 하게 되면 첫 번째 가상자석과 영구자석간 거리 $L1$ 은 $L1-dx$ 만큼 변하게 되는데 비해 두 번째까지 거리 $L2$ 은 $L2+2dx$ 만큼 변하게 되어 인력보다는 척력이 강하게 되고 반대로 초전도체 표면에서 멀어지면 척력보다는 인력이 강하여 초기 위치를 유지하려는 초전도체 특성을 잘 표현하고 있다.

2. 초전도 베어링 부양력의 계산

초전도 베어링은 기계식 베어링과 달리 회전자와 접촉이 없기 때문에 회전자를 충분히 지지할 수 있는 부양력을 미리 예측하는 것이 필요하다. frozen image magnet model에서 두 번째 가상자석은 초전도체 표면과 수직인 평면에 영구자석과 항상 공존하기 때문에 초전도 베어링의 축 방향에 대한 힘은 항상 “0”이 된다. 그러므로 초전도 베어링 부양력 계산은 첫 번째 가상자석과 영구자석의 관계를 이용하여 구할 수 있다. 부양력 계산에 사용된 모델은 두 가지이며 아래에 구분하여 논하고자 한다. 수치해석 해는 전자기장 상용 해석 프로그램인 Maxwell 3D을 이용하여 구하였다.

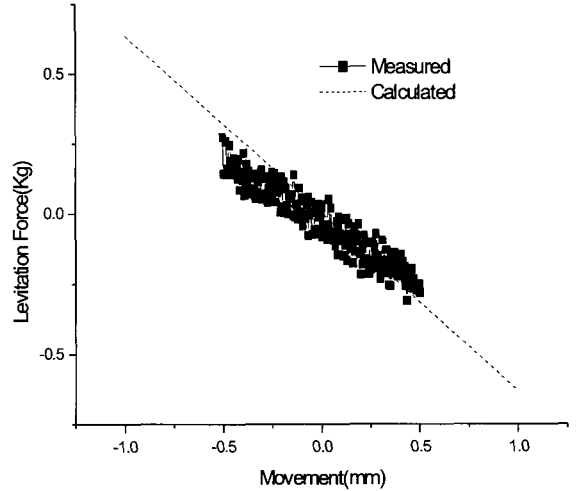


Fig. 2. Levitation force of model I

i) 베어링 모델 I

베어링 모델 I에 사용된 초전도 베어링 모델은 원주방향으로 초전도체 6개가 동일한 각으로 구성되어 있으며 회전자는 초전도 베어링 안에 삽입되어진다. 초전도 베어링 내경은 45.34 mm이고 회전자는 외경 40, 내경 20, 두께 10 mm인 자석이 같은 극끼리 두개가 결합된 구조이다. 회전자의 외경과 초전도체 표면까지의 거리 즉, FC(field cooling) 거리는 3.67 mm이다. 여기에서 회전자 외경과 초전도 베어링 내벽까지의 거리, clearance는 2.67 mm 이다. 초전도 베어링과 회전자 모델은 회전자와 초전도체 6개와의 관계가 동일 관계임으로 하나의 초전도체와 회전자간 인력을 구하였다. 초전도 베어링의 축방향의 수직면에 대한 F_x, F_y 성분은 서로 상쇄되어 0이 된다.

Fig. 2는 모델 I에 대한 초전도 베어링 부양력의 수치해석 결과와 실험결과를 나타내고 있다. 초기 위치에서의 미소 변위에 대한 실험 결과의 초기강성은 0.44 kg/mm이나 수치해석 결과치는 0.64 kg/mm을 나타내고 있어 실험 결과의 초기강성은 계산 결과 대비 0.7의 값을 가진다.

ii) 모델 II

베어링 모델 II에 사용된 초전도 베어링 모델은 원주방향으로 초전도체 8개로 등분 구성되어 축 방향으로 3개가 적층되어 있고 이때

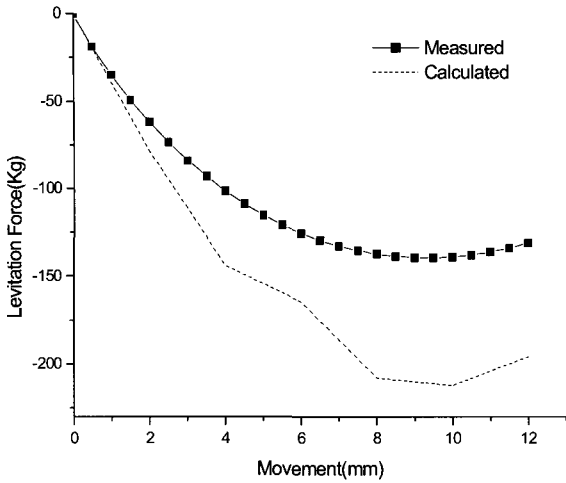


Fig. 3. Levitation force of model II

사용된 회전자는 베어링 안쪽에 삽입된다. 초전도 베어링 내경은 76 mm이고 회전자에 삽입되는 영구자석은 외경 70, 내경 40, 두께 18 mm이며 같은 극끼리 서로 마주보고 있고 6개가 결합된 구조이다. 회전자의 외경과 초전도체 표면까지의 거리 즉, FC(field cooling) 거리는 4 mm이다. 여기에서 회전자 외경과 초전도 베어링 내벽까지의 거리, clearance는 1 mm 이다. 초전도체 8개가 대칭구조이므로 베어링 모델 I 과 같이 하나의 초전도체와 회전자간 작용력을 구하였다.

Fig. 3은 회전자의 축방향 이동거리에 따른 초전도베어링 모델 II의 부양력에 대한 수치해석 결과와 실험 결과이다.

이 결과로부터 베어링의 강성을 구할 수 있다. 실험 결과에서 초기강성은 31 kg/mm이며, 수치해석 결과는 40 kg/mm을 나타내고 있다.

베어링 모델 II는 계산값 대비 0.8의 실험치를 나타낸다. 이러한 초기 강성의 차이는 유한한 크기인 초전도체 끝부분에서는 포획자장이 "0"이 되는 현상을 무시하고, 초전도체 표면을 무한대로 가정했기 때문에 발생하는 오차라고 생각된다. 초전도체 표면 방향으로 자속 변화는 크고, 초전도체 수직 끝부분에서는 자속이 약하기 때문에 초전도 표면 방향으로는 무한대로 가정해도 무리가 없으나, 회전방향으로는 균일하고 강한 자장이 초전도체 끝부분까지 존재

하므로 무한평면의 가정에서 오차가 발생된다 [1,5].

III. 결론

1. 두개의 초전도 베어링 모델에 대하여 초전도체-자석간 관계를 frozen image magnet model을 적용한 부양력과 강성을 계산하였다. 계산한 값과 실제 실험값은 근사한 결과를 가졌다.
2. Frozen image magnet model을 이용하여 초전도체-자석간 관계를 정확히 나타내기 위해 선 자석과 초전도체간 크기에 따라 달라질 shape factor를 파악하여 고려되어야 할 것이다.
3. 초전도 베어링 초기 설계시 frozen image magnet model을 적용하여 복잡하고 난해한 초전도체-자석간 작용력을 쉽게 파악함으로써 초전도 베어링 특성을 얻기 위한 기본 자료로 활용될 수 있을 것이다.

References

- [1] A. C. Rose-Innes, E.H. Rhoderick, "기초초전도물리학", 겸지사과학 기술도서, 1992.
- [2] M. Komori and T. Hamasaki, "Improvement and Evaluation of Bearing Stiffness in High Tc Superconducting Magnetic Bearing", IEEE Trasaction on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, March 2001.
- [3] A. O. Hauser, "Calculation of Superconducting Magnetic Bearing using a Commercial FE- Program (Ansys), IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 33, No. 2, March 1997.
- [4] M. Zeisberger, T. Habisreuther, D. Litzkendorf, O. Surzhenko, R. Muller, W. Gawalek, "Optimization of Levitation Forces", IEEE Transaction on Applied Supercon- ductivity, Vol. 11, No. 1, March 2001.
- [5] S. Yokoyama, S. Nakamura, M. Hirose and H. Nasu, "Analysis of Magnetic Force and Rotiational Losses of High-Tc Superconducting Magnetic Bearings by Preisach's Diagram", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, March 2001.