

로터 형상에 따른 초전도 베어링 강성 변화

유희중*, 한영희, 한상철, 정년호, 김경진, 박병삼, 성태현
전력연구원

Study of superconductor bearing stiffness according to shape of rotor

H.J. Yun*, Y.H. Han, S.C. Han, N.H. Jeong, K.J. Kim, B.S. Park, T.H. Sung
Korea electric power research institute

heejoong74@kepri.re.kr

Abstract - The properties of superconductor bearing are depend on shape of rotor, especially thickness of ferromagnetic shim between permanent magnets. The levitation forces and stiffness of superconductor bearings as the thickness of the ferromagnetic shim were calculated and measured. Frozen image model and difference of magnetization per unit volume of the superconductor were used to calculate stiffness for two models. The calculated values had similar trend with the measured one. From the results, an optimal design of the rotor was selected.

key words : superconductor bearing, stiffness, ferromagnetic body, levitation force

1. 서 론

초전도 베어링 특성은 초전도 벌크 배열과 로터 형상에 따라 많은 변화를 나타내는데 그중 로터에 사용되는 강자성체 형상 변화는 영구자석의 자장의 흐름을 변경시키므로 외부자장을 변화시키는 주요한 인자 역할을 하게 되어 초전도 벌크 특성에 영향을 주게 된다.[1,2] 본 논문은 고온초전도체의 edge effect 영향을 받지 않는 서로 다른 사이즈를 가진 로터를 설계하여 실험과 수치계산을 통해 초전도 베어링의 최대부양력을 발생시키는 최적의 로터를 설계 할 수 있었다. 수치계산은 Maxwell 2D & 3D를 이용하여 frozen image model과 초전도 벌크 표면에서 외부자장이 변화하였을 때 나타나는 자속밀도 분포 차를 이용하여 구하였다.

2. 본 론

2.1 Frozen image model

Fig.1은 Field cooling 후 초전도 벌크에 생성되는 frozen image magnet과 diamagnetic image magnet를 표현 한 것으로 frozen image[3]는 초

전도 벌크 위에 있는 영구자석과 착자 방향이 같으며 초기 위치에 고정되고 diamagnetic image는 영구자석과 착자 방향이 반대여서 동일 극끼리 마주보고 있으며 영구자석 이동에 따라 초전도 벌크 표면을 기준으로 대칭위치에 생성된다.

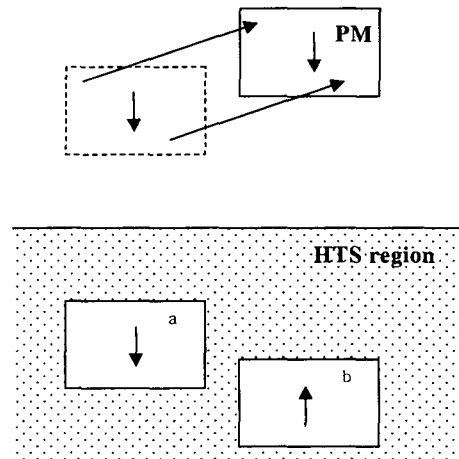


Fig. 1. Frozen image model

Fig.1의 frozen and diamagnetic image magnet과 영구자석간 자기장 해석을 통해 K_{fr} , K_{dia} 를 구할 수 있다. $K = K_{fr} + K_{dia}$ 관계를 이용하면 전체 강성 K 값을 구할 수 있다. 전체 강성 $K = \frac{3\mu_0^2}{4(2z)^5} [2\cos^2\mu + \sin^2\mu]$ 이다.

2.2 모델

Fig.2는 실험 모델에 대한 계략도이다. 모델 I은 외경 30 mm에 내경 10 mm, 두께 10 mm이고 모델 II는 모델 I과 단면 모양이 같고 외경과 내경이 10 mm 씩 늘어난 모델이다. 영구자석 배열은 동일 극성으로 마주보고 있으며 그 사이에 강자성체가 삽입된 로터이며 길이는 23 mm에서 32 mm까지 변화하게 된다.

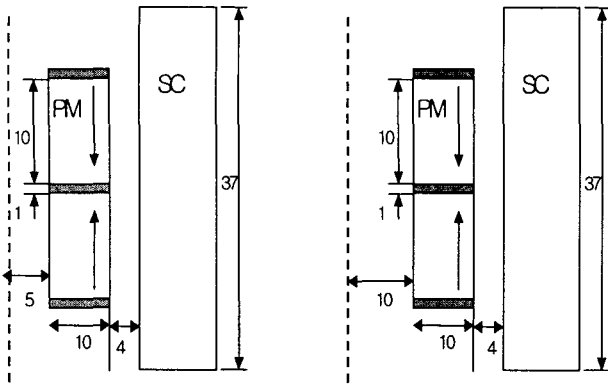


Fig. 2. Schematic diagram of model I and II

실험에 사용된 모델 I과 II 영구자석은 NdFe 계열이며 수치모델은 Br값이 1.1 T인 같은 계열 영구자석을 사용하였다.

2.3 실험 방법

제작시 오류로 인해 영구자석은 원주방향에 대한 불균일성을 가지고 있다. 이러한 오류는 실험 오차를 발생함으로 이런 실험 오차를 줄이기 위해 원주방향으로 90도씩 회전하여 4회에 걸쳐 부양력을 측정하였고 그 평균값을 취하였으며 그때 로터의 축방향 이동 stroke는 ± 0.5 mm 였다.

수치계산에 사용된 모델 중 frozen image mode은 실험에 사용된 모델과 동일한 NdFe 계열을 사용하였고 영구자석 특성치인 Br 값을 1.1 T를 사용한 것을 제외하곤 실험조건과 크기는 동일하게 모델링 하였으며 로터의 축방향 이동 stroke에 대해선 미소 변위로 가정하여 최대 stroke 변위에서 Maxwell 3D을 이용하여 해를 구하여 모델에 대한 강성을 구하였다.

초전도 벌크 표면의 자속밀도 변화차를 이용한 수치 모델은 Maxwell 2D을 이용하여 제작된 로터를 모델링한 후 초전도 벌크 표면에서 자속밀도 분포를 구하였고 삼각형 형태의 초전도 벌크 자화특성을 factor로 삽입한 후 초전도 벌크 표면에 포획된 자속밀도를 계산하였다. 포획된 자속밀도 분포는 로터가 이동에 하게 되면 포획된 자장을 이동시키는데 그때 반발력이 발생됨으로 자속밀도 분포 차를 구하여 강자성체 두께에 따른 초전도 베어링의 강성의 변화 경향을 파악하였다.

2.4 실험 결과

2.4.1 초전도베어링 부양력 측정 결과

Fig.3는 모델 I의 결과 값이며 각각의 강자성체 두께에 따른 부양력을 측정한 결과를 나타내고 있다.

Fig.3을 토대로 구해진 강성은 강자성체가 1 mm일때 0.38 kg/mm, 2 mm 일때 0.46 kg/mm, 3 mm 일때 0.48 kg/mm, 4 mm 일때 0.43 실험을 통해 구해진 강성은 강자성체 두께가 얇은 순서로 0.27 kg/mm, 0.46 kg/mm, 0.49 kg/mm,

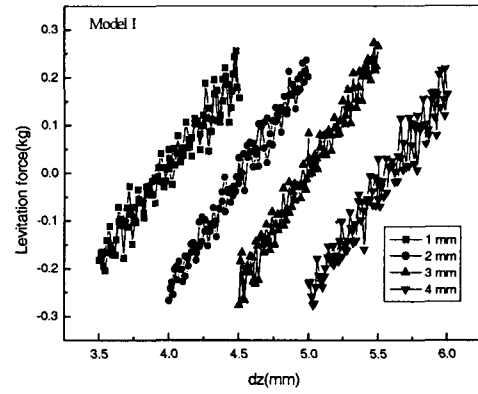


Fig. 3. Measured levitation force of model I according to thickness of ferromagnetic bodies

kg/mm를 보이고 있으며 강자성체 3 mm 일 때 최대 강성을 갖는다.

Fig.4는 모델 II의 강자성체 두께가 변경되었을 때 나타나는 부양력 변화를 표현하고 있다.

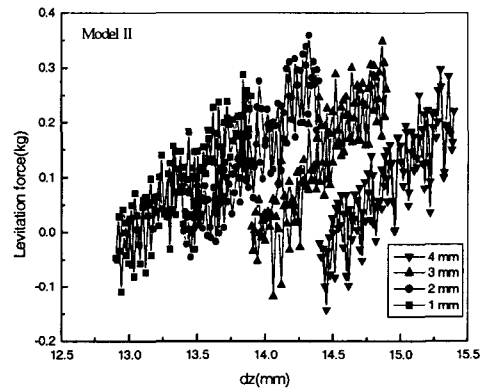


Fig. 4. Measured levitation force of model II according to thickness of ferromagnetic bodies

0.46kg/mm를 나타내며 모델 I과 같이 강자성체 두께가 3 mm 일 때 최대 강성을 나타내고 있다.

2.4.2 Frozen image model 계산 결과

Fig.5는 모델 I에 대해 강자성체 두께에 따른 수치계산 결과와 실험결과를 같이 표현한 것으로 실험결과와 매우 일치하고 있으며 실험결과와의 오차는 실제모델 Br 값이 크기 때문이다. frozen image model로 구한 수치계산 결과 역시 강자성체 두께가 3 mm 일 때 최대 강성을 갖는다.

Fig.6은 모델 II에 대한 수치계산 결과와 실험 결과 값을 표현한 것이다. 강자성체 두께가 2 mm 일 때를 제외하고는 강자성체 두께에 대한 축방향 강성변화는 실험 결과와 잘 일치하고 있다.

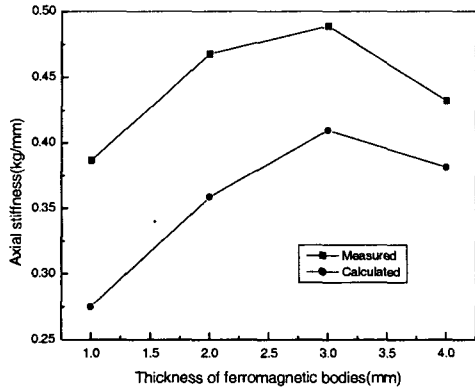


Fig.5. Measured and calculated axial stiffness of model I according to thickness of ferromagnetic bodies

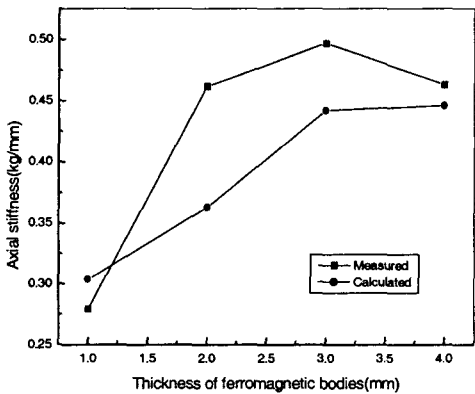


Fig.6. Measured and calculated axial stiffness of model II according to thickness of ferromagnetic bodies

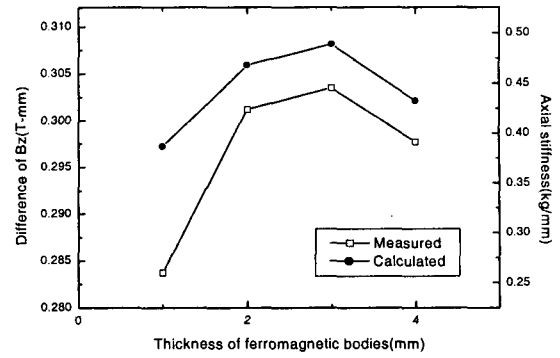
2.4.3 자속밀도 분포를 이용한 수치계산 결과

Fig.8는 모델 I과 II의 강자성체 두께에 따른 초전도 베어링 강성 계산치와 측정된 강성을 함께 나타내고 있다.

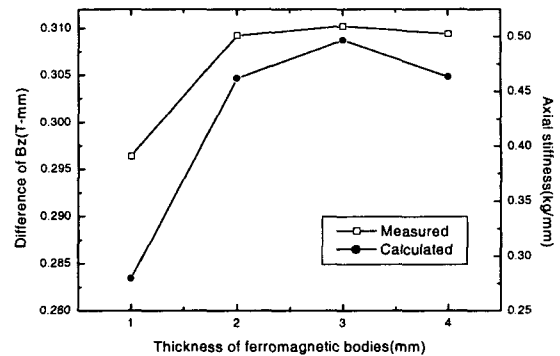
강자성체 두께 변화는 초전도 벌크에 포획된 자장 분포를 변화시킴으로써 초전도 베어링 강성에 영향을 미치게 된다. Fig.8에 나타난 결과를 살펴보면 모델 I과 II에 대해 강자성체 두께가 1 mm에서 4 mm로 증가됨에 따라 영구자석이 이동함으로써 발생하는 초전도 벌크 표면 포획 자속밀도 분포차가 실험결과의 강성변화 곡선과 매우 비슷한 경향을 보이고 있다. 모델 II도 강자성체가 3 mm 두께를 가질 때 최대 값을 나타낸다.

3. 결 론

1. frozen image model로 구한 강성과 측정된 강성은 실험에 사용된 영구자석의 Br 값이 크기 때문에 발생하는 오차를 제외하면 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) model I



(b) model II

Fig.8. Measured and calculated axial stiffness of model I as thickness of ferromagnetic bodies

2. 초전도 베어링 강성의 상대 평가를 위해 제시된 초전도 벌크 표면 자속밀도 변화차를 이용한 수치 모델 계산 결과를 통해 측정된 강성 변화와 동일한 경향을 보이고 있다.

3. frozen image model과 초전도 벌크 표면의 자속밀도 변화차를 이용한 수치 모델을 통해 계산된 강성과 측정된 강성의 경향이 매우 유사하여 두가지 기법을 이용하여 초전도 베어링에 적합한 로터를 설계 할 수 있었고 초전도 베어링 설계 시 예측 모델로 활용될 수 있을 것이다.

(참 고 문 헌)

- [1] Y.H. Han, "Design a hybrid high Tc superconductor bearings for flywheel energy storage system", physica C, 372-376, 2002
- [2] F.C. Moon, Superconducting Levitation: Applications to Bearings and Magnetic Transportation, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1994 (Chapter 2).
- [3] Ahmet Cansiz, "Correlation between free oscillation frequency and stiffness in high temperature superconducting bearings", physica C, 390, 356-362, 2003