

## 수직축형 플라이휠 시스템을 위한 초전도 하이브리드 베어링의 설계

### Design of Hybrid Superconductor Bearing Set for a Flywheel System with Vertical Axis

이준성\*, 한영희\*, 한상철\*, 성태현\*, 김상준\*

Joon-Sung Lee\*, Young-Hee Han\*, Sang-Chul Han\*, Tae-Hyun Sung\*, Sang-Joon Kim\*

**Abstract** : A vertical axis flywheel system was conceptualized, which uses a hybrid superconductor bearing set to carry the wheel part load. The multiple designs of magnetic bearing and superconductor bearing were analyzed by using conventional numerical magnetostatic analysis method. The best medels were selected among four different types of permanent magnet bearings for upper bearing and two types of superconductor bearings for lower bearing, respectively. These results were discussed in regard of application to the flywheel system with a passive hybrid magnetic bearing set.

**Key Words** : magnetic, bearing, hybrid, flywheel, superconductor

#### 1. 서 론

각종 규모의 전력을 저장하는 에너지 저장용 플라이휠 시스템에 고온초전도 벌크를 이용한 초전도 베어링을 사용하는 연구가 현재 다각도로 진행중이다. 그 예로, Boeing Phantom Works 에서는 Intermagnetics General Corporation, Argonne National Laboratory 등과 협력하여 복합재 휠을 사용한 10 kWh 용량의 초전도 플라이휠 장치를 개발 중이고, Chubu Electric 은 Dowa, Mitsubishi 와 협력하여 2 개의 FRP 휠로 이루어진 13 kWh 용량의 초전도 플라이휠을 개발 중이다[1]. 이 외에도 일본, 유럽, 미국의 수많은 기업, 연구소, 대학 등지에서 초전도 베어링을 비롯한 수많은 관련 기술들을 연구하고 있다. 앞에서 예시한 공동 연구들에서와 같이 초전도 플라이휠 기술은 전기, 기계, 재료 등 넓은 분야의 기술들이 접목되어 이루어지는데, 본 논문에서는 그 중 초전도 베어링에 영구자석 베어링을 추가하여 제작비용을 절감하고 효율을 높이는 부분에 관한 연구 내용을 보이고자 한다.

플라이휠 시스템은 회전축의 방향에 따라 수직축형과 수평축형으로 나눌 수 있다. 이 중 수평축형은 회전체 축이 수평 방향인 것으로 여기에 초전도 베어링을 적용하려면 저어널베어링 형태로 들어가게 된다. 초전도 저어널베어링의 장점은, 고정자가 회전축을 들

러싸고 있는 형태이기 때문에 고속 회전시에도 베어링 부분의 선속도가 비교적 작아서 자속 변화에 의한 회전 손실이 적을 수 있고 더욱 안정하다는 점이다. 그러나 이러한 베어링이 수평축에 적용되어 하중을 지지하게 되면 하중이 회전 비대칭적으로 작용함에 따라 베어링의 회전 손실이 커지고 부양 효율이 떨어지며 초기 세팅이 어렵고 시스템의 여타 구성부에 영향을 주는 등 많은 문제점이 발생한다. 또한 초전도체의 비용을 절감하기 위해 회전자 및 고정자에 영구자석들을 사용하는 하이브리드 구성을 할 때에도 회전 대칭적인 배치가 곤란하므로 어려움이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 초전도 저어널 베어링의 장점을 살리면서도 수평축 시스템의 문제점을 피하고 회전 손실 및 초전도체 비용을 절감할 수 있는 초전도 하이브리드 베어링을 이용한 수직축 중공형 플라이휠 시스템을 구상하고, 동 시스템에 포함되는 자기베어링들과 초전도 베어링에 대해 Maxwell 2D & 3D 수치해석 프로그램을 사용하여 정자기장 해석을 실시하여 최적의 베어링 모델을 선정하고자 하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1. 분석 대상 시스템의 개요

본 연구에서 개념적으로 설계된 플라이휠 장치의 회전체(휠)는 회전 대칭축이 수직 방향으로 배치된 중공 실린더 형태로 구성된다. 이 실린더의 중심 부위에 회전축에 직교하는 방향으로 균일한 2극 자속 분포를 발생시키는 외전형 할바크(outer rotor-type Halbach) 동/발전기 회전자가 위치하고, 실린더의 하부에 링형 영구자석 등으로 구성된 초전도 저어널베어링의 회전자가, 실린더의 상부에는 영구자석 링으로 구성된 영구자석 베어링 회전자가 위치하게 된다.

시스템의 고정부에는 휠 아래 부분에서 초전도 베어링의 고정자부가 실린더 중공 내부로 삽입되고, 휠 상부에 회전자 자석과 인력을 발생하는 링형 영구자석이 상하 위치 이동이 가능하게끔 설치된다. 또한 휠의 중심부를 위로부터 관통하는 형태로 전동/발전기의 고정자 코일 및 지지대가 삽입된다. 휠의 축방향 양 끝 부분에는 가이드 베어링이 설치되어 저속 공진역(resonant region)을 지날 때 회전체의 이탈 및 손상을 막기 위한 지지력을 제공하게 된다.

이와 같이 구성된 시스템은 휠 중량의 대부분을 상부 영구자석 베어링의 인력으로 감당하고, 그 일부를 하부 초전도 베어링이 부담하도록 설정된다. 상부 영구자석 베어링이 반경 방향으로 복원력을 제공하나 축방향으로 안정점이 없다는 문제는, 하부 초전도 베어링이 축 방향으로도 강한 복원력을 제공한다는 점으로

\* 정 회 원 : 전력연구원 전기이용기술그룹

원고접수 : 2001년 04월 25일

심사완료 : 2001년 05월 25일

해결될 수 있다. 이 시스템 회전체의 부양은 다음과 같은 절차에 의한다. 우선 상부 영구자석 베어링 고정자와 회전자 간의 인력이 휠 중력보다 약간 크도록 비자성체 등으로 거리를 맞추어 제작된 상부 고정자부에 휠을 자기력에 의해 부착시켜 올린 후 하부 초전도 베어링을 냉각시킨다. 냉각 후 상부 영구자석 베어링 고정자를 위로 약간 이동하여 휠이 아래로 떨어지도록 한다. 이 때는 휠이 시스템 가동시의 평형 위치보다 약간 아래로 떨어지게 된다. 여기서 영구자석 베어링 고정자를 약간 아래로 내리면 휠이 평형 위치에서 부양된다.

이렇게 구성된 플라이휠 시스템은 중력에 대칭인 수직축형이라는 점에서 오는 초전도 베어링의 회전 손실 절감이나 시스템 설계·구성 및 가동의 편의성 등 이외에도 많은 장점을 가지게 된다. 우선 상부에 영구자석 베어링을 사용함으로써 초전도 베어링을 사용했을 때 초전도체의 불연속으로 인해 필연적으로 발생하는 자석 내의 와류손(eddy current loss)이, 자석의 불균일에 의해 발생하는 양 정도로 획기적으로 감소하고, 초전도체 내부의 자속 이동에 의해 발생하게 되는 만큼의 철손(hysteresis loss)도 없어진다. 휠 중량의 대부분을 영구자석 베어링이 부담하게 되는 만큼 하부 초전도 베어링의 하중 부담이 줄어들어 그만큼 회전 손실이 줄어들게 되고, 초전도체의 비용과 냉각 비용도 절감할 수 있게 된다. 또한 하부 초전도 베어링을 저어널베어링 형태로 함에 따라 회전시 베어링의 선속도가 타 초전도 베어링에 비해 비교적 작아 와류손 등을 크게 줄일 수 있다. 이 외에도, 이 시스템의 부양 절차에 의해서 초기 회전시의 과도적인 부양 고도 강하를 완화할 수가 있으며, 전동/발전기가 회전체 중심부에 위치함에 따라 구동시에 원뿔상 진동 모드(conical vibration mode)의 가진이 최소화된다는 장점이 있다.

**2.2. 상부 영구자석 베어링에 대한 수치해석**

아래 그림 1의 4가지 영구자석 베어링 모델에 대하여 Maxwell 2D 및 3D 수치해석 프로그램을 사용하여 정자기력(static magnetic force)을 계산하였다. 이 소프트웨어는 유한요소법을 통해 자기장을 해석하고 미소 메쉬 변형(mesh deformation) 방법으로 자기력을 구한다. 3D 계산시에는 계산 차수(iteration) 간 에너지 오차 1%, 2D 계산시에는 0.15% 이내에서 종료하도록 계산 정밀도를 설정했다. 영구자석 NdFe-30은  $B_r = 1.1 \text{ T}$ ,  $H_{cB} = -10.53 \text{ kOe}$ 을 가지도록 설정되었고, Steel-1008의 자화곡선은 그림 2에 나타내었다.

그림 1(a)는 도넛 형태의 NdFe-30 자석 두 개가 상부에 고정자, 하부에 회전자로서 놓여진 형태의 가장 단순한 베어링이고, 그림 1(b)는 위 1(a) 베어링의 각 마주보는 극면에 강자성 자심(magnetic shim)으로서 사다리꼴 단면의 Steel-1008 링을 붙인 형태의 베어링이다. 그림 1(c)는 위 1(b) 베어링의 자심 형태를 삼각형 단면에 가깝게 변형시킨 형태이고, 그림 1(d)는 1(a) 베어링의 고정자 자석의 축방향 두께를 증가시킨 형태의 베어링이다.

위의 (a)~(c)의 축대칭(axisymmetric) 2차원 모델에 대해 수치 방향의 인력을 계산한 결과가 아래의 그림 3에 나타나 있다. 갭 사이 간격  $d$  가 1 mm 일 때를 보면 (b), (c) 모델에서 인력이 거의 동일한 것으로 보아, (c) 모델과 같이 자심의 극면 반경너비가 3 mm인 경우에서도 자심의 포화가 일어나지 않았음을 알 수 있다. 그러나 갭 간격 4 mm 이상 정도일 때를

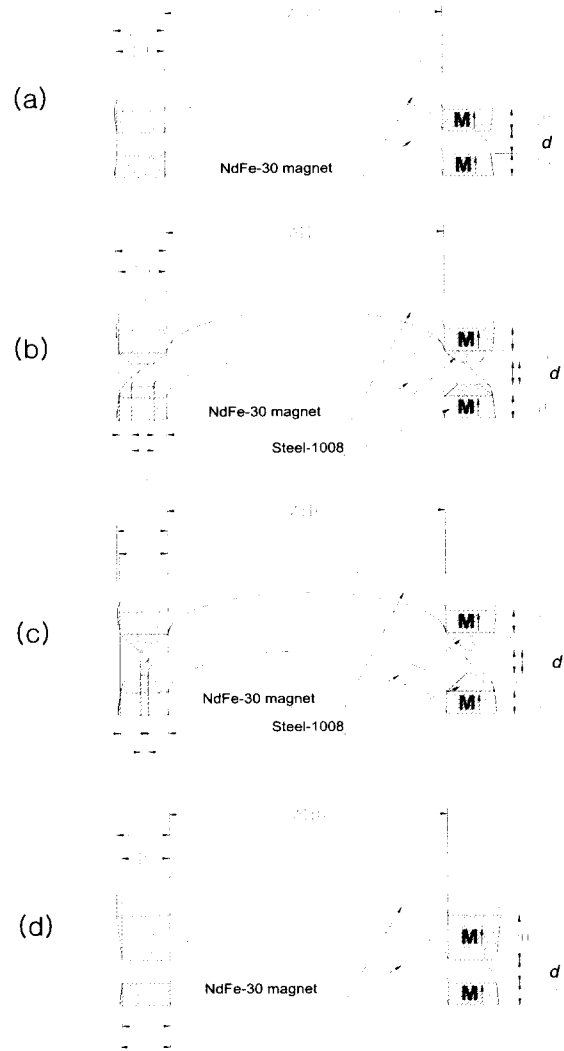


그림 1. 시스템 상부 영구자석 베어링 모델들. (a) 기본형, (b) 사다리꼴 단면 자심 부착형, (c) 삼각형 단면 자심 부착형, (d) 고정자 자석 축방향 연장형.

Fig. 1. Models for the upper permanent magnet bearing. (a) basic type, (b) magnetic shims of trapezoidal cross section attached, (c) magnetic shims of triangular cross section attached, (d) axially lengthened stator magnet-type.

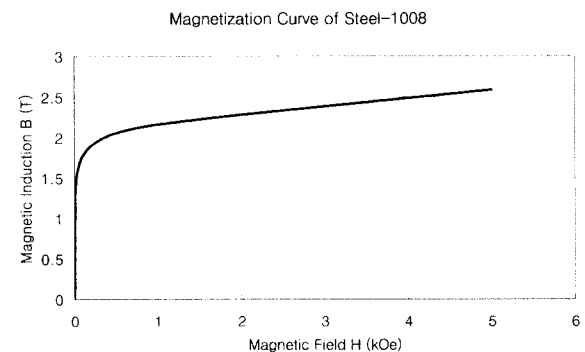


그림 2. 자심 재료(Steel-1008)의 자화곡선. Fig. 2. Magnetization curve of Steel-1008.

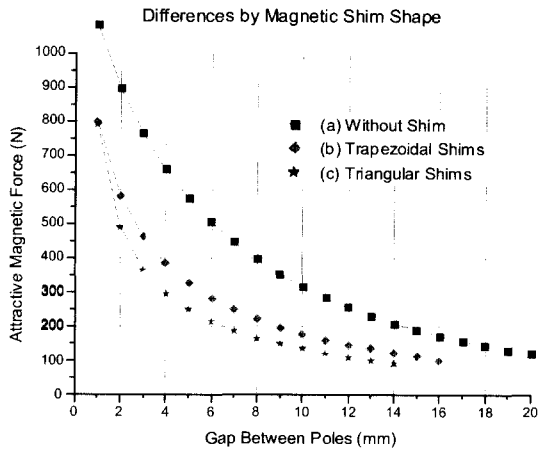


그림 3. 1(a)~(c) 모델에서 고정자·회전자 간에 수직 방향으로 작용하는 인력을 갭  $d$  에 따라 계산한 결과.  
Fig. 3. Numerically calculated vertical attractive magnetic force in model 1(a)~(c) with respect to the gap length  $d$ .

보면 자심을 설치한 모델에서의 인력이 (a) 모델의 절반 정도에 불과하다. 이는 자심에서의 자기 유도가 갭이 벌어짐에 따라 차츰 약해져서 결국 어느 정도로 수렴하는 현상이라고 볼 수 있다.

이 베어링을 적용할 시스템 휠의 질량을 약 26 kg 정도로 보고, 이 하중에 대해 각 그래프의  $x$  축을 이동하여 겹쳐 로그 스케일로 그린 것이 그림 4이다. 이 작업을 시스템 설계와 결부하자면, 고정자 자석 아래에 비자성체를 부착하여 고정자와 회전자 사이의 최소 간격을 조절하는 것에 해당한다. 이 때 동일한 인력(약 26 kgf)이 작용하는 고정자·회전자 간 갭 간격 부근에서, 거리에 따른 인력의 변화, 즉 스프링 상수(spring constant)가 (a) < (b) < (c) 모델의 순서로 커짐을 볼 수 있다. 이러한 차이는 갭이 커짐에 따라 점차 감소하여 약 18 mm 이상의 갭 간격에서는 차이가 거의 없어진다. 이것은 갭이 커짐에 따라 고정자·회전자를 관통하는 자로(magnetic flux path)의

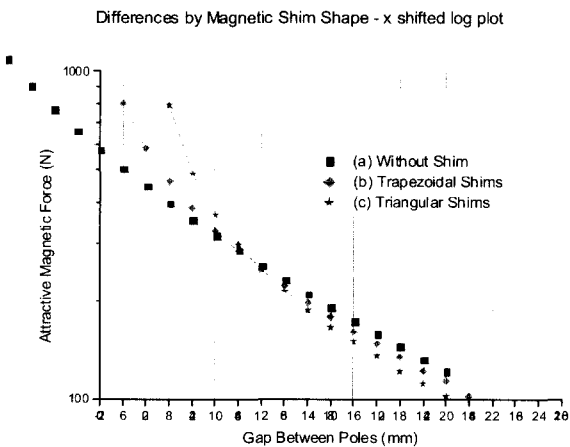


그림 4. 그림 3에서 26 kgf 중심으로 각 데이터의  $x$  축을 이동하고 로그 스케일로 그린 결과.  
Fig. 4. Log-plotted fig. 3 with  $x$ -shifted dataset.

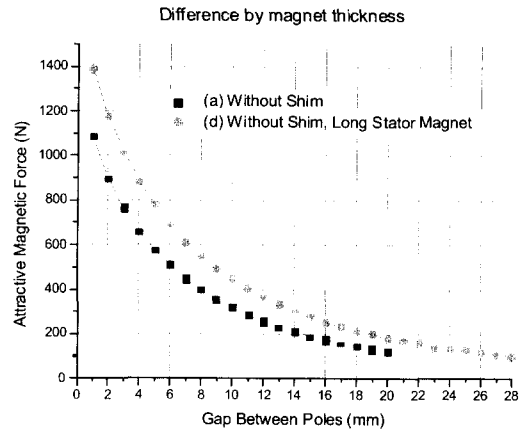


그림 5. 1(a)와 (d) 모델에서 고정자·회전자 간에 수직 방향으로 작용하는 인력을 갭  $d$  에 따라 계산한 결과.

Fig. 5. Numerically calculated vertical attractive magnetic force in model 1(a) and (d) with respect to the gap length  $d$ .

특이 없어져서 자심의 자화율이 별로 변화하지 않음으로 인해 발생하는 현상이다.

본 연구에서 제시한 바와 같은 하이브리드 베어링 시스템이 제대로 작동하기 위해서는, 휠의 설계 평형 부양 위치(equilibrium position) 부근에서 휠이 허용 한도 내에서 하강할 때 상부 영구자석 베어링의 인력 감소보다 하부 초전도 베어링의 복원력 증가가 더 커야 한다. 따라서 상부 영구자석 베어링을 상하방향 갭 변화에 따른 인력의 변화가 최소화되도록 설계한다면 초전도 베어링 부분에서 비용 절감과 회전 손실 감소를 이룰 수 있고, 축 방향으로 보다 안정한 자기부양이 가능한 것이다. 이러한 측면에서 볼 때 1(a)~(c)의 모델 중 (a)의 구성이 가장 적합하다고 할 수 있다.

Difference by magnet thickness - x shifted log plot

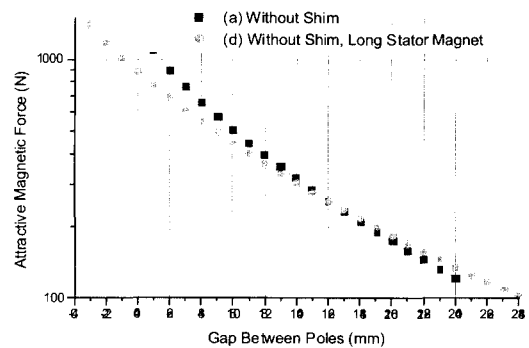


그림 6. 그림 5에서 26 kgf 중심으로 각 데이터의  $x$  축을 이동하고 로그 스케일로 그린 결과.

Fig. 6. Log-plotted fig. 5 with  $x$ -shifted dataset.

그림 5와 6은 1(a)의 모델과 1(d)의 모델에 대해 계산한 결과를 전술한 바와 같은 방법으로 그린 것이다. 이 결과에서는, 자기장의 중첩 원리에 의해 쉽게

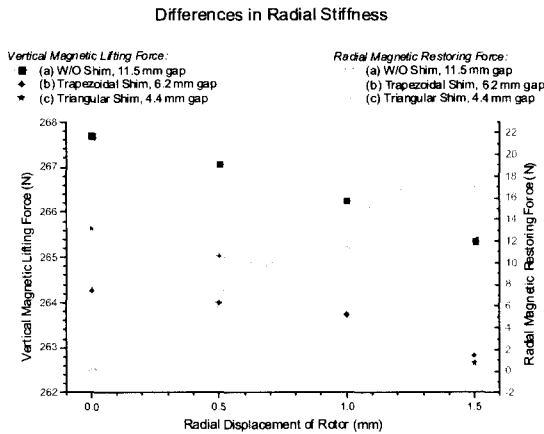


그림 7. 1(a)~(c) 모델에 대해 하중 약 26 kgf의 평형 위치 부근에서 반경 방향의 베어링 편심에 의해 발생하는 축·반경 방향의 자기력을 계산한 것. 고정자·회전자간 수직 거리는 (a) 11.5 mm, (b) 6.2 mm, (c) 4.4 mm로 두었다.

Fig. 7. Numerically calculated axial and radial magnetic force in model 1(a)~(c) resulting from radial displacement. The rotor-stator gaps are set to (a) 11.5 mm, (b) 6.2 mm, (c) 4.4 mm.

예측할 수 있듯이 (d)의 모델에서 더 좋은 특성을 볼 수 있다. 다만, 고정자 자석의 양이 2배가 되었음에도 불구하고 논의한 바의 개선분은 적은 편이고, 고정자·회전자 자석간 거리가 멀어짐에 따라 반경 방향으로의 복원력이 약화될 것이므로 좋은 설계라고 단정할 수는 없을 것이다.

그림 7은 1(a)~(c)의 3차원 모델에서 회전자 자석을 0.5, 1.0, 1.5 mm만큼 축에서 어긋나도록 수평 이동하면서 축 방향과 반경 방향의 자기력을 계산한 것이다. 각 계산에서의 수직 방향 겹은 최대한 상부 베어링의 부양력이 26 kgf인 상황에 맞추기 위해 (a) 11.5 mm, (b) 6.2 mm, (c) 4.4 mm로 두었다. 그래프의 좌측 축은 수직 자기력을 나타낸 것으로 세 경우 모두 그 값이 비슷한 것을 볼 수 있다. 오차를 포함하여 계산된 자기력을 비슷하게 맞추기 위해 모델의 겹을 변경시킨 것이므로 대략적인 값만을 맞추었다. 그래프의 우측 축은 반경 방향으로의 복원력을 나타낸 것으로, (a) > (c) > (b)의 순서로 우수함을 알 수 있다. 그러나 회전체가 반경 방향으로 이동할 때의 수직 자기력의 감소가 적을수록 좋으므로, 이 점에 있어서는 (b) > (a) > (c)의 순서로 우수하다고 볼 수 있다. 이 두 측면을 종합해 볼 때 역시 (a)의 구성이 레디알 베어링으로서도 우수함을 알 수 있다.

능동 자기 베어링이 아닌 영구자석 베어링의 경우 진동을 감쇠하는 기능이 없고 손실에 의한 감쇠도 거의 없어 회전체의 진폭 증가를 효과적으로 막을 수 없다는 문제점이 있다. 만일 위의 1(b), (c)에서와 같이 자화가 유도되는 자심을 자석의 극면 부분에 부착한다면, 회토틀계 자석에 불가피하게 내재하거나 제작상 발생하는 불균일한 자장을 재분포하여 균일하게 만들 수 있고, 진동 발생시에는 자기장이 회전 비대칭적으로 분포됨에 따라 급증하는 철손(hysteresis loss)과 와류손(eddy current loss)을 이용하여 진동 감쇠의 기능을 할 수도 있을 것이다. 다만, 위의 계산 결과에

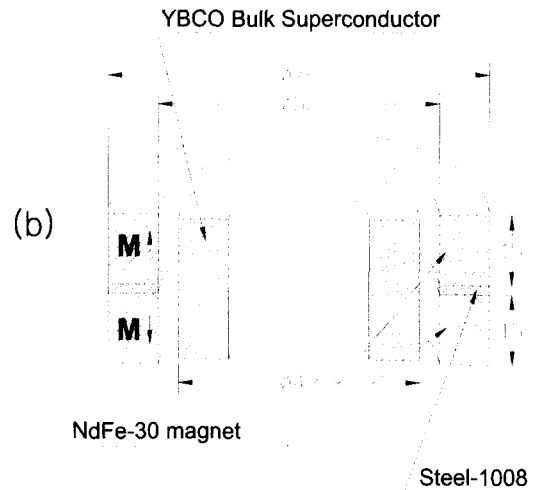
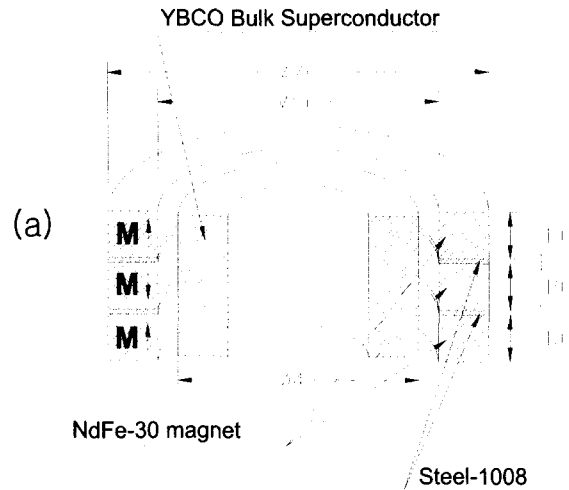


그림 8. 시스템 하부 외전형 초전도 저어널베어링 모델들. (a) 축 방향 두께 10 mm의 회전자 자석 사용 (b) 축 방향 두께 15 mm의 회전자 자석 사용.

Fig. 8. Models for the outer rotor-type superconductor journal bearing. (a) with 10 mm-thick rotor ring magnets (b) with 15 mm-thick rotor ring magnets.

서와 같이 1(b), (c)와 같은 형태로 자심을 부착할 경우에는 베어링의 기본적인 성능이 저하되므로, 진동 감쇠를 위해서 자심을 부착하더라도 자기장을 회전방향으로 적절히 균등하게 분포할 수 있는 최소한의 두께로 하는 것이 적절하리라 보인다.

### 2.3. 하부 초전도 베어링에 대한 수치해석

시스템의 하부 초전도 저어널베어링은 아래 그림 8과 같이 내부에 고정자로 고온초전도 벌크가 들어가고, 그 외부를 영구자석과 자심 링으로 구성된 회전자로 둘러싸는 외전형으로 구성하였다. 현재는 결정의 c-축이 반경 방향으로 배열된 원통 모양의 고온초전도 벌크를 사용할 수 없으므로, 제작시에는 형상 가공한 벌크 여러 개로 고정자를 구성하게 될 것이다. 자석 배열은 반경 방향으로 강한 자기장을 발생시키고 축 방향 위치 변화에 따라 큰 자장 변화를 줄 수 있도록,

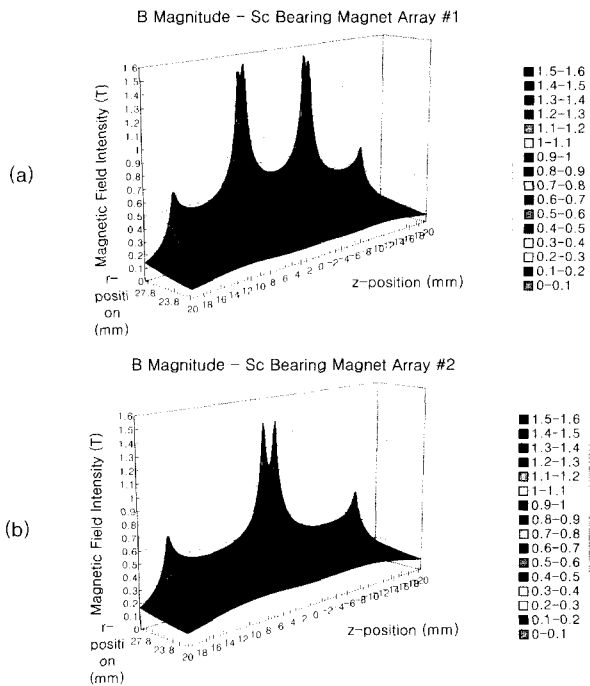


그림 9. 8(a), (b) 모델의 회전자에서 발생하는 자기장의 절대값 분포 그래프. (a)는 8(a) 모델, (b)는 8(b) 모델.  
 Fig. 9. Graphs for magnetic field magnitude distribution from the bearing rotors: (a) 8(a), and (b) 8(b).

역시 축 방향으로 서로 같은 극이 마주보는 배열(N-S S-N N-S)을 하였다. 정성적 분석을 위하여 초전도체의 표면과 자석 사이의 간격은 4 mm를 기준으로 잡았다. 두 모델 간의 차이점은, 8(a)는 링 자석의 축 방향 두께가 10 mm, 자심 두께가 1 mm이고, 8(b)는 링 자석의 축 방향 두께가 15 mm, 자심 두께가 2 mm라는 점이다. 현재 임의의 수치적인 3차원적 모델 경계 조건을 적용하여 초전도체의 자속 고정(flux pinning)에 의해 발생하는 자기력을 계산하는 방법이 구현되지 않고 있으므로, 자기장 해석은 위 두 모델의 회전자에 의해 발생하는 자기장 분포에 국한하였다.

아래의 그림 9~11은 8(a)와 8(b)의 축 대칭 2차원 모델에 대해 회전자 자성체 배열에서 발생하는 자기장 분포를 축 방향 위치와 반경 방향 위치에 대해 수치 해석하여 3차원으로 그린 그래프이다. 그림 9는 계산 결과로 나온 자기장의 절대값을  $r = 20 \sim 27.8$  mm,  $z = -20 \sim 20$  mm 구간에서 0.2 mm 간격으로 추출한 그래프이다. 각 (a), (b) 그래프에서 봉우리 형태로 보이는 부분이 자석의 각 극면의 축 방향 위치에 해당한다. 직관적으로도 간단히 알 수 있는 바와 같이, 자석에 가까운 부분( $r \rightarrow 28$  mm)에서는 (a) 모델에서 좀 더 강한 자기장이 발생하나, 자석에서 멀리 떨어질수록( $r \rightarrow 20$  mm) (b) 모델에서 발생하는 자기장이 더 커진다는 사실을 알 수 있다. 이러한 점으로 볼 때 초전도체와 자석 사이의 거리가 멀수록 각 자석 링의 축 방향 두께도 커져야 힘을 유추할 수 있다. 그림에서 최대치 부근에 두 개의 봉우리가 겹쳐 보이는 것은 극면 사이에 삽입한 자심에 의한 것으로, 접촉면 부위로 자속이 더 밀집되어 더 강하게 자화된 것이다. (b) 모델에서 최대치가 더 낮게 나오는 것은 자심의 두께가 두꺼워 (a) 모델에서에 비해

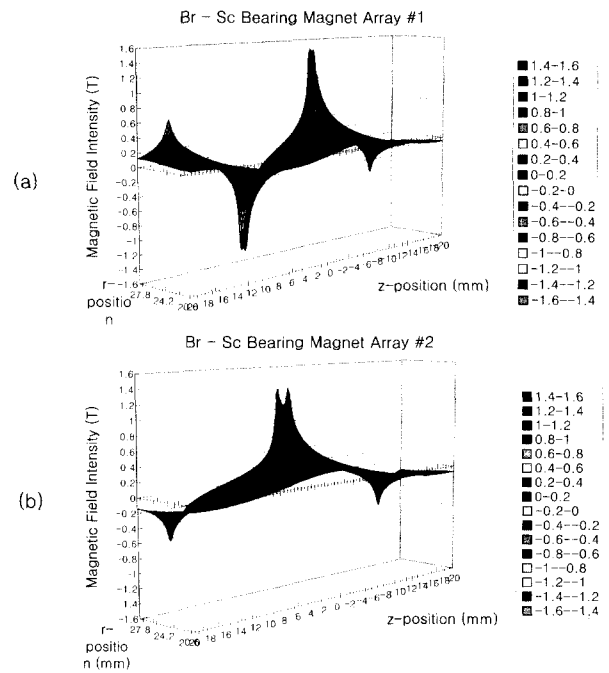


그림 10. 8(a), (b) 모델의 회전자에서 발생하는 반경 방향 자기장( $B_r$ )의 분포 그래프. (a)는 8(a) 모델, (b)는 8(b) 모델.  
 Fig. 10. Graphs for radial component of magnetic field( $B_r$ ) distribution from the bearing rotors: (a) 8(a), and (b) 8(b).

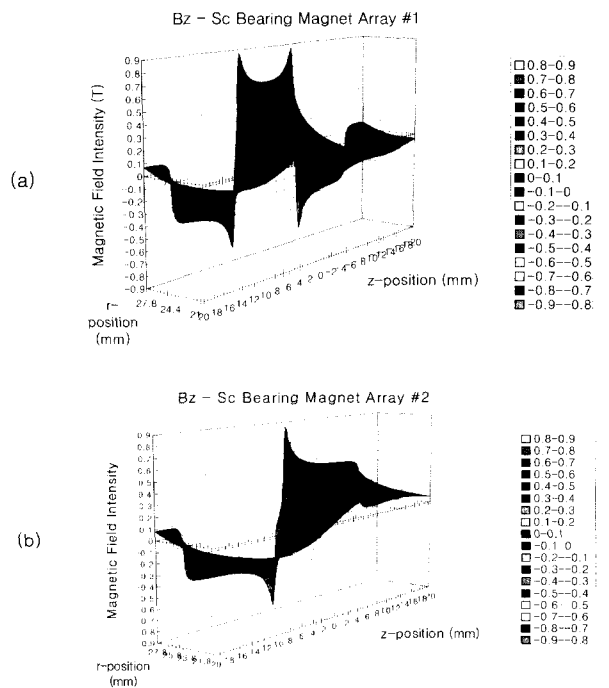


그림 11. 8(a), (b) 모델의 회전자에서 발생하는 축 방향 자기장( $B_z$ )의 분포 그래프. (a)는 8(a) 모델, (b)는 8(b) 모델.  
 Fig. 11. Graphs for axial component of magnetic field( $B_z$ ) distribution from the bearing rotors: (a) 8(a), and (b) 8(b).

자화가 조금 덜 진행되었기 때문이며, 실제로는 초전

도체가 위치할 부분에서의 자기장 분포가 중요하므로 전체적인 베어링 성능에 끼치는 영향은 미미하다고 볼 수 있다.

그림 10은 계산 결과로 나온 자기장 벡터의 반경 방향 요소의 값( $B_r$ )을 동일 구간과 동일 간격으로 추출한 그래프이다. 반경 방향으로 이동했을 때나 축 방향으로 이동했을 때 모두 8(a) 모델에서의 자기장 변화량이 8(b) 모델에서보다 전반적으로 크다는 것을 알 수 있다.

그림 11은 자기장 벡터의 축 방향 요소( $B_z$ )의 값을 동일 구간과 동일 간격으로 추출한 그래프이다. 여기에서도 반경 방향과 축 방향으로 이동했을 때 모두 8(a) 모델에서의 자기장 변화량이 크다. 단, 자석에서 멀리 떨어진 부분에서는( $r \rightarrow 20$  mm) 8(b) 모델에서의 자기장이 확연히 큰 것을 볼 수 있다. 이러한 점은 초전도 베어링의 반경 방향 복원력이 강화되도록 영향을 줄 수 있을 것이다.

아래의 그림 12는 위에서 계산한 결과 중  $r = 24$  mm 지점에서의 값을 축 방향 위치에 따라 그린 그래프이다. 위의 8(a), (b) 모델에서 초전도체의 외측 반경을  $r = 24$  mm로 설정했기 때문에 이 부근의 자기장 값이 초전도 베어링의 성능에 직접적으로 영향을 준다고 볼 수 있다. 이것은 반경을 고정시킨 위치에서의 그래프이므로, 축 방향 위치 변화에 따른 자기장의 변화를 확연히 알 수 있다.  $B_r$  값은 8(a) 모델에서 그 절대값이나 변화량 등이 확연히 크고,  $B_z$  값은 8(a) 모델에서 변화량이 큰 반면에 전체적인 절대값은 8(b) 모델에서 약간 더 크게 보인다.

이상의 베어링 회전자 자기장에 대한 수치해석 결과를 초전도 베어링의 성능과 결부시키기 위해서는 초전도체에 작용할 자기력을 고려해야 한다. 임의의 면에

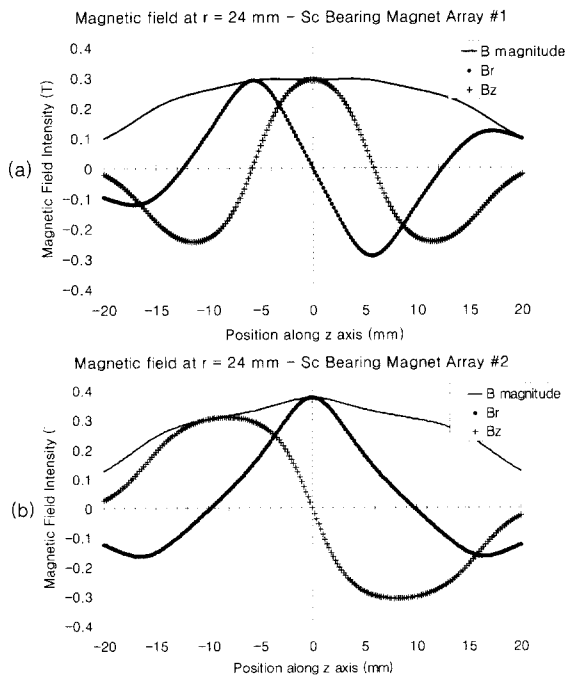


그림 12. 8(a), (b) 모델의 회전자에서 발생하는 자기장을 계산하여  $r = 24$  mm 지점에서 추출한 그래프. (a)는 8(a) 모델, (b)는 8(b) 모델.  
Fig. 12. Graphs for magnetic field at  $r = 24$  mm from the bearing rotors: (a) 8(a), and (b) 8(b).

작용하는 자기력은 다음의 식으로 나타낼 수 있다[2].

$$F = \frac{1}{2} \int_A [H(n \cdot B) + B(n \cdot H) - n(H \cdot B)] aA$$

외력이 없을 때 자기장 하 냉각에 의해 회전자가 고정자 초전도체에 자기 고정된 평형 위치에 있다는 것은, 초전도체 표면에 작용하는 자기력과 내부 응력을 포함한 힘이 내측, 외측에서 상쇄된 경우이다. 이러한 상태에서 회전자를  $\delta$ 만큼 이동할 때 자속 고정(flux pinning)에 의해 초전도체 내부의 자속 분포가 변하지 않는다고 가정하면, 초전도체 표면에 작용하는 힘은 회전자 이동에 의한 외부 자기장 변화에 의한 것만큼만 변하게 된다. 투자율  $\mu$ 의 공간에서 평형 위치에서의 표면 외측의 자기장을  $B_0$ , 이동 후의 자기장을  $B_\delta$ 로 두면, 이동 후 초전도체 표면에 작용하는 수직, 수평 방향으로의 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{\delta,n} = \frac{1}{2\mu} \int_A [(B_{\delta,t}^2 - B_{0,t}^2) - (B_{\delta,n}^2 - B_{0,n}^2)] aA$$

$$F_{\delta,t} = \frac{1}{\mu} \int_A (B_{\delta,n} B_{\delta,t} - B_{0,n} B_{0,t}) aA$$

위의 식에서,  $\delta$ 만큼 회전자를 이동하였을 때 고정자 초전도체 표면 외측의 자기장 강도의 변화가 크면 클수록 발생하는 자기력도 크다는 것을 알 수 있다. 실제로는 이동시에 발생하는 자기 스트레스(magnetic stress)에 의해 초전도체 내부 자속 분포의 변화도 고려해야 하나, 그런 경우에도 회전자의 이동에 따른 초전도체 표면에서의 자기장 강도의 변화가 클수록 베어링의 복원력도 커진다는 사실은 자명하다.

이러한 측면을 종합하여 볼 때, 계산된 모델과 같이 초전도체 표면과 회전자 자석 사이의 거리가 4 mm 정도가 되는 경우에는 모델 8(a)의 구성이 8(b)의 구성보다 우수한 특성을 가질 것이라고 정성적으로 예상할 수 있다. 자석-초전도체 사이의 거리가 여기서 제시한 것과 다른 경우에는 회전자의 설계도 달라져야 하며, 좀 더 정확한 특성 예측과 최적화를 위해서는 실제 실험과 병행하여 초전도체와의 상호 작용을 모사하는 방법이 개발되어야 할 것이다.

#### 2.4. 회전체의 안정적인 부양을 위한 조건

위에서 제시한 시스템의 정적인(static) 안정성을 두 가지 측면에서 검증해야 한다. 첫째는 수직 방향으로 안정적인 자기 부양이 이루어지는가 하는 점이고, 둘째는 회전체가 반경 방향으로 기울어지지 않는가 하는 점이다.

그림 4, 6을 참조하면 상부의 영구자석 베어링에 의한 인력은 수직 방향 거리에 따라 거의 지수함수적으로 변화한다는 것을 알 수 있다. 이 힘에 의해서만 안정적인 부양이 이루어질 수 없어 회전체의 상하 이동에 대해 복원력을 작용하는 초전도 베어링을 사용하게 되는데, 여기서 회전체가 이동할 가능성이 있는 시스템 내부의 영역 이내에서 수직 방향의 위치 변화에 의해 발생하는 복원력이 영구자석 베어링의 인력 변화에 비해 충분히 커야 안정적인 자기 부양이 이루어질 수 있다. 또한, 여기에는 초전도체 내부의 자속 이동에 의한 복원력 감소(levitation drift)에 대비한 여유분이 포함되어야 한다.

한편 그림 7의 결과를 볼 때, 1(a) 모델의 상부 영구자석 베어링에 대해 계산된 반경 방향 스프링 상수는 약  $1.4 \times 10^4$  N/m로 하부 초전도 베어링에 비해 상당히 작은 값이 될 것으로 예상된다. 따라서 회전체가 회전하지 않을 경우에는 하부 초전도 베어링이 일종의 지지점(pivot) 역할을 할 것이고, 회전체가 기울어질 때 위치 에너지가 낮아지게 된다. 이에 의해 발

생하는 기울어지려는 힘을 대략 계산해서 음의 스프링 상수로 다음과 같이 표현할 수 있으며,

$$k \simeq -\frac{M \times g}{l}$$

( M : 회전체 중량,

l : 초전도베어링과 회전체 무게중심 사이의 거리)

위의 베어링을 사용하여 구성될 플라이휠 시스템에서는 약  $-1 \times 10^3$  N/m의 값을 가질 것으로 예측된다. 따라서 이 측면에서는 안정한 부양이 이루어질 것으로 생각된다.

#### 4. 결론 및 토의

본 연구에서는 초전도 하이브리드 베어링을 이용한 수직축 중공형 플라이휠 시스템을 구상하고, 여기에 사용될 수 있는 몇 가지 자기베어링에 대해 Maxwell 2D & 3D 소프트웨어를 이용하여 장자기장 수치해석을 실시하였다. 이 시스템은 상부에 인력을 이용한 영구자석 베어링, 중간 부분에 외전형 할바크 전동/발전기, 하부에 외전형 고온초전도 저어널베어링이 배치되어 회전 손실 저감, 제작비용 및 냉각비용 절감, 진동 가진 최소화 등의 장점을 가질 수 있도록 설계되었다. 계산 결과의 분석에 의하면 1(a)와 8(a) 모델의 베어링 설계가 비교적 우수한 것으로 나타났으며, 계산 결과를 토대로 회전체의 안정적인 부양을 위한 조건을 일부 검증할 수 있었다.

덧붙여서, 1(a) 모델에 자심을 추가하는 것은 실제 제작된 베어링의 자기 균일성 및 진동 특성을 개선하는 차원에서 실험적으로 결정되어야 할 것이다. 또한 초전도베어링에 대한 정량적인 분석을 위해서는, 상술한 수치 해석 결과로 얻어진 데이터를 경계 조건으로 적용하여 초전도체의 자속 고정(flux pinning)에 의해 발생하는 자기력을 계산하는 방법을 동원해야 할 것이고, 나아가서는 초전도체 내부의 자속 이동에 의해 발생하는 경계 조건의 시 변화도 감안해야 할 것이다.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 국가지정연구실사업에 의하여 지원되었습니다.

#### 참고 문헌

- [1] A. M. Wolsky, "The Status of Progress toward Flywheel Energy Storage Systems Incorporating High-Temperature Superconductors", IEA Technical Report, pp.III-9~12, 2000.
- [2] Francis C. Moon, Superconducting Levitation: Applications to Bearings and Magnetic Transportation, Chapter 2, John Wiley & Sons, Inc., 1994.

### 저자 소개



#### 이준성(李峻誠)

1972년 2월 14일생, 1995년 포항공과대학교 물리학과 졸업, 1997년 동 대학원 물리학과 졸업(이학석사), 현재 한전 전력연구원 선임보연연구원



#### 한영희(韓榮熙)

1965년 8월 1일생, 1988년 서울대학교 공대 무기재료학과 졸업, 1990년 동 대학원 무기재료학과 졸업(공학석사), 현재 한전 전력연구원 선임연구원



#### 한상철(韓相哲)

1966년 3월 26일생, 1987년 고려대학교 공대 금속공학과 졸업, 1990년 KAIST 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 KAIST 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 한전 전력연구원 선임연구원



#### 성태현(成台鉉)

1959년 10월 9일생, 1982년 한양대학교 공대 무기재료공학과 졸업, 1987년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사), 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(공학박사), 1991-92년 ISTE C 근무, 1992-95년 MIT Post. Doc, 현재 한전 전력연구원 책임연구원



#### 김상준(金相俊)

1951년 2월 7일생, 1986년 서울산업대학교 전기공학과 졸업, 1987년 발송배전기술사, 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1993년 장영실상 수상, 1999년 고려대학교 대학원 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 한전 전력연구원 전기이용기술그룹장.