

## HTS 벌크를 이용한 자기 베어링의 제작 및 특성 시험

임형우, 심정욱, 차귀수, 지준근  
 순천향대학교 공과대학 정보기술공학부

### Manufacturing and test of magnetic bearings with HTS bulks

Hyoungwoo Lim, Jungwook Sim, Gueesoo Cha, JunKeun Ji  
 Soonchunhyang University

**Abstract** - The high temperature superconducting bulk can be used as the bearing of a motor. This paper presents the fabrication and test results of a motor with superconducting bearing using HTS bulks. The bearing used four hexahedron type YBCO bulks. Height, width and depth of the HTS bulk were 10mm, 30mm and 30mm, respectively. Single phase induction motor was used to drive the shaft and solid rotor was adopted for high speed rotation. Test results show the motor with HTS magnetic bearing can rotate silently and smoothly without any contact.

#### 1. 서 론

최근에 들어 고온초전도벌크를 이용한 기기로는 회전자 부분을 벌크로 만들어 동력 전달에 직접적인 역할을 하는 킬라틴스전동기, 유도전동기 등의 전동기와 부상력을 이용한 플라이휠 에너지 저장 장치, 또한 비접촉식으로 회전하여 고속 회전이 가능한 초전도 자기베어링 등이 있다. 이 중에서 초전도 자기베어링은 초전도 벌크에 외부 자계를 인가할 경우 벌크의 내부와 표면에서 외부 자계를 차폐하기 위한 차폐전류가 발생하며, 이 차폐전류와 외부 자장 사이에 발생하는 부상력을 이용하여 접촉 손실, 즉 마찰이 없이 회전을 시킬 수 있는 장치이다.

본 논문에서는 이러한 벌크의 특성을 이용하여 일반 유도전동기의 베어링을 대신할 수 있는 고온초전도벌크를 이용한 수평축형 고온초전도 자기베어링을 제작하였다. 제작된 고온초전도 자기베어링을 유도전동기의 베어링으로 사용하여 유도전동기의 회전특성을 측정하였다. 여기서 회전축에 영구자석을 설치하여 축과 같이 회전하도록 했고 영구자석의 주위에 육면체 형태의 벌크를 배치해서 영구자석과 벌크와의 사이에 부상력이 발생하도록 했다. 영구자석이 설치된 회전축은 한번 위치가 고정되면 초전도벌크의 자속고정효과에 의해서 원래의 위치에서 회전한다

#### 2. 고온초전도 자기베어링의 구조 및 실험 장치

기존의 상용화되어 있는 베어링은 회전축과 지지물에 기계적으로 견고하게 고정되어 있으나, 본 초전도 자기베어링의 경우 회전축에는 영구자석이 있게 되고, 그 주위에 고온 초전도벌크가 자기적으로 지지하며 축과 베어링 사이에 공기층이 있게 된다.

현재의 고온 초전도 벌크의 사양이 튜브형인 경우, 그 두께가 매우 얇아 기계적 강도가 약하다. 그러므로 회전축의 진동으로 오는 충격에 견딜 수 있는 YBCO로 제작된 육면체형의 고온 초전도 벌크를 사용하였으며, 이 베어링은 유도 전동기의 축 양쪽에 설치되었고, 한쪽에 4개씩 총 8개의 초전도벌크를 사용하였다. 베어링이 고

정될 지지대로 고온초전도 자기베어링의 중심을 상, 하, 좌, 우로 변화시킬 수 있도록 했으며, 이를 이용해서 벌크를 착자한 후에 회전축의 중심을 맞추었다.

#### 2.1 고온초전도 자기베어링

그림 1은 실제 베어링 부분으로 왼쪽은 초전도벌크가 삽입될 용기와 그 덮개이며, 덮개에 있는 작은 구멍들은 벌크 삽입 후에 용기와 덮개를 고정할 볼트들의 구멍이다.

오른쪽 그림은 용기에 벌크가 삽입되어 있는 그림이며 용기주위의 검은 색 띠는 오링 부분으로 액체질소로 냉각할 때 용기의 틈으로 질소가 새어 나오는 것을 방지하기 위한 것이다. 용기의 전체 크기는 가로 100mm, 세로 100mm이고 두께가 40mm이며, 그 재질은 베이크라이트로 만들어져 있다. 각 용기는 상, 하, 좌, 우의 4개의 고온초전도벌크가 들어갈 수 있도록 되어 있고, 용기가 지지대와 볼트로 결합할 수 있도록 제작되었다.

용기 안쪽 구멍은 축에 접합된 원통형 영구자석이 삽입되어 회전할 부분이며, 이 구멍의 직경은 18mm이고 이것은 원통형 Nd자석으로부터 3mm의 공기 층과 2mm의 베이크라이트 벽이 있으며 용기 안에서 벌크까지는 약 1mm의 벌크 고정 층이 있다. 따라서 착자될 때의 실제 자석과 벌크까지의 거리는 6mm가 되고, 회전자의 축에 설치된 영구자석이 진동할 경우를 대비해서 고온 초전도 벌크와 용기와의 거리를 3mm만큼의 여유를 두었다. 그림 1의 우측 그림은 가로 30mm, 세로 30mm이고, 두께 10mm인 벌크가 삽입되어 있는 모습으로 상단 벌크 위쪽의 용기에 질소 투입구가 있으며 이를 통하여 고온 초전도벌크를 냉각시키게 된다.

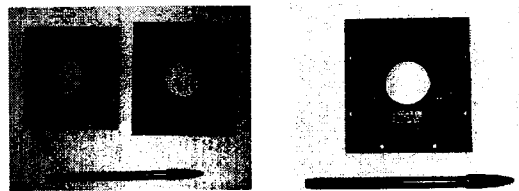


그림 1. 벌크 용기와(좌) 벌크가 삽입된 모습(우)

#### 2.2 실험 장치

초전도 자기베어링의 특성을 확인하기 위해 단상 2극 유도전동기의 전기자에서 인버터를 사용해서 회전력을 발생시켰다.

그림 2는 본 실험에서 사용되어진 단상 유도전동기의 전기자 부분으로서 회전시에 발생하는 진동을 줄이기 위해서 지지판에 볼트로 고정되어 있다. 단상 유도전동기는 정격전압이 220V이고 60Hz에서의 정격회전수는 3300rpm, 50Hz에서 2700rpm 이며, 이 전동기의 전기자와 회전자의 사양은 다음 표 1과 같다.

본 실험에 사용된 그림 2의 단상 유도전동기 회전자

는 농형으로 제작되었으나 향후에 초고속회전을 시킬 것에 대비해서 실험 시에는 농형 회전자 대신 솔리드형 회전자를 제작해서 사용했다.

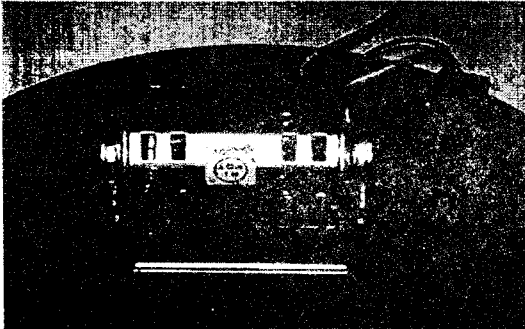


그림 2. 전동기의 전기자

표 1. 실험에 사용된 전동기의 사양

정격 전압	220V	정격 전류	0.36A
전동기 높이	84mm	회전자 높이	45mm
전동기 외경	77mm	회전자 외경	30mm
고정자 높이	34mm	극수	2극
고정자 내경	35mm		

그림 3은 전동기의 회전축, 회전자와 Nd 자석이 분리되어 있는 상태이고 실험 시에 축에 접합하여 사용된다. 이 회전자의 회전축은 지름이 8mm, 길이가 28mm의 알루미늄으로 제작되었으며 회전자는 지름이 30mm, 길이가 45mm로 솔리드형이고 링 형태로 제작된 Nd 자석 각 방향의 최대 자속밀도는 원통형의 옆면을 따라 측정했을 때에 282 (mT), 밑면을 따라 측정했을 때에는 308(mT)의 값이 측정되었다.

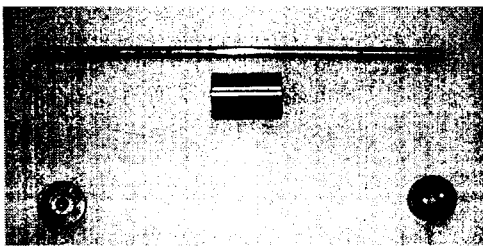


그림 3. 실험에 사용된 회전축, 회전자, Nd 자석

자기베어링을 구성하는 고온초전도벌크는 상온 상태에서 지지한 후에 외부자계를 인가하고, field-cooling을 시켜야만 자속고정효과에 의해서 초전도상태가 되며, 이후에 자기베어링의 역할을 할 수 있다. field-cooling을 시킨 후에 회전축의 지지부분을 제거하면 전동기의 회전축은 축, 자석, 회전자의 무게로 인하여 최초의 중심 축에서 약간 아래로 처지고, 고정자의 중심에서 벗어나게 되기 때문에 field-cooling의 자속고정, 후에 회전축의 지지부분을 제거하고, 이후에 회전축의 위치를 다시 고

정자의 중심 축으로 조정해야 한다.

그림 4는 자기베어링을 구성하는 고온초전도벌크를 외부자계가 있는 상태에서 착자 시킨 후, 고온초전도 자기베어링을 모터의 중심 축에 맞추기 위한 장치로서, 실험 중 자기적으로 베어링에 고정되어 있는 회전축을 각각 상, 하, 좌, 우로 이동시켜 회전축을 회전 중심에 맞출 수 있도록 제작했다.

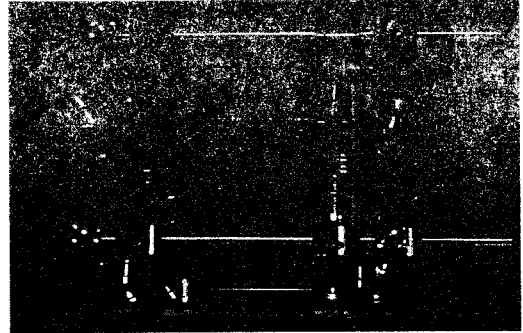


그림 4. 회전자의 중심 축의 위치를 조정할 수 있는 베어링 부분의 지지대

### 3. 측정 결과

#### 3.1 거리에 따른 Nd 자석의 자속밀도

고온초전도 벌크의 부상력과 자기적인 위치 고정을 시키기 위하여 비교적 자속밀도가 높은 Nd 자석을 사용하였으며, 실험에 사용된 Nd 자석은 지름이 30mm, 두께가 5mm 안쪽 구멍의 직경이 12mm인 Nd 자석 2개를 결합하여 사용했고, 자석의 수평방향과 수직방향의 자속밀도를 측정하였다. 그림 5는 이러한 수직방향, 수평방향에 따라 자속밀도의 측정위치를 나타낸 것이다.

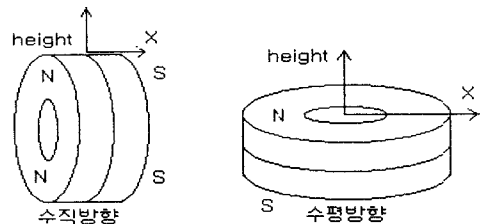


그림 5. 자석밀도의 측정방향

그림 6은 수직 방향의 자속밀도를 측정한 것이며, 그림에서 표시한 대로 두 개의 Nd자석을 붙여 놓았으므로 이 자석의 자석 접합 점을 기준으로, x축 방향의 변화에 따라 각각의 높이의 변화에 대한 자속밀도의 값을 나타내고 있다. 또한  $zx$ 이후의 숫자는 중심에서부터 x축 방향으로의 거리 mm를 가리키는 것이다

본 실험에서 사용된 고온초전도 자기베어링과 영구자석 사이의 자속고정 거리는 6mm이므로 고온초전도벌크의 트랩 시에 영향을 주는 자속의 세기는 자석으로부터의 거리 6mm인 곳이 된다. 이때의 수직 축 방향의 자속밀도는 약 70mT이다. 영구자석의 세기는 두 자석을 접합한 곳에서 가장 강하고 바깥으로 갈수록 자속밀도가 급격히 감소할 뿐만 아니라, 자석이 있는 부분에서도 그 위치에 따라 차이가 많으므로 벌크에 트랩되는 자속밀도 또한 일정하지 않으며, 그 크기도 작다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 수평방향의 자속밀도의 변화를 나타내고 있으며,  $z=0$ 인 점들이 Nd 자석의 중심 축을 따라서 움직이는 점이다. 자석의 중심 축에서 바깥방향으로 이동함에 따라, 안쪽 구멍의 끝 부분과 자석의 바깥쪽 끝 부분에서 자속밀도의 변화가 다른 곳과 다른 것을 볼 수 있다.

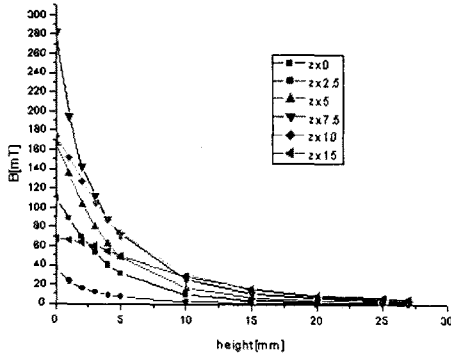


그림 6. Nd 자석의 수직방향 자속밀도

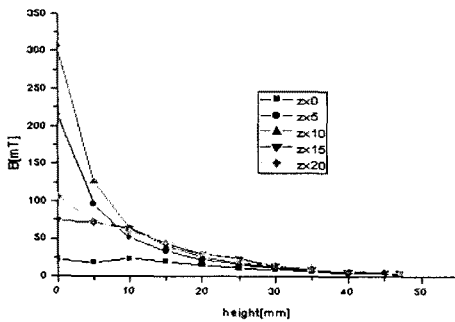


그림 7. Nd 자석의 수평방향 자속밀도

### 3.2 회전수

본 실험에서는 인버터를 이용하여 전동기에 인가되는 주파수를 바꾸면서 회전수를 측정하였다. 표 2는 이때의 측정결과이며, 이 측정결과에 의하면 동기속도에 비해서 회전수가 낮은 것을 볼 수 있다. 이것은 축의 진동 발생 시에 회전자와 고정자 간의 충돌을 줄이기 위하여 회전자의 외경을 기존의 농형 회전자의 크기보다 작게 하여 고정자와 회전자 간의 공기 층이 증가한 것과, 전기전도도가 높은 알루미늄봉을 사용해서 제작한 유도전동기의 농형 회전자 대신에, 전기전도도가 낮은 철로 제작된 슬리드형 회전자를 사용하였기 때문에, 고정자 측 전류 값의 증가로 말미암아 인가 전압을 20~30V 수준으로 낮춘 것 등이 회전수가 낮은 이유가 될 수 있다.

표 2. 실험 결과

전압(V)	주파수(Hz)	회전수(RPM)
20	100	1092
25	150	1476
33	200	1716

그림 8은 고온초전도 자기베어링이 설치된 단상 유도전동기를 운전하는 모습으로, 회전 시에 발생하는 소음

이 전혀 없이 회전하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 전동기는 회전수가 일정한 범위를 넘으면 안정적으로 회전했으나 회전수가 낮을 때에는 회전 상태가 불안정했다. 이것은 회전자계와 회전자 사이에 작용하는 자기력 때문이고 고온초전도벌크의 자속고정력이 이 자기력을 이길 수 있어야 한다.

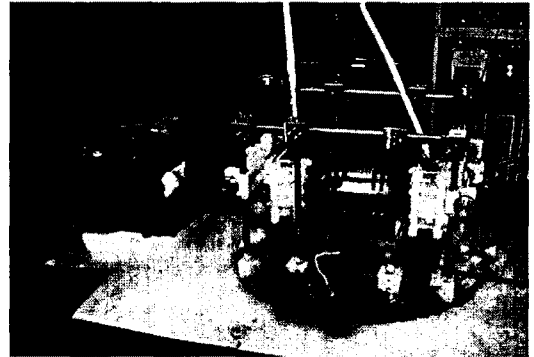


그림 8. 고온초전도벌크를 사용한 베어링이 설치된 단상 유도전동기 시스템

## 4. 결 론

본 논문에서는 수평형 고온초전도 자기베어링을 설계 및 제작하였으며, 이를 일반 유도 전동기에 결합하고 인버터를 통하여 전동기의 출력전압과 주파수를 변화시켜 가며 회전수를 측정하여, 공전점과 갑작스런 전압의 증가할 때를 제외한 부분에서 안정적으로 전동기가 운전하는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 회전자와 전기자의 철심사이에 작용하는 자기력 때문에 인가주파수가 낮거나 인가전압이 높으면 회전자가 안정적으로 회전하지 못했다. 따라서 자속고정효과가 높은 고온 초전도벌크를 개발하는 것과 강한 자장을 발생하는 영구 자석으로 벌크를 착자시키는 것이 필요하다.

고온초전도 자기베어링은 현재 플라이 휠 에너지 저장 장치를 위해 연구되고 있으며, 기계적인 마찰력이 발생하지 않고, 고속 운전이 가능하고, 진동과 소음이 거의 없으므로 응용 분야가 많을 것으로 예상된다.

## 감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소의 지원으로 수행되었습니다.

## (참 고 문 헌)

- [1] Turner LR, "Fields and forces in flywheel energy storage with high-temperature superconducting bearings," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.33, No.2, pp. 2000-2003, 1997
- [2] Z. Xia, et al., "Design of superconducting Magnetic Bearings With High Levitating Force for Flywheel Energy Storage System," IEEE Trans. on AS, Vol.5, No.2, pp.622-625, 1995
- [3] 심정욱, 임형우, 차귀수, "고온 초전도 벌크형 전동기의 특성시험," 한국초전도 저온공학회는문지, 제2권 2호, pp. 44-48, 2000