

고온초전도 벌크 베어링을 사용한 유도 전동기의 특성 시험

論 文
52B-6-6

Performance Tests of an Induction Motor with Hexahedron HTS Bulk Bearing

林 炯 佑* · 李 光 淵* · 朴 明 陣* · 車 貴 守** · 李 志 光***

(Hyoung-Woo Lim · Kwang-Youn Lee · Myung-Jin Park · Guee-Soo Cha · Ji-Kwang Lee)

Abstract - The high temperature superconducting bulk can be used as the bearing of induction motors. This paper presents the fabrication and test results of an induction motor with superconducting bearings using HTS bulks. The bearing had eight hexahedron type YBCO bulks. Height, width and thickness of the HTS bulk were 30mm, 30mm and 10mm, respectively. Single phase induction motor was used to drive the shaft made of aluminum and the rotor of a conventional induction motor. To estimate the performance of the HTS bulk magnetic bearing, no load test, load test and impact test were carried out. Load tests were performed by using air resistance caused by the shaft-mounted thin cylinder with buckets. Impact tests by axial direction and vertical direction impact showed that the vibration of the shaft gradually decayed. The induction motor with HTS bulk magnetic bearing rotated silently and smoothly throughout the tests. According to the test results, conventional bearings can be replaced with superconducting magnetic bearings made of HTS bulks.

Key Words : Superconducting magnetic bearing(SMB), YBCO bulk, Induction motor

1. 서 론

고온초전도 벌크(High Temperature Superconducting Bulk)의 자속고정력은 초전도 물질이 가지고 있는 특이한 성질로서 전력기기 개발에 다양하게 이용할 수 있다. 그 예로는 전동기의 회전자 부분을 벌크로 사용한 릴럭턴스 전동기, 자기 베어링을 사용한 플라이 휠 에너지 저장장치 등을 들 수 있다[1],[2]. 고온초전도 벌크의 자속고정력을 이용해서 만든 초전도자기베어링(Superconducting Magnetic Bearing, SMB) 시스템에서 회전자의 축은 기계적인 접촉과 마찰이 없이 자기적으로 지지되어 회전한다. 초전도자기베어링 시스템은 액티브자기베어링(Active Magnetic Bearing, AMB) 시스템과 같이 복잡한 제어회로가 필요하지 않기 때문에 구조가 간단하고 제어가 용이하다는 장점이 있다.

지금까지 발표된 초전도자기베어링에 관한 연구결과에서는 대부분 수직축형 초전도 자기 베어링이며, 회전체를 압축공기로 회전시키거나 회전체에 다른 구동장치에 연결해서 구동시키면서 초전도자기베어링의 특성을 연구했다[1]-[6]. 초전도자기베어링을 전동기에 사용하는 경우에 고정자와 회전자 사이에서 전자력이 발생하나 위와 같이 압축공기로써 축을 회전시키면 회전자와 고정자 사이에 전자력이 없으므로 전자력

이 초전도자기베어링에 미치는 영향을 고려할 수 없다. 본 논문에서는 초전도자기베어링으로 지지되는 유도전동기를 직접 구동시켜서 고정자와 회전자 사이에서 발생하는 전자력이 초전도자기베어링에 미치는 영향을 고려할 수 있도록 했다.

본 논문에서는 총 8개의 벌크를 이용하여 SMB를 제작하였으며, 이를 전동기의 베어링으로 사용하였다. 무부하일 경우와 부하를 인가하였을 경우에 전동기 전기자 전류의 변화와 회전수 변화를 측정하였다. 또한, 회전중인 전동기 축에 축 방향 및 법선 방향에 충격을 가하였고, 이때 발생하는 진동의 크기와 감쇠 시간을 홀센서를 사용하여 측정하였고 회전중인 전동기 축의 변위도 홀센서로 측정하였다. 고온초전도 벌크에 자속고정력을 발생시키기 위해서 원통형의 SMB마다 2개의 Nd 자석을 사용하였다. 사용된 자석의 배치방식을 달리하면서 벌크 표면에 트랩되는 자속밀도를 측정하였고, 이로부터 부상 거리를 고려하여 자극 배열방식을 선정하였다.

2. 시험장치 및 구조

초전도자기베어링은 수직축형 자기 베어링으로 큰 무게를 지속적으로 지탱하기 위해 초전도체의 반발력을 이용하는 방법과, 축의 균형을 잡거나 진동을 줄이기 위해 자속고정력을 이용하는 두 가지 방법으로 나누어 볼 수 있으며, 전자는 초전도체를 초전도화 시킨 후 외부자계를 인가하는 것이고, 후자는 외부 자계가 있는 상태에서 초전도화 시키는 것이다. 이렇듯 초전도자기베어링은 초전도체의 반발력과 자속고정력으로써 회전체를 부상시킨 후 마찰이 없다는 장점을 이용하여 고속운전 및 전기 에너지를 운동 에너지로의 변화하는 등

* 正 會 員 : 順天鄉大學 電氣工學科 博士課程
** 正 會 員 : 順天鄉大學 電氣工學科 教授 · 工博
*** 正 會 員 : 又石大學 電氣工學科 教授 · 工博
接受日字 : 2003年 1月 17日
最終完了 : 2003年 3月 18日

의 제작 목적에 따라 사용된다.

그림 1은 고온초전도자기베어링의 구조를 보인 것으로, 시험에서 사용한 유도전동기는 단상 2극 커패시터 구동형이다. 전동기의 정격 용량은 37.3W이고, 60Hz 정격 부하에서의 회전수는 3300rpm이다. 전동기의 회전자는 농형이며, 회전자와 전기자 사이의 공극은 2mm로서 같은 용량의 전동기 공극보다 크게 제작했다. 공극을 증가시킨 이유는 회전자의 축에 충격을 가해서 회전자 축의 진동정도를 측정하는 충격시험시와, 축의 진동이 심한 기동 시에 회전자와 전기자가 접촉하는 것을 방지하기 위해서이다. 베어링 고정틀은 자계가 인가된 상태에서 고온초전도 벌크를 냉각하여 자속고정력을 발생시키는 필드 쿨링(Field Cooling) 후 축이 중력에 의해 미소거리 움직이는 것을 보상해 주기 위해 상, 하, 좌, 우로 각각 움직일 수 있도록 제작하였다. 또한 전동기와 베어링 고정틀은 알루미늄 밀판에 볼트를 사용하여 견고히 고정시켰다. 4개의 Nd 자석은 두개씩(N-S-N-S)접합하여 축의 양 끝단에 각각 두었으며, 두 개씩 접합한 Nd 자석의 모서리 표면에서 측정된 Nd 자석의 최대 자속밀도는 430mT였다. 한 개의 자기베어링에 4개의 육면체형 YBCO로 제작된 고온초전도 벌크를 사용하였다. 고온초전도 벌크의 크기는 가로 30mm, 세로 30mm, 두께 10mm이고 벌크들이 자기력에 의해 움직이지 않도록 용기를 제작하였고 용기 전체의 크기는 가로, 세로, 두께가 110mm×110mm×40mm이다.

그림 2는 베어링 용기의 단면이고 베어링 용기는 저온에서 수축률이 적은 베이클라이트로 제작하였다. 고온초전도 벌크를 초전도상태로 만드는 데에 필요한 액체 질소는 용기의 상단 부분에 구멍을 내어 투입시켰으며, 용기 안쪽의 빈 공간으로 액체 질소를 자연 순환시켜 각각의 벌크를 냉각시켰다.

표 1은 시험에 사용된 유도전동기의 사양으로 60Hz, 2극이고 정격용량은 37.3W, 정격전압은 220V이다.

표 2는 영구자석의 사양이고 표 3은 고온초전도 벌크의 사양이다. 초전도베어링이 부담하는 무게는 무부하 일 경우 회전자 253g, Nd자석 4개 88g, 샤프트 51g, 알루미늄 링 16g 총 408g이고, 부하 시험 일 경우에는 538g이며, 따라서 한 쪽 베어링이 부담하는 무게는 무부하 시험일 경우 204g이며, 에

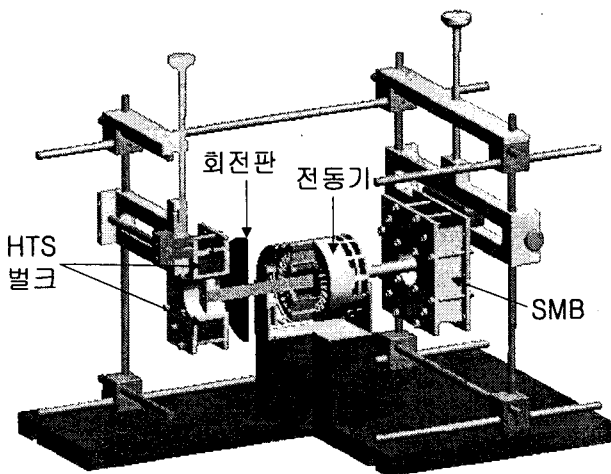


그림 1 실험장치의 구조
Fig. 1 Structure of the test rig

표 1 유도전동기의 사양

Table 1 Specifications of the induction motor

용량	37.3W	회전자 질량	253g
극수	2	회전자 외경	31mm
전압	220V	회전자 길이	45mm
전류	0.32A	축 질량	51g
전기자 내경	35mm	축 외경	12mm
회전수(60Hz)	3300rpm	축 길이	26mm

표 2 Nd-Fe-B 자석 및 알루미늄 링의 사양

Table 2 Specifications of the permanent magnet and Al ring

물질	Nd-Fe-B	알루미늄 링 질량	8g×2
최대 자속밀도	430mT	알루미늄 링 내경	12mm
질량	22g×4	알루미늄 링 외경	22mm
내경	22mm	알루미늄 링 길이	10mm
외경	32mm		
두께	5mm		

표 3 고온초전도 벌크의 사양

Table 3 Specifications of the HTS bulk

물질	YBCO
제작방법	Seeded melt growth
형태	Hexahedron
가로	30mm
세로	30mm
두께	10mm

어 터빈을 이용한 부하시험일 경우 전동기와 SMB의 사이 좌, 우에 각각 1개씩 장착하며 부하를 인가하기 위한 에어터빈 1개의 무게 65g을 추가하여 SMB 1개가 부담하는 총 무게는 269g이다.

그림 3은 시험을 위해 제작한 고온초전도자기베어링시스템의 전체 사진이다. SMB 시스템의 대부분은 알루미늄, 스테인리스, 황동 등의 비자성체로 제작하였고, 이것은 Nd 자석의 자속이 SMB 부분이 아닌 다른 자로를 형성하는 것을 방지하기 위한 것이다. 이 장치에서 보듯이 벌크용기를 각각 상, 하, 좌, 우로 이동시킬 수 있도록 설계, 제작하였으며, 유도 전동기는 알루미늄 베이스 판에 견고히 고정시켰고, 또한 전동기에 부착되어 있던 베어링은 제거하였으며, 좌측의 유도 전동기와 SMB 사이의 샤프트에 고정된 원형 판은 비접촉식 속도 측정용 원판이다. 그림에서 보듯이 본 SMB 시스템의 축에는 어떠한 외부의 베어링이나 접촉이 존재하지 않으며 순수히 SMB로만 축을 지지한다.

3. 영구자석의 배열과 벌크의 착자

상온에서 영구자석과 SMB를 고정된 후에 액체 질소로 고온초전도 벌크를 냉각시켰다. 이것은 Nd 자석의 자속이 고온초전도 벌크에 가해진 상태에서 벌크를 냉각하는 것으로, 이

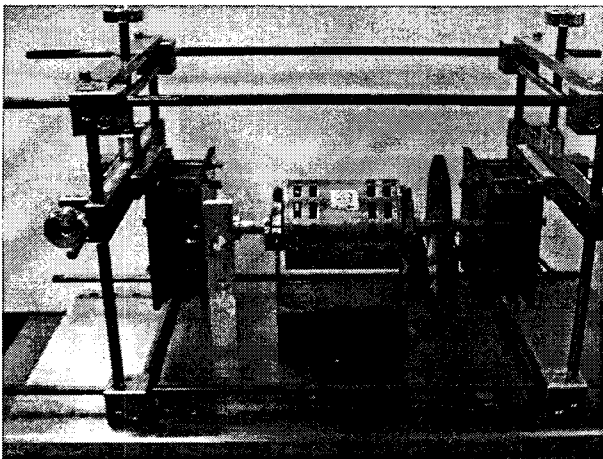


그림 3 고온초전도자기베어링 시스템
Fig. 3 Superconducting magnetic bearing system

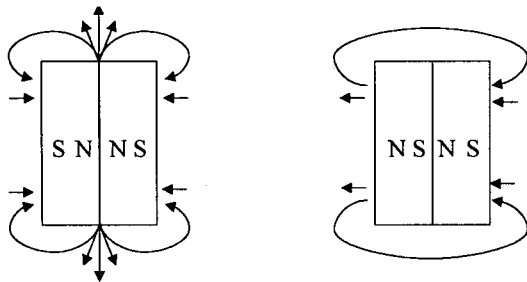


그림 4 영구 자석의 두 가지 배열
왼쪽:S-N-N-S배열, 오른쪽:N-S-N-S배열
Fig. 4 Two types of the permanent magnet arrangement
Left :S-N-N-S arrangement, Right :N-S-N-S arrangement

러한 경우에는 Nd 자석과 벌크 사이에 자속고정력이 발생하게 된다. 이로부터 전동기의 축과 베어링 사이에 기계적인 지지력이 아닌 자기적인 지지력이 발생한다. 두개의 Nd 자석을 접합하여, N극과 S극을 배열시키는 방법에는 N-S-N-S배열과 S-N-N-S배열의 두 가지가 있으며, 그림 4는 이러한 두 가지의 배열방식과 각각의 자속의 방향을 나타낸 것이다.

그림 5는 그림 4에 표시한 두 가지 방식으로 자극을 배열했을 때, 가로와 세로가 모두 30mm인 고온초전도 벌크에 트랩된 자속밀도로서 가로와 세로를 각각 1mm 간격으로 측정 한 결과이다. 자석과 벌크 사이의 거리는 6mm이고, 이 거리는 SMB에서 자석과 고온초전도 벌크 사이의 거리이다. 자극 배열이 그림 5의 왼쪽 S-N-N-S일 때 자석의 표면에서의 자속밀도는 750mT이었고, 그림 5의 오른쪽 N-S-N-S일 때는 430mT로서 S-N-N-S인 경우의 자속밀도가 더 크다. 그러나 벌크가 위치하고 있는 자석으로부터 6mm 떨어진 곳에서 자속밀도를 측정한 결과는 S-N-N-S일 때가 47mT였고 N-S-N-S일 때는 59mT로서 N-S-N-S인 경우의 자속밀도가 10mT이상 커서 본 연구에서는 N-S-N-S의 자석 배열을 사용하였다.

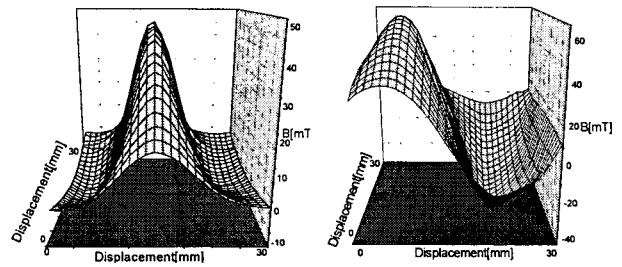


그림 5 S-N-N-S 배열인 경우와 N-S-N-S 배열인 경우의 자속 분포 왼쪽: S-N-N-S배열, 오른쪽: N-S-N-S 배열
Fig. 5 Magnetic flux distribution at S-N-N-S and N-S-N-S arrangement Left :S-N-N-S arrangement, Right :N-S-N-S arrangement

4. 전동기 운전 시험

제작된 초전도자기베어링을 사용한 유도전동기를 인버터로 구동하면서 특성을 측정했다. 그림 6은 초전도자기베어링을 설치한 유도전동기에 부하를 걸었을 경우와 무부하일 경우 주파수에 따른 전동기의 회전수이다. 이 시험에서 무부하일 경우 85Hz와 95Hz 사이에서 전동기의 속도는 동기 속도의 95%에서 96% 정도였으며 안정되게 회전을 하였다. 동기 속도의 96%는 60Hz에서부터 120Hz까지의 회전수 중에서 동기 속도에 가장 가까운 속도이다. 그림 6에서 보이듯이 전동기의 회전수는 무부하일 경우 주파수가 증가하면 회전수도 그에 따라 증가하지만, 부하를 인가하였을 경우는 85Hz 이상의 주파수에서부터 속도가 증가하는 비율이 감소하는 것을 알 수 있다.

그림 7은 전원주파수 변화에 따른 전동기 전기자 전류의 변화이다. 이 그림에서 60Hz에서 80Hz 까지는 부하를 인가한 경우와 무부하인 경우에 전기자 전류에 큰 차이가 없다. 80Hz 이상의 주파수에서부터 전기자에 흐르는 전류의 차이가 커진 후, 다시 감소하고 있는 것을 보이고 있다. 이러한 이유는 부하를 걸었을 때, 전원주파수 증가로 인하여 전동기 속도가 증가하면, 부하의 공기 저항이 일정한 비율로 증가하지 않고 있음을 보여준다.

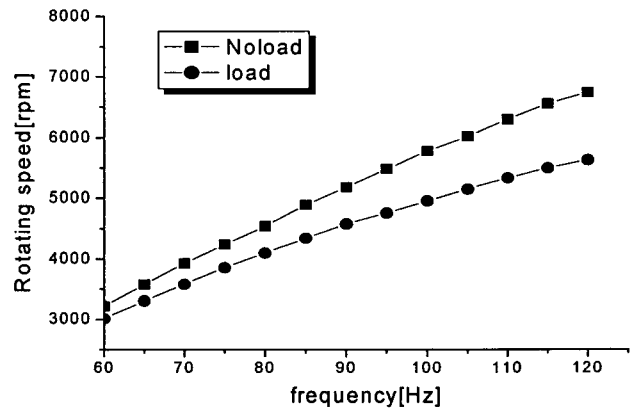


그림 6 SMB를 장착한 전동기 회전수
Fig. 6 Rotating speed of the motor with SMB

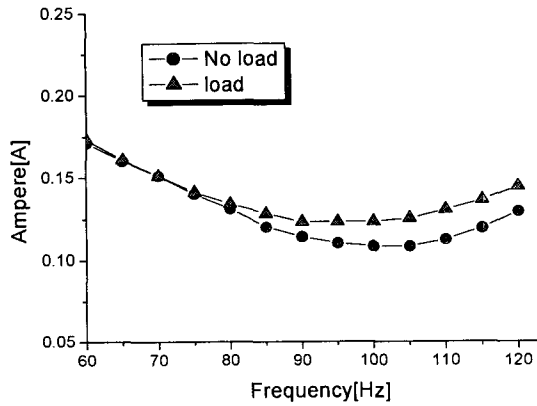


그림 7 전동기 전기자 전류
Fig. 7 Input current of the motor with SMB

이로 인하여 슬립이 감소한 후, 증가함으로써 전기자의 전류가 감소하였다가 증가하는 것을 나타내고 있다. 이와 함께 전원주파수의 변화로 인한 임피던스의 변화 등을 들 수 있다.

그림 8은 무부하일 경우에 전동기 축의 수직방향과 수평방향 진동의 폭을 나타낸 그림이다. 이 시험에서는 저온용 홀센서를 사용하여 전동기 축의 수직 및 수평 방향의 진동을 측정하였다. 그림 8에서 수평방향의 진동이 낮은 주파수에서는 크고, 주파수가 높아질수록 진동의 폭이 작다. 이에 반해 수직방향 진동의 폭은 대체로 일정함을 보이고 있다. 이것은 수직방향 자력이 전동기 축, 회전자, 자석 등의 무게의 의해 약간 늘려있는 상태이므로 진동의 폭이 작다고 할 수 있다. 또한 수평방향과 수직방향의 진동 폭이 다른 것은 전동기 축이 타원으로 회전하는 것을 나타내며, 120Hz 부분에는 수직·수평방향 진동의 폭이 같은 것은 회전자의 중심이 원에 가깝게 회전하고 있음을 나타낸다.

5. 충격 시험

유도전동기 축의 축 방향 및 법선 방향에 충격을 가하여 충격시험을 수행하였으며, 홀센서를 사용하여 충격을 가한 이후에 발생하는 진동의 크기를 측정하였다. 그림 9는 전동기

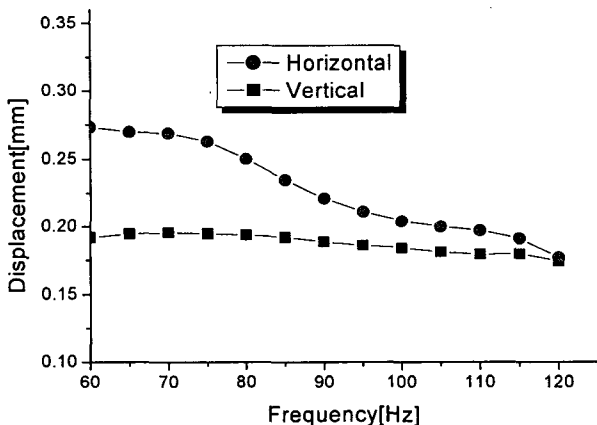


그림 8 전동기 축 중심의 변위
Fig. 8 Displacement of the shaft center

의 축 방향에 충격이 가해진 경우로서 그림 9의 위 그림은 무부하 상태이고, 아래 그림은 부하를 인가한 상태이다. 충격량 J 는 $J = Fd$ 의 관계가 있으므로, 시험에서 가해진 충격량은 19.6mJ이다. 무부하일 경우 최대 진동의 폭은 0.9mm이고, 부하를 걸었을 경우는 1.6mm로서 부하를 인가한 경우가 진동의 폭이 크다. 또한, 부하를 인가한 경우가 무부하인 경우보다 진동이 오래 지속되는 것을 볼 수 있다. 그림 10은 축의 법선 방향으로 충격을 가한 경우로서 저온용 홀센서를 이용하여 수평 및 수직 방향 진동의 크기를 측정하였고 법선 방향 충격량은 6.86mJ이다.

축 방향 시험과는 달리 충격지점에서의 진동의 폭이 큰 것이 아니라 충격을 가한 후 3~5초 사이에서 최대 진동이 발생한다. 이것은 충격이 축의 충격 지점에서 반대 방향으로 진행을 하였다가 증폭되어 되돌아오기 때문이다. 축 방향의 진동은 좌, 우로 진행을 하였다가 초전도체의 진동감쇠 효과

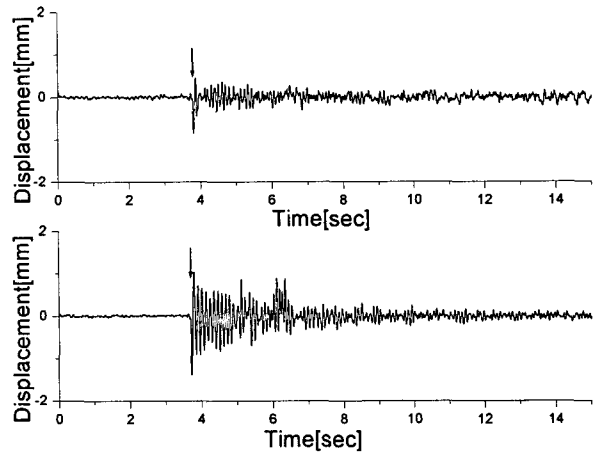


그림 9 85Hz 전동기 축 방향 충격 시험
위: 무부하, 아래: 부하
Fig. 9 Oscillation of the shaft due to the axial impact at 85Hz
Upper : no load 4893rpm, Lower : load 4339rpm

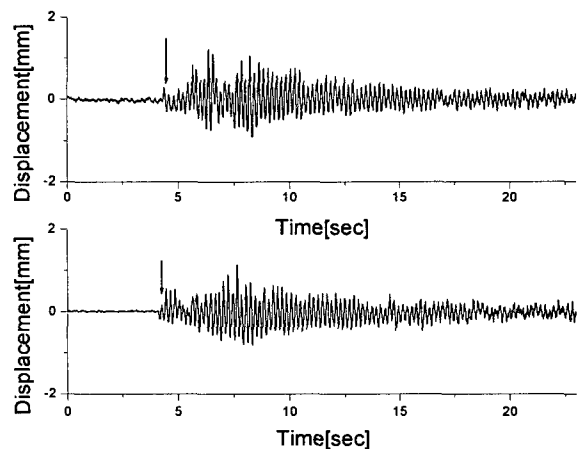


그림 10 85Hz, 95Hz 전동기 축의 법선 방향 충격시험
위: 무부하 95Hz, 아래: 무부하 85Hz
Fig. 10 Oscillation of the shaft due to the vertical impact at 95Hz and 85Hz
Upper : no load 95Hz 5486rpm, Lower : no load 85Hz 4893rpm

로 점차 사라진다. 그러나 축 방향의 충격 시험과 비교해 보면 축의 법선 방향 진동 지속시간이 대략 10초 이상으로 법선 방향의 충격을 가한 경우가 진동 지속시간이 훨씬 길다는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 초전도자기베어링을 사용해서 유도전동기를 회전시켰다. 초전도자기베어링에는 고온초전도 벌크와 영구자석을 사용했고 고온초전도 벌크에 영구자석으로 자계를 인가한 후 냉각하는 방식으로 자속고정력을 발생시켰다. 본 연구에 사용된 초전도자기부상시스템의 구조에서는 영구자석 자극의 배열이 N-S-S-N인 경우보다는 N-S-N-S인 경우가 자속밀도가 높다는 것을 확인했다. 축 방향 및 축의 법선 방향에 대한 충격 시험을 통해서 초전도자기베어링시스템에 진동 감쇠 효과 및 복원 능력이 있다는 것을 확인하였다. 또한 수평축형 초전도자기베어링시스템의 경우는 수직방향 진동의 영향 보다 수평방향 진동의 영향이 크다는 것을 알았다. 초전도자기베어링시스템을 사용한 유도전동기에 인가되는 전원의 주파수를 변화시키며 회전시킨 결과 소음 없이 매우 부드럽게 회전하였다. 성능이 개선된 고온초전도 벌크를 사용해서 자속고정력을 증가시킨 초전도자기베어링을 개발하면 보다 용량이 큰 유도전동기에 사용할 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구과제는 2002학년도 순천향대학교 학술연구비 지원을 받아 수행하였음.

참 고 문 헌

[1] B. Oswald, M. Krone, et. al., "Superconducting Reluctance Motors with YBCO Bulk Material," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, No. 2, pp. 1201 -1204, 1999.

[2] Larry R. Turner, "Fields and Forces in Flywheel Energy Storage with High-Temperature Superconducting Bearings," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 2000-2003, 1997.

[3] Shunsuke Ohashi, Hidenori Tanaka and Yoshihisa Hirane, "Three Dimensional Vibration of the HTSC Permanent Magnet Bearing System in the Mechanical Resonant State," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 1812-1815, 2001.

[4] Hironori Kamenno, YasuKata Miyagawa, Ryouichi Takahata and Hirochika Ueyama, "A Measurement of Rotation Loss Characteristics of High-Tc Superconducting Magnetic Bearings and Active Magnetic Bearings," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 9, N o. 2, pp. 972-975, 1999.

[5] Z. Xia, et al., "Design of Superconducting Magnetic Bearings with High Levitating Force for Flywheel

Energy Storage System," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 5, No. 2, pp. 622-625, 1995.

[6] Shigeo Nagaya, Naoji Kashima, Masaharu Minami, Hiroshi Kawashima and Shigeru Unisuga, "Study on High Temperature Superconducting Magnetic Bearing for 10kWh Flywheel Energy Storage System," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 1649-1652, 2001.

저 자 소 개



임형우 (林炯佑)

1972년 1월 18일생. 2000년 순천향대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.E-mail: super@sch.ac.kr



이광연 (李光淵)

1973년 2월 5일생. 1999년 순천향대 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.E-mail: kwang-1@hanmail.net



박명진 (朴明陣)

1973년 12월 7일생. 1999년 순천향대 전기공학과 졸업. 2001 동국대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.E-mail: pj1973@hanmail.net



차귀수 (車貴守)

1956년 7월 18일생. 1978년 서울대 공대 공업교육학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1987년 순천향대 조교수. 1991년 영국 Bath대학 방문교수. 현재 순천향대 정보기술공학부교수. E-mail: gsoocha@sch.ac.kr



이지광 (李志光)

1966년 6월 1일생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 우석대학교 전기공학과 교수.E-mail: jikwang@woosuk.ac.kr