

## 고온초전도 베어링을 이용한 수평축 플라이휠에너지 저장장치 시스템

### Superconductor Flywheel Energy Storage System with A Horizontal Axle

성태현\*, 이준성\*, 한영희\*, 한상철\*, 최상규\*\*, 김영철\*\*, 김상준\*

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

**Abstract** : A new type of flywheel energy storage system that has a horizontal axle with high  $T_c$  superconductor bearings using Y123 single-domained crystals was developed. The dynamic properties, stiffness and damping of the high  $T_c$  superconductor radial bearings were experimentally estimated using an imbalance excitation method. The imbalance excitation method applied to this rotor-bearing system identified the direct stiffness and damping of the high temperature superconductor bearings to be  $2.8 \sim 3.3 \times 10^5$  N/m and 175 ~ 204 Nsec/m respectively.

**Key Words** : High  $T_c$  superconductor, Flywheel Energy Storage System, Bearing

## I. INTRODUCTION

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y123) 고온 초전도체는 자석에 강한 반발력을 보이며[1-3], 이러한 강한 반발력을 응용하여 Y123 고온 초전도체는 플라이휠 에너지 저장장치나 고온초전도 모터 등의 베어링으로 응용될 수 있다[4-6].

최근의 고온초전도체와 이를 이용한 베어링의 연구 결과로 에너지 저장 분야의 응용이 기대되고 있다[7]. 플라이휠 에너지 저장시스템은 현대 사회가 직면하고 있는 두 가지 문제점(에너지 소비의 급격한 증가, 에너지 소비에 따른 환경오염)을 해결할 수 있을 것으로 여겨지고 있다.

현재까지의 고온 초전도체를 이용한 플라이휠에너지 저장장치 개발은 수직형으로 이루어져 왔다[8-10]. 그러나 수직형은 안정성과 확장성에 문제가 있을 수 있다. 수직형에서는 플라이휠이 초전도체 위에 부양되어 있어, 하부는 고정되나, 상부는 원심력에 의하여 안정영역을 벗어나기 쉬운 것이고, 이를 막기 위한 제어장치(active controllers)가 필요하다. 실제로 일본 四國電力의 타입이 이러한 제어장치를 적용한 형태이다(그림1). 이러한 제어장치가 작동하기 위해서는 추가적인 에너지가 필요하므로 플라이휠 시스템의 효율을 저하시킬 것이다. 또한 수직형에서는 용량을 늘리기 위해서는 위로 휠을 계속 붙이는 방법 등을 사용하여야 하므로 용량을 증가시키기가 매우 어렵다.

이 논문은 이러한 문제를 해결할 수 있는 수평축형의 고온초전도 플라이휠 시스템의 개발에 관한 것이다. 수평축 플라이휠 에너지 저장장치는 전자석 플라이휠 베어링을 이용하여 개발되어 왔다. 그러나 초전도 수평축 플라이휠 에너지 저장장치 연구에서는 휠을 부양시킬 수 있는 강한 부상력의 베어링이 개발되지 못하여 그 개발에 어려움이 있어왔다. 본 논문은 본 연구팀이 개발한 베어링의 부상력 평가 및 이 베어링을 이용한 수평축 플라이휠 에너지 저장장치에 대한 제작 및 그 동특성 평가 결과를 소개한다.

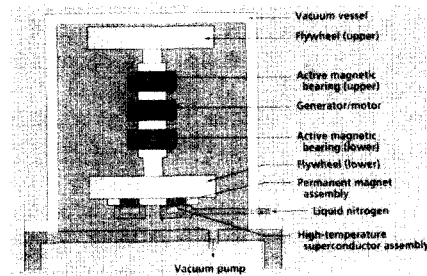


그림1. 四國電力(日)의 수직형 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 모식도. 제어장치로 전자석 베어링을 사용함[11].

## II. 초전도 베어링의 설계

### 1. 저어널 베어링의 설계

그림 2와 같이 희토류 Nd-Fe-B 자석으로 구성된 네 가지 형태의 저어널 베어링을 설계하여, 자석 밀도 분포를 계산한 결과를 그림 3에 표시하였다. 이 계산에서는 상용되는 Nd-Fe-B 자석과 연철의 자화곡선을 사용하였다.

그림 2 (a)는 영구자석을 서로 반대되는 극으로 연결한 가장 단순하고 일반적인 저어널 형태를 나타내고 있으며, (b)~(d)는 서로 같은 극끼리 연결하여 배열한 형태를 나타내고 있다. (c)와 (d)는 자력선이 반경 방향으로 쉽게 빠져나가게 해주기 위한 연철판을 자석들 사이에 배열한 구조로, 역방향의 자장에 의한 탈자를 효과적으로 줄여줄 수 있다. (d)는 저어널 축의 기계적 강도를 증진시키기 위하여 비자성 재료의 축을 삽입한 구조이다. 그림 2의 (a) ~ (d) 를 각각 로터 1 ~ 로터 4 로 표시하였다.

그림 3는 그림 2의 네가지 로터의 축 방향 자장의 분포를 2차원 유한 요소법으로 계산한 결과를 표시한 것으로 각각 계산 반경이 (a) 30mm, (b) 34mm 인 경우이다. 여기서 로터 2, 3, 4 는 자석이 만나는 부

\* 정 회 원 : 한국전력공사 전력연구원

\*\* 비 회 원 : 한국기계연구원 회전체 그룹

원고접수 : 2001년 04월 25일

심사완료 : 2001년 05월 25일

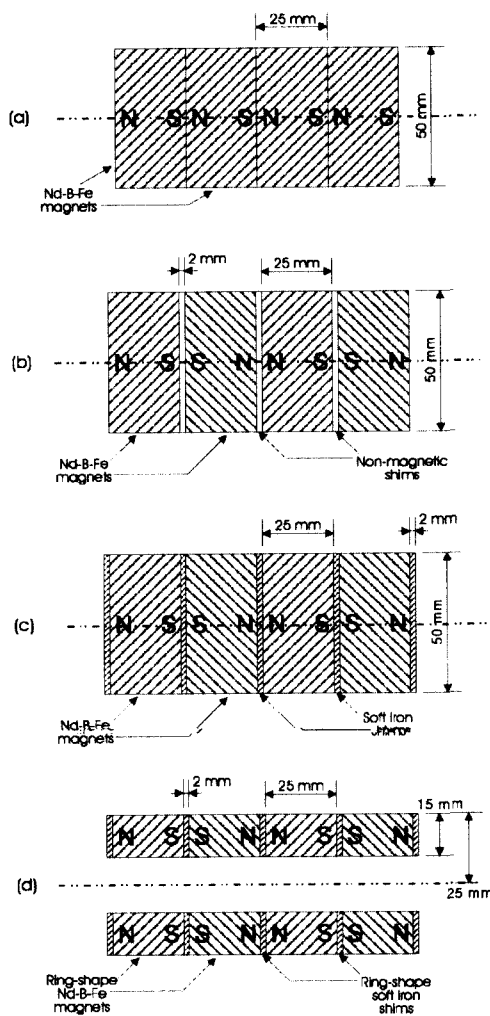


그림 2. 유한요소법에서 사용한 네가지 형태의 저어널 베어링 회전 자석부 구성도.  
Fig. 2. Cross sectional structures of magnetic components in the four bearing journal models used in the finite element analyses.

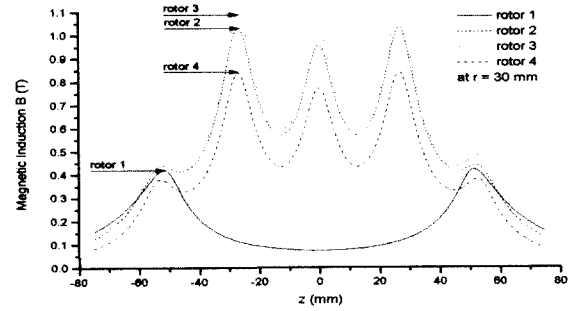
위에서 자석밀도의 피크를 관찰할 수 있는데, 이 값은 로터 1의 3배 이상이다. 축 방향의 자속 밀도 변화가 초전도 베어링의 축 방향 강성 계수와 직접적인 관련이 있으므로, 이 결과로부터 같은 극의 배열이 저어널 베어링에서 더 효과적임을 알 수 있다. 또한 로터 3의 자속밀도가 로터 2, 4보다 큰 것을 알 수 있는데, 로터 2에는 자속을 유도할 연결을 삽입하지 않았고, 로터 4는 축을 삽입하기 위하여 자석의 부피가 줄어든 결과이다.

그림 3 (a), (b)는 측정반경을 변화시킨 것인데, 이 반경방향의 자속밀도 변화는 초전도 베어링의 반경 방향의 강성 계수와 직접적으로 연관되는 값이다.

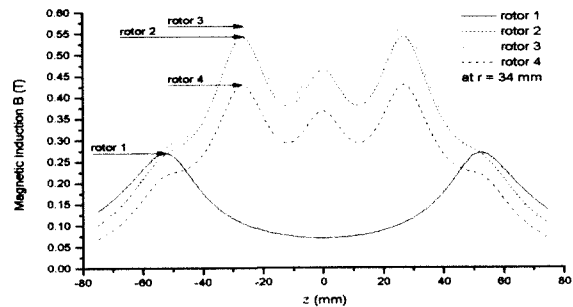
로터 2, 3이 로터 4에 비하여 비교적 높은 자속 밀도를 나타내지만, 기계적 강도가 현저히 낮기 때문에, 실제 플라이휠로 사용할 때의 회전수에서는 축의 휨이 심하게 발생할 것이 우려되어 로터 4의 구조를 채용하여 베어링을 제작하였다.

## 2.. 고온초전도 베어링의 동특성

고속으로 회전하는 플라이휠 에너지 저장장치는 로터의 불평형이나 외부의 교란에 의해 공진 주파수에서



(a)



(b)

그림 3. 네가지 형태 로터의 외부 자장 분포 (a)  $r = 30$  mm, (b)  $r = 34$  mm.

Fig. 3. Magnetic field strength distribution outside each of the four rotors (a) at  $r = 30$  mm, (b) at  $r = 34$  mm.

진동이 발생한다.

과다한 진동은 로터나 기타의 부품들의 피로파괴를 유발하고, 시스템의 자체의 사고를 유발할 수 있기 때문에 로터-베어링을 사용하는 시스템의 동적 안정성을 확보하기 위해서는 공진 주파수에서 진동을 일정 정도 이하로 억제하여야 한다. 신뢰성 있는 시스템을 설계하기 위해서는 베어링의 정적, 동적 특성을 반드시 파악하여야 하며, 이를 기반으로 공진주파수를 예측하고, 이 공진점에서의 진동을 피할 수 있도록 시스템의 운전영역을 설정하여야 한다.

### (1) 베어링 평가장치의 설계

현재까지 개발되었던 대부분의 다른 고온초전도 베어링이 수직형인데 반해, 본 논문의 플라이휠 에너지 저장장치에 사용된 고온초전도 베어링은 수평형이고, 현재도 고온초전도 베어링의 동특성을 파악하기 위한 이론적인 방법이 정립되지 않은 상태이므로, AC 서보모터로 구동하는 그림 4, 5와 같은 고온초전도 베어링의 동적특성을 파악하기 위한 장치를 설계, 제작하였다. 이 장치에는 진동센서를 부착하였으며, 로터는 중량 30 kg으로 측정 회전수 범위 내에서 강제모드를 유지하기 위하여 1차 휨 모드가 20,000 rpm 이상 되도록 설계하였다. 실험적으로 측정된 로터의 1차 휨 모드의 공진 주파수는 417 Hz 였다.

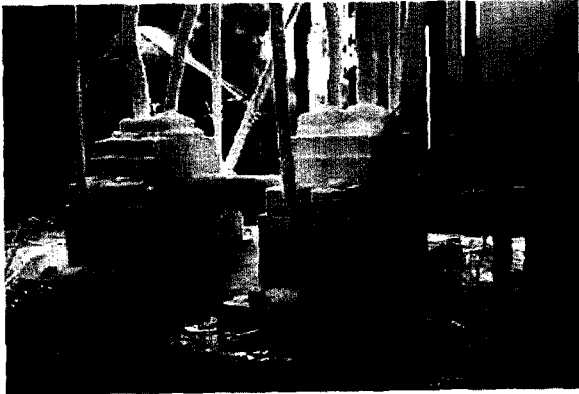


그림 4. 실험중인 고온초전도 베어링의 동특성 측정장치  
Fig. 4. Experimental bearing test rig in operation.

(2) 불평형 응답법을 이용한 베어링의 동특성 측정  
베어링을 포함하는 로터 지지대의 동적 특성을 파악하기 위하여, 회전체가 가지고 있는 자체의 불평형을 사용하기 때문에 불평형 응답법(unbalance excitation method)이라 불리는 방법이 현재까지 사

수 있다[13].  
고온초전도 베어링의 동특성을 측정하기 위하여 위에서 언급한 불평형 응답법을 사용하였다. 그림 3의 고온초전도 베어링에 장착된 로터를 10,000 rpm까지 회전시키고, 이에 대한 불평형 응답을 측정한 결과를 그림 6에 나타내었다. 이 불평형 응답법으로 파악한 고온초전도 베어링의 강성 계수(stiffness)과 감쇠(damping)은 각각  $2.8 \cdot 3.3 \times 10^5$  N/m과 175 204 Nsec/m이었다. 일반적인 유막 베어링에 비하여 매우 낮은 강성 계수 값을 보였으며, 감쇠 계수는 일반적인 로울러 베어링과 비슷한 정도의 값을 보였다. 고온초전도 베어링의 강성 계수와 감쇠 계수의 연성향은 무시할 수 있을 정도이었다.

### Ⅲ. 수평축 플라이휠 에너지 저장장치

앞에서 얻어진 고온초전도 베어링의 동특성으로부터 그림 7, 8에서 보이는 것과 같은 수평형 축을 갖는 새로운 형태의 플라이휠 에너지 저장 장치를 설계 및 제작하였다. 그림 7는 진공 챔버 내에 장착되어 있는

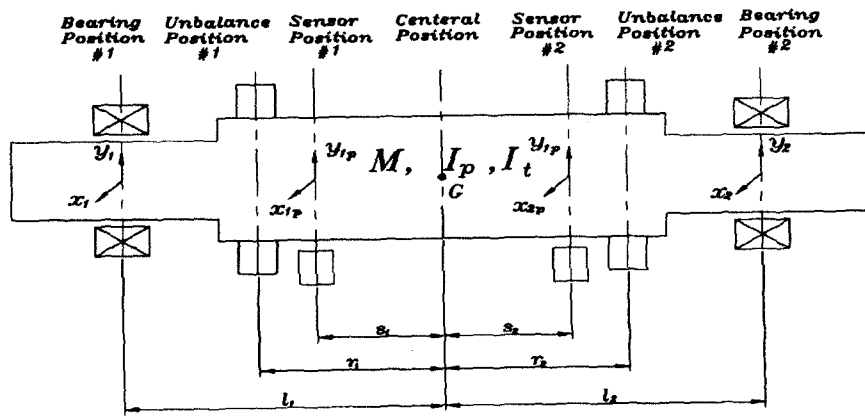


그림 5. 고온초전도 베어링의 동특성 실험에 사용된 로터의 구성도  
Fig. 5. Schematic diagram of the test rig rotor mounted on high Tc superconductor bearings.

용되어 왔다[12,13].  
이 방법은 외부의 교란이 없는 경우에 로터의 동적 거동은 로터 자체가 가지는 불평형에 의해서만 결정된다는 가정하에서 개발된 것이다. 그러므로 불평형에 의해 시스템에 가해지는 힘과 이에 대응하는 응답을 알면, 시스템의 동특성을 나타내는 요소들을 파악할

상태를 나타내고 있다. 이 시스템은 운동에너지 형태로 에너지를 저장하는 복합재 휠, 전기에너지를 운동 에너지로 혹은 반대로 변환해 주는 모터/발전기와 로터를 지지하는 두개의 초전도 베어링으로 구성되어 있다.

고온초전도 베어링은 낮은 감쇠 값을 가지므로 플

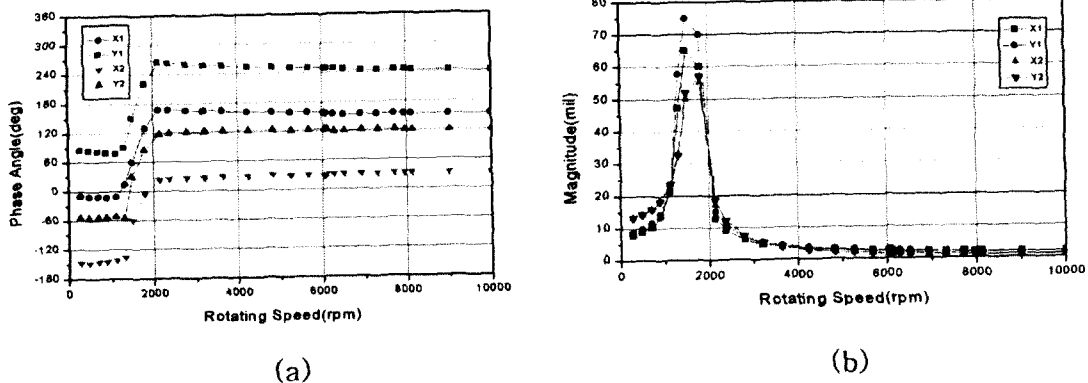


그림 6. 베어링 시스템의 (a) 위상, (b) 진폭응답  
Fig. 6. System dynamic responses: (a) phase, (b) magnitude.

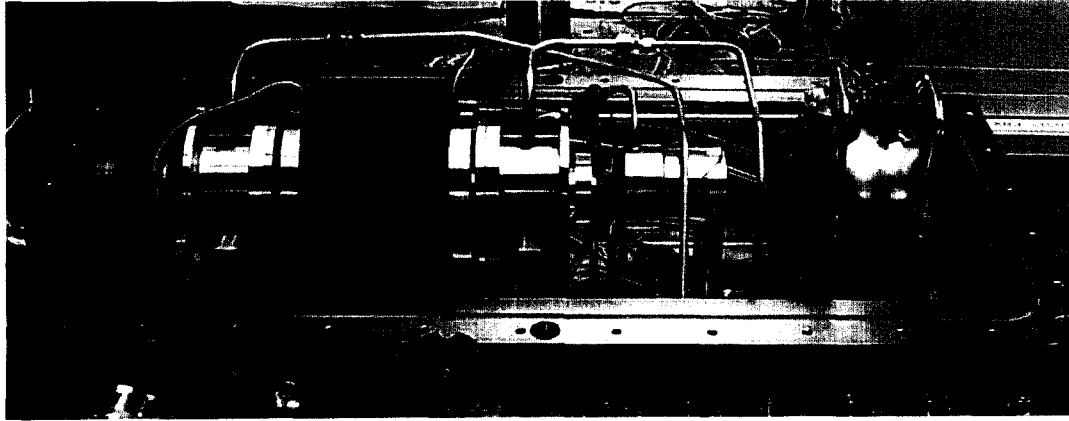


그림 7. 진공챔버 내에 장착된 플라이휠 시스템 시작품의 모습  
Fig. 7. Prototype of the KEPRI SFES in vacuum chamber.

라이휠 에너지 저장장치는 회전수를 높이는 과정에서 지나게 되는 공진점에서의 진동과 회전체의 진동을 제한해 주는 두개의 가이드 베어링을 추가로 설치하였다.

공진점을 통과하는데 필요한 에너지를 최소화하기 위하여 이 시스템은 일반적으로 나타나는 두개의 강제 공진점을 모두 1,500 rpm 이하가 되도록 설계되었으며, 하나는 600 rpm에서 나타나는 병진모드(translational mode)이고, 다른 하나는 1,000rpm에서 나타나는 원뿔모드(conical mode)이다.

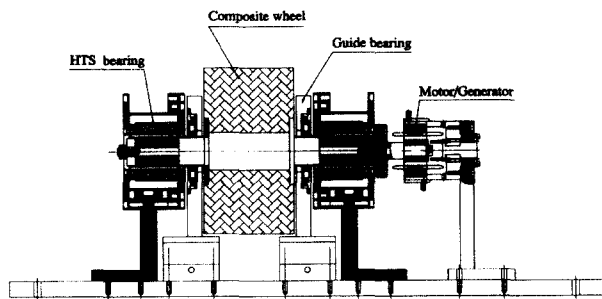


그림 8. 플라이휠 에너지 저장장치의 구성도  
Fig. 8. Schematic diagram of the KEPRI-SESS.

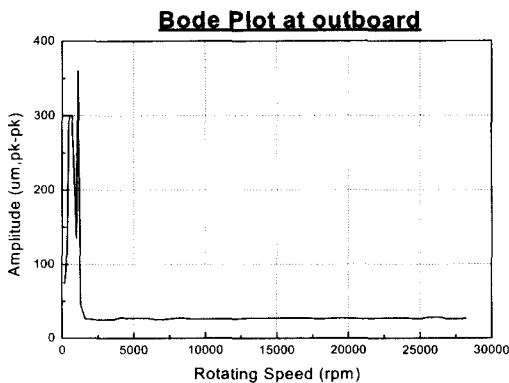


그림 9. 플라이휠 에너지 저장장치 운전 중에 측정된 로터의 진폭  
Fig. 9. Experimentally measured rotor responses during run-up test.

또한 1차 flexible 공진 주파수는 실제 운전에서 사용할 최대 회전수인 40,000 rpm 보다 높은 67,000 rpm일 것으로 계산되므로, 이 시스템은 20,000 - 40,000 rpm 범위의 회전수 내에서 안전하게 사용할 수 있을 것으로 예측되었다.

회전체의 관성모멘트는 약 0.28 kg.m<sup>2</sup> 으로 최대 회전수인 40,000 rpm 에서 490 Wh의 에너지를 저장할 수 있다. 복합재 휠은 T800/2500 탄소섬유로 제작한 것으로 무게는 약 27 kg 이고, 93,000 rpm 까지 사용할 수 있도록 설계 및 제작 되었다.

그림 9은 진공중에서 20,000 rpm까지 회전시키면서 측정된 로터의 응답을 나타낸 것으로, 예상되었던 2개의 강제 공진점이 모두 1,500 rpm 이하임을 알 수 있다. 또한 공진점을 지나면 시스템은 바로 안정해지며, 진동폭도 40 μm 이하로 낮아진다. 그림 10에

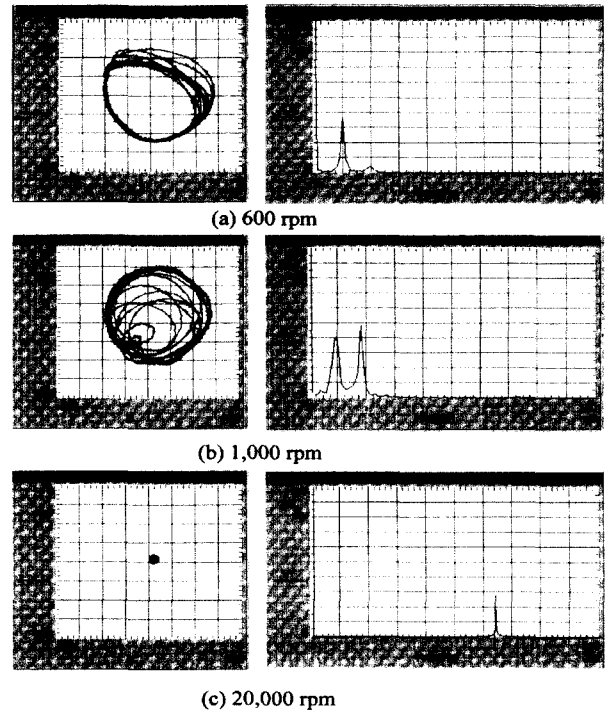


그림 10. 플라이휠 에너지저장장치 로터의 회전궤적과 스펙트럼 (a) 600, (b) 1,000, (c) 20,000 rpm  
Fig. 10. Rotor whirling orbits and corresponding frequency spectra. (a) 600, (b) 1,000, (c) 20,000 rpm

(a) 600, (b) 1,000, (c) 20,000 rpm에서의 로타의 회전체적과 진동주파수 스펙트럼을 표시하였다.

이러한 결과는 로터와 베어링을 최적화하고, 회전체가 회전 평형을 이루도록 정밀하게 제작하면, 고온초전도 베어링은 오일이 필요 없고 무접촉이라는 장점이 있으므로 진공 중에서도 사용할 수 있기 때문에, 기존의 유막 베어링을 대신할 수 있는 다양한 용도가 기대된다.

#### IV. 결 론

고온 초전도 베어링을 이용한 수직형태의 플라이휠 에너지 저장장치를 설계하고 제작하였다. 고온초전도 제어된 베어링과 결합되는 Nd-Fe-B계 영구자석으로 이루어진 회전체 측은 강한 자속을 낼 수 있는 형태로 최적화하였다.

불평형 응답법을 사용하여 측정한 고온초전도 베어링의 특성은  $2.8 \sim 3.3 \times 10^5$  N/m과 175 ~ 204 Nsec/m 이었다. 제작된 고온 초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 28,000 rpm까지 매우 안정적으로 운전되었다. 시스템의 응답을 측정한 결과에서 진폭이 약 40 m이하로 매우 낮았다.

#### 참고문헌

[1] C Leblond, J Monot, D Bourgault and G Desgardin, "Effect of the oxygenation time and of the sample thickness on the levitation force of top seeding melt-processed YBCO," Superconductor Science & Technology, 12 (1999) 405-410.

[2] Valenzuela SO, Jorge GA, Rodriguez E, "Measuring the interaction force between a high temperature superconductor and a permanent magnet," American Journal of Physics, 67 (1999) 1001-1006.

[3] G. Fuchs, G. Krabbes, P. Schatzle, S. Grus, P. Verges, K-H Muller, J. Fink, and L. Schultz, "Trapped fields larger than 11 T in bulk  $Yb_{a_2}Cu_3O_{7-x}$  material," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 10 (2000) 890-893.

[4] Turner LR, "Fields and forces in flywheel energy storage with high-temperature superconducting bearings," IEEE Transactions on Magnetics, 33 (1997) 2000-2003.

[5] Coombs T, Campbell AM, Storey R, Weller R, "Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 9 (1999) 968-971.

[6] Yoshitomo Sakayori, Hruhiko Suzuki, Masaaki Takashige, "Fabrication of Magnetic Levitation Surface Motor Utilizing the Bulk High- $t_c$  Superconductor," Transactions of the

Institute of Electrical Engineers of Japan D - A Publication of Industry Applications Society, 118 (1998)1042-1049

[7] F. C. Moon, M. M. Yanoviak, and R. Ware, "Hysteretic Levitation Forces in Superconducting Ceramics," Appl. Phys. Lett. 52 (1988) 1534.

[8] S. Nakamura, "Flywheel Technologies and High  $T_c$  Superconductivity," ISTEC Journal 6 (1993) 43-50.

[9] R. G. Abboud, J. Hull, K. Uherka, T. Mulcahy, "Flywheel Energy Storage Using Superconducting Magnetic Bearings," presented at the 56th Annual Amer. Power Conf. Chicago, USA April 27, 1994.

[10] J. R. Hull, J. L. Passmore, T. M. Mulcahy, and T. D. Rossing, "Stable levitation of steel rotors using permanent magnets and High Temperature Super-conductors," J. Appl. Phys. 76 (1994) 577-580

[11] John R. Hull, "Flywheels on a roll", IEEE Spectrum, 6 (1997) 20-25

[12] Q. Zhang, G. Lallemt, and R. Fillod, "Identification of the Dynamic Characteristics of Oil-Film Bearings," Rotating Machinery Dynamics, ASME 11th Biennial Conf. Mech. Vib. & Noise, Boston, Sept., 1987.

[13] S-K Choi, "Experimental Measurements and Methods for Data Analysis to Determine the Rotordynamic Coefficients of a Labyrinth Seal," Master thesis, Dcpart of M.E, Texas A&M university, 1988

#### 저 자 소개



성태현(成臺鉉)

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



이준성(李峻誠)

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



한영희(韓榮熙)

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



한상철(韓相喆)

1966년 3월26일 생, 1987년 고려대학교 공대 금속공학과 졸업, 1990년 KAIST 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 KAIST 재료공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원



최상규(崔相奎)

1983년 한양대학교 공과대학 기계공학과 학사, 1988년 Texas A&M Univ. 기계공학과 석사, 1992년 Texas A&M Univ. 기계공학과 박사, 1984. 4 - 1985. 6 한국베어링(주) 연구원, 1992. 8 - 1992. 12 Research associate, Turbomachinery Lab., Texas A&M Univ., 1993. 1 - 현재 선임연구원, 한국기계연구원 구조시스템연구부, 1994. 3 - 1994. 7 초빙연구원, Pratt & Whitney USA



김영철(金榮哲)

1986.3-1990.2 부산대학교 기계공학 학사, 1991.3-1993.2 부산대학교 기계공학 석사, 1993.3-현재 한국기계연구원 선임연구원, 2000.3-현재 한국과학기술원 기계공학 박사과정



김상준(金相儁)

1951년 2월 7일 생, 1986년 서울산업대학교 전기공학과 졸업, 1987년 발송배전기술사, 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업(석사), 1993년 과학기술처장관상(장영실상), 1999년 고려대학교 재료공학과 졸업(박사), 2000년 대통령상, 1976년 ~ 현재 한전 전력연구원 전기이용기술그룹장/책임