

Fabrication and Performance Tests of Flywheel Energy Storage System using High Tc Superconducting Bearing

고온초전도체 베어링을 사용하는 에너지 저장용 플라이휠 장치의 제작 및 성능 평가

Ho-Jin Lee, Ki-Baik Kim, Chang-Seop Koh*, Soo-Hoon Lee**, and Gye-Won Hong

이호진, 김기백, 고창섭*, 이수훈**, 홍계원

*Functional Materials, Korea Atomic Energy Research Institute,
P.O. Box 105, Yusong, Taejon, Korea, 305-600*

**Department of Electrical Engineering, Chungbuk University,*

***School of Mechanical and Industrial Engineering, Ajou University,*

한국원자력연구소, 기능성재료분야

*충북대학교, 전기공학과

**아주대학교, 기계 및 산업공학부

A prototype of Flywheel Energy Storage System with high Tc superconducting bearings was fabricated and tested to verify its applicability for the energy industry. The moment of inertia of assembled wheel with rotor magnets is about $1.072 \times 10^{-1} \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$. The wheel was designed to withstand its integrity up to the rotation speed of 20,000 rpm. YBCO bulk superconductors prepared by seed growth method were used as bearing to levitate and stabilize the rotating wheel. High speed rotation of the flywheel without mechanical contact was achieved by using specially designed Halbach type motor. The flywheel system showed very high stability during test operation performed up to the speed of about 10,000 rpm. The energy loss measured by free decay test performed between 9,300 rpm and 7,000 rpm was calculated as about 45 W.

1. 서론

전력수급의 효율을 높이기 위해서는 저장 효율이 우수한 전력저장 장치의 개발이 필요하다. 우리 나라와 같이 출력 조절이 어려운 원자력 발전의 비중이 큰 경우, 전체 전력 수요에 맞추어 전력을 적절히 조절하여 공급할 수 있는 계통이 준비되어야 한다. 즉 전력 생산량이 수요량 보다 많은 경우 남는 전력을 저장하고, 수요량이 많은 경

우 저장된 전력을 공급하게 되면 몇 개의 발전소를 더 건설한 효과를 얻을 수 있으므로 매우 경제적이다. 환경을 보호할 수 있다. 또한 소규모 전력 저장장치의 경우 전력의 품질을 향상시킬 수 있고, 저장된 에너지를 짧은 시간에 방출하는 경우 높은 출력을 얻을 수 있는 장점들을 가진다.

YBCO 초전도체의 부상 특성을 이용하여 운동 에너지 형태로 에너지를 저장하는 경우 기계적 마찰에 의한 에너지손실이 거의 없고, 자기장이 초전도체에 포획되어 인력이 발생되므로 특별한

위치제어 장치 없이 안정하게 시스템을 운전할 수 있다. 이와 같이 초전도체의 특성을 이용하여 플라이휠의. 베어링으로 사용하면 에너지 손실이 적고, 운전 방법이 간단한 에너지 저장장치를 개발할 수 있다.

본 논문에서는 에너지 저장용 초전도 플라이휠 장치의 제작 과정과 YBCO 벌크 초전도체, 휠, 자석, 그리고 냉각과 같은 요소 기술을 서술하였으며, 이렇게 제조된 장치를 실제 운전하여 그 특성시험 결과를 기술하였다.

2. 플라이휠 장치 제작

본 연구에서 제작하고자 하는 플라이휠 장치는 산업 응용이 가능하도록 회전속도는 물론, 휠의 크기 및 질량을 늘여 저장에너지를 크게 하고, Halbach 계자를 이용하는 구동장치를 이용하여 휠과 구동장치사이의 기계적 마찰 손실을 제거하여 에너지 저장 효율을 높이고자 하였다. 제작된 초전도 플라이휠 시스템의 개략적인 구조는 그림 1 과 같이 진공용기, 초전도체 및 냉각용기, 휠, Halbach 구동장치로 구성되어 있다.

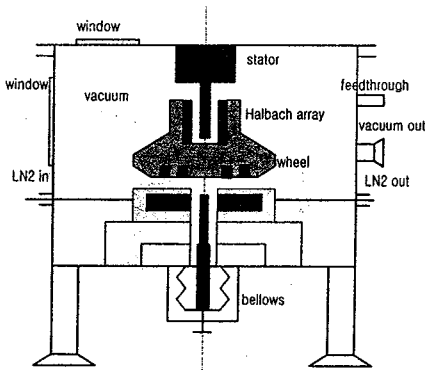


그림 1. 초전도 플라이휠 장치 개략도

진공용기는 본체 용기로서 스테인레스 스틸로 제조하였으며, 운전 중 내부를 진공상태로 유지시켰다. 내부를 진공으로 하는 이유는 회전 휠이 고속으로 회전할 때 공기에 의한 마찰 손실을 줄이기 위해서이며, 또한 초전도체를 냉각시키는 용기 주변을 단열 시킴으로써 냉각효율을 높이기 위해서이다. 저온으로 냉각된 초전도체 냉각용기의 외

부에 공기가 있는 경우 공기 중의 수분이 용기와 휠 사이의 좁은 공간에 얼어붙게 되어 휠의 회전을 어렵게 한다. 진공용기 벽에는 window를 설치하여 내부의 휠의 상태를 관찰 할 수 있도록 하였다.

초전도체를 냉각시키기 위한 냉각용기의 윗면은 약 1 mm 두께로 가공하여 휠과 초전도체 사이의 간격을 최소화하도록 하였다. 초전도체를 냉각시키기 위해 냉각용기에 부착되어 있는 inlet port 로 액체질소를 공급하고, outlet port 에서 나오는 질소의 상(phase) 을 확인하여 냉각 상태를 예상하였다. 이 용기 내부에는 seed growth 방법으로 제조 된 사각형의 YBCO 초전도체 bulk 들을 cutter 로 자르고 윗면을 grinding 하여, 용기 공간에 최대한 많은 면적을 차지하도록 배열하였다. 이렇게 가공된 총 32 개의 초전도 brick 들은 알루미늄 분말을 분산시킨 에폭시 수지를 사용하여 직경 23 cm 의 스테인레스 스틸 판에 접착시킨 후 용기 안에 조립 고정되었다. 이 냉각용기는 외부가 진공이고, 내부는 상압 이상이며, 약 77 K 까지 냉각되므로 용기를 밀폐시키기 위해 indium 금속 seal 을 사용하였다.

냉각용기의 재질은 휠에 붙어 있는 자석에 의한 ac loss를 최소화하기 위해 비자성체인 SUS 310을 사용하였다.

3. 휠 제작 및 저장 에너지

플라이휠 장치의 저장에너지는 식 1 과 같이 정의되므로 에너지를 높이기 위해서는 회전속도를 크게 하고 식 2 와 같은 회전 휠의 moment of inertia 를 크게 하여야 한다.

$$E = \frac{1}{2} I_z \omega^2 \quad (1)$$

$$I_z = \int r^2 dm \quad (2)$$

여기서 ω 는 회전각속도, m 은 질량, r 은 반경 방향의 좌표이다. 식 2 에서 보듯이 회전에너지를 크게 하기 위해서는 휠의 질량을 늘이고, 반경방향의 길이를 크게 해야 한다. 설계 목표는 약 65 Wh 의 저장용량을 갖도록 하였으며, 그림 2 와

같은 형태의 휠을 제작하였다.

휠, 부상용 자석, 그리고 구동용 Halbach rotor 자석을 포함한 회전체의 질량을 약 13.5 Kg 으로 하였으며, I-DEAS 전산 code를 이용하여 휠의 회전 inertia를 계산한 결과 $1.07 \times 10^{-1} \text{ kg-m}^2$ 를 얻을 수 있었다. 이 값의 inertia 로 20,000 rpm 회전을 하는 경우 65 Wh 에너지가 저장될 수 있다. 휠의 재질은 알루미늄합금 두랄루민을 사용하였다. Ac loss 면에서는 불리할 것으로 보이나, 이후 FRP 재료를 사용할 것을 대비하여 비슷한 비중을 같은 재료를 선정하였다.

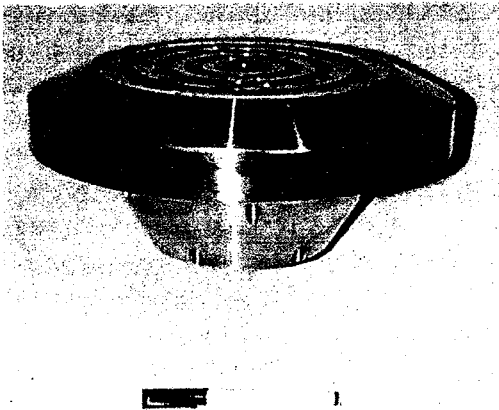


그림 2. 제작된 휠의 형상

I-DEAS code 를 사용하여 회전 속도 20,000 rpm 에 대한 휠에서의 응력분포를 계산하였다. 그림 3 에서 보듯이 부상용 영구자석에 작용하는 최대 응력은 약 150 MPa 정도이며, 휠에 작용하는 최대응력은 약 220 MPa 정도로 모두 재료의 허용 응력 이내의 값이므로 20,000 rpm 에서 휠이 회전 원심력에 의해 파손되지는 않을 것으로 예상된다. 회전 시 최대 변형량은 0.2 mm 정도로 미소하게 계산되었다.

휠과 초전도체 사이에서의 진동특성을 조사하기 위해 rotor 자석 및 support 부분을 제외시킨 약 8.3 Kg 정도의 휠을 사용하여 예비 실험을 수행하였다. Hammer 를 이용하여 0 에서 3,000 Hz 까지 각각 횡 방향과 축 방향으로 가진하여 각 방향에 대한 주파수 응답을 살펴보았다. 축 방향 고유진동수는 12.25Hz (735 rpm) 이었으며,

횡 방향 고유진동수는 6.13Hz (368 rpm) 이었다. 이와 같은 결과를 볼 때 공진회전수는 매우 낮은 회전수 영역에 존재하므로 가속 중 피할 수는 없으나, 낮은 회전수 영역이므로 시스템의 안정성 면에서는 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다.

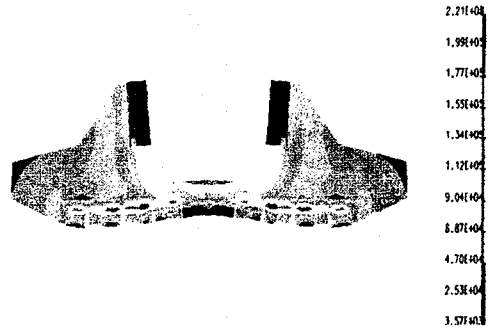


그림 3. 20,000 rpm 운전 중 계산된 휠의 응력 분포 및 과장된 변형 형태

그림 4 는 축 밀면 부상용 자석의 분포 형태이다. 철판에 자석을 부착한 4개의 ring 자석들을 반경 방향으로 서로 N-S-N-S 가 되도록 배치하여 반경 방향으로의 이탈을 방지하였다. 안쪽 2개의 ring 자석은 직경이 작아 각각 1 몸체로 가공하였으나, 바깥쪽 2개 ring 자석은 그림 4 와 같이 조각들로 조립되었다.

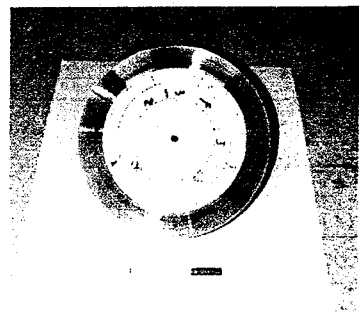


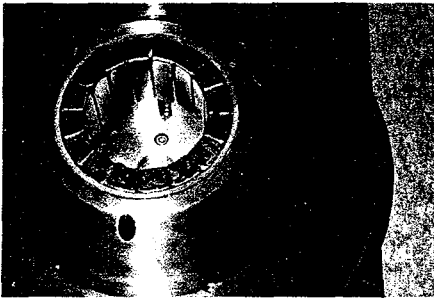
그림 4. 부상용 ring type 의 자석 분포

안쪽 2개 자석의 표면에서 측정된 자기장은 각각 4,200 G, 4,400 G 정도였으며 바깥 2개의 자석은 작은 자석들로 조립되어 있으므로 각각의 자석에 대하여 최대 4,300G, 최소 3,400G, 그리고 다른 하나는 최대 3,500G, 최소 2,500 G 로 측정되었

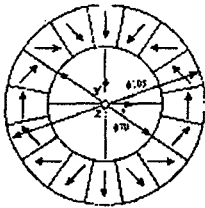
다. 자기장의 변화가 거의 1,000 G 정도로 매우 큰 값이므로, 회전 시 큰 ac loss 즉 큰 에너지 손실을 가질 것으로 예상되었다.

4. 구동 장치

구동장치의 경우 휠과의 기계적인 마찰 손실을 제거하기 위해 기계적 접촉 배어링을 갖지 않는 Halbach array 구조의 motor /generator 를 사용하였다. 그림 5 는 휠과 조립 된 Halbach 배열 영구자석들과 그 자석의 자기장 방향을 보여 주고 있으며, 이 자석들 내부에는 매우 균일한 2 극 자계가 형성되어 있다. 기존 많이 사용되고 있는 일반 권선형이나 일반 자석형에 비해 높은 자기장을 얻을 수 있고, 큰 공극을 얻을 수 있으므로 운전시 안전하고, ac loss 가 작아 유리 할 것으로 예상된다. Stator 는 축 방향으로 전류가 흐르도록 권선하여 회전 torque 를 얻을 수 있도록 하였다.



(a)



(b)

그림. 5 (a) 구동용 Halbach array 자석 조립,
(b) Halbach 계자의 자석분포 (2극)

5. 운전 특성

제작된 플라이휠의 특성을 확인하기 위해 운전 시험을 수행하였다. 운전 중 빠르게 회전하는 휠이 이탈되는 경우 매우 위험하므로 그림 6 과 같이 장치 둘레에 모래 포대를 쌓은 후 실험을 수행하였다. 회전하는 휠의 상태를 감시하여 미리 이탈 가능성을 확인할 수 있는 방법을 갖추지 못해, 회전수를 계속 증가시킬 수 없었으므로 플라이휠이 갖는 최대 저장 에너지를 확인할 수 없었다. 운전 시험은 여러 번의 실험을 통해 조금씩 회전 속도를 증가시키면서 수행하였다.

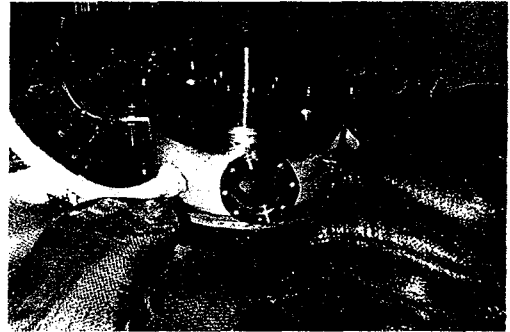


그림 6. 초전도 플라이휠 운전 및 안전 시설

운전 방법은 다음과 같다. 장치 밑에 있는 bellows 의 높이를 조정해 초전도체 냉각 용기 약 8-10 mm 위에 휠을 위치시킨다. 이 후 진공용기를 닫고 내부를 진공으로 만든 후, 냉각 용기에 4-5 psig 압력으로 액체 질소를 공급한다. 약 40 분 정도면 초전도체가 충분히 냉각되며, 이때 벨로우즈를 완전히 내려 휠이 field cooling 상태로 공중의 안정한 높이에 위치시키도록 한다. 이 후 rotating system을 가동 시켜 휠을 회전시킨다.

현재까지 얻은 최대 속도는 약 10,000 rpm 정도이며, 이는 초기에 설계된 속도 20,000 rpm 의 1/2 정도이다. 10,000rpm 의 경우 초전도 플라이휠이 갖는 저장 에너지는 약 16 Wh 정도였다. 이 속도에서 휠의 회전은 매우 안정하였으며, 전체 시스템과 휠은 기계적으로 분리되어 있으므로 장치 외부에서는 거의 아무런 진동을 감지할 수 없었다. 20,000 rpm 까지의 운전은 휠의 이탈을 방지하거나, 감시할 수 있는 계통이 준비된 후 수행될 예정이다.

그림 7 은 플라이휠을 약 9,300 rpm 까지 상승시킨 후 외부 부하 없이 free decay 시킨 그림이다. 그림에서 9,300-7,000 rpm 사이의 에너지 손실은 약 45 W 정도로 계산되었다. 이 값은 기계적인 접촉이 없는 상태에서 측정된 값으로는 매우 큰 값으로 생각되며, 이는 부상용 자석 자기장의 큰 불 균질도에 의한 ac loss 의 결과로 생각된다. 일본의 경우 pivot bearing 을 보조로 사용하는 100 Wh 급 초전도 플라이휠을 17,000 rpm에서 운전 한 결과 초전도체에서는 약 0.6 W, 그리고 Iron core 및 pivot bearing에서 64 W 의 에너지 손실이 발생하였다고 발표하였다. 이와 같은 결과를 직접적으로 비교할 수는 없으나 초전도 bearing 이 아닌 기계적 마찰에 의한 에너지 loss 비율이 매우 큰 것을 알 수 있으며, 따라서 본 연구에서 제작한 무접촉 장치의 경우 휠의 부상용 자석의 큰 불 균질도가 에너지 손실에 큰 영향을 주고 있음을 예상 할 수 있다.

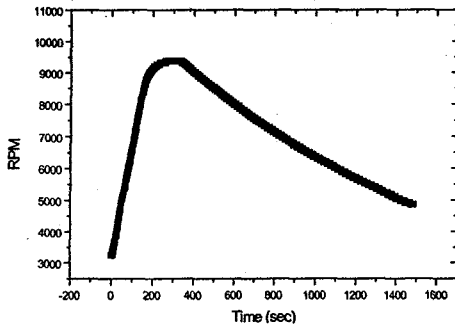


그림 7. 초전도 플라이휠의 free-decay

운전형태는 초기에 회전 상태가 약간 불안한 후 곧 안정한 상태를 유지하였다. 이와 같은 현상은 이미 설계 시 공전에 의한 위험 속도 계산을 통해 예상되었다. 회전 속도를 감소 시키며 반경 방향의 변위를 측정 한 결과 거의 안정한 상태에서 약 370 rpm에 이르렀을 때 반경 방향으로 약 0.7 mm 정도의 변위가 측정되었다. 이 정도의 변위는 휠의 rotor 와 stator 간의 공극에서 충분히 흡수 할 수 있다.

6. 결론

에너지 저장용 초전도 플라이휠의 응용을 위해 이에 필요한 요소기술을 조사하고자 65 Wh 급의 플라이휠을 설계 및 제작하였다. 운전 시험을 통해 약 10,000 rpm 의 회전수를 안정적으로 얻었으며, 이때의 저장 에너지는 약 16 Wh 정도였다.

구동시스템과 휠 사이의 기계적인 마찰손실을 Halbach 계자를 사용하여 완전히 배제시켰으나, 휠 부상용 자석의 자기장 균질도가 좋지 않아 ac loss 에 의한 에너지 손실이 클 것으로 예상하였다. 휠을 9,300 rpm에서 7,000 rpm 으로 자유 감소시키면서 측정된 결과로부터 계산된 system 의 에너지 손실은 약 45 W 정도였다. 휠의 고속 회전에 의한 이탈을 방지 또는 감시하는 계통이 확보되면 20,000 rpm 회전 시험이 수행 될 것이다.

참고문헌

- [1] KAERI/RR-1709/96, 초전도재료 응용기술개발, 한국원자력연구소,1997
- [2] KAERI/CM-275/98, 초전도자기베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치의 최적설계, 아주대학교, 1999
- [3] KAERI/CM-288/98, 초전도플라이휠 전력변환 시스템 연구, 충북대학교, 1999
- [4] 고온초전도 플라이휠 전력저장연구개발, 新エネルギー産業技術總合開發機構, 平成 8 年
- [5] Fumihik Ishikawa, et. al, Flywheel Storage System with High Temperature Superconductivity Bearings", VDI BERICHTE NR. 1187, pp177-193, 1995