

산소 열처리에 의한 100 kWh 급 초전도 베어링의 강성특성연구 Stiffness properties by oxygen heat treatment in 100 kWh class superconductor flywheel energy storage system bearing

*#박병준¹, 정세용¹, 두승규¹ 김철희¹, 이정필¹, 박병철¹, 한상철¹, 한영희¹

*#B. J. Park(hampstead@kepco.co.kr)¹, S. Y. Jung¹, S. G. Du¹, C. H. Kim¹, J. P. Lee¹, B. C. Park¹, S. C. Han¹, Y. H. Han¹
¹ 한국전력공사 전력연구원

Key words : Superconductor Flywheel Energy Storage System , Oxygen heat treatment, Superconductor Bearing, Repulsive Force

1. 서론

초전도 플라이휠 에너지 저장장치 (Superconductor Flywheel Energy Storage System, SFESS)는 크게 회전에 의한 운동에너지의 형태로 전기를 저장하는 플라이휠과 고속회전 에너지를 제공하는 모터, 휠을 지지하는 초전도 베어링 (Superconductor Bearing), 회전에너지를 전기 에너지로 바꾸어 주는 발전기로 구성되어 있다. 특히 초전도 베어링은 무 접촉 베어링이기 때문에 각종 마찰손실을 줄일 수 있고, 고속회전을 가능케 하므로 에너지 저장효율이 높으며 저장 밀도가 높다는 장점이 있다.¹ 초전도 베어링은 영구자석 회전자와 고온 초전도체의 상호관계에 의하여 그 특성이 결정되며 가동 중 특별한 운전조작 없이 회전을 지지할 수 있는 특성을 가지고 있다.^{2,3} 초전도 플라이휠에 적용되는 초전도 베어링은 에너지 효율뿐만 아니라 휠을 안정적으로 지지하여야 하므로 설계 시 시스템 운전 전에 베어링의 정확한 강성파악이 필수적이며 이런 강성은 초전도 벌크 각각의 반발 자기력(repulsive force) 특성이 주요한 변수가 된다.⁴ 초전도 베어링은 passive type 으로 진공 중에 일단 장착하면 특별한 유지 관리가 필요 없지만 베어링 제작 전 초전도 벌크의 불균질한 치수를 교정, 시스템 정비, 주변부품의 교체, 표면에 수분 및 오염물질에 의하여 초전도 벌크의 가공이 필수적인 공정으로 대두 되고 있다. 본 연구에서는 이러한 가공 공정이 벌크에 주는 영향을 알아보기 위하여 실제 100 kWh 급 초전도 플라이휠에 사용되는 초전도 벌크를 일정 깊이로 grinding 하여 가공 정도가 벌크 반발력에 미치는 영향에 대하여 살펴 보았다. 또한 가공으로 인하여 일어날 수 있는 bulk 특성저하를 회복하고자 산소 열처리(Oxygen heat treatment)를 실시하였다. 초전도 벌크의 특성 유지관리 조건을 분석하여 좀더 효율적인 시스템 유지에 도움이 될 수 있도록 연구를 진행하였다. Fig. 1 은 100 kWh 급 초전도 플라이휠에 사용되는 초전도 베어링의 디자인의 단면을 보여 주고 있다.

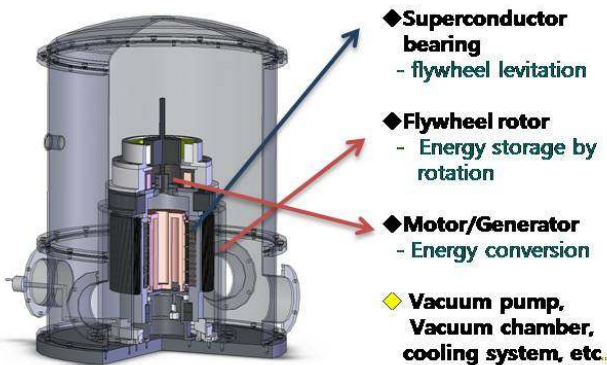


Fig. 1 Design of superconductor bearing for 100 kWh SFESS

2. 제작 및 시험

초전도 베어링 벌크의 repulsive force 를 평가 하기 위하여 초전도체에 강한 magnet flux 가 도달 할 수 있도록 $\Phi 90$

0.5T NdFeB-35 영구자석(Permanent Magnet) 회전자(Rotor)를 설계 제작하였다. 초전도 벌크는 YBCO 단결정을 사용하였으며 액체질소에 직접 담구어 77K 으로 냉각하였다. 냉각 후 자체 제작한 인장 실험기 shaft 에 로터를 고정 한 후 4 mm/sec 의 속도로 벌크 seed 면이 접촉할 때까지 누르면서 zero field cooling 평가를 진행하였다. 초전도 벌크는 38*38*12 mm 크기로 동일하게 가공하였고, 벌크에 착자되는 회전자 상부에는 로드셀을 장착하여 실제 벌크에서 전달되는 반발력의 힘을 알아보았다. 100 kWh 급 초전도 벌크의 반발력을 측정 한 후에 각각 일정 깊이로 grinding 을 실시 하였으며 이후 동일한 조건으로 산소 열처리를 실시 하여 그 결과를 관찰 하였다. 초전도 베어링에 사용된 초전도체는 Sm seed 를 이용한 단결정 성장방식을 이용하였고 Grinding 은 건식법을 사용한 기계적 가공을 적용하였으며 초전도 벌크의 열처리는 산소 분위기 하에서 진행되었다.

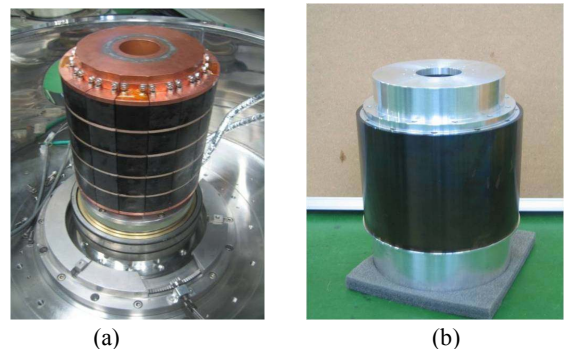


Fig. 2 Superconductor bearing (a) stator (b) rotor for 100kWh SFESS

3. 실험결과

초전도 베어링에 사용된 초전도체의 자기적 특성은 착자시 벌크가 보여주는 자기 분포와 밀접한 연관을 갖는다.

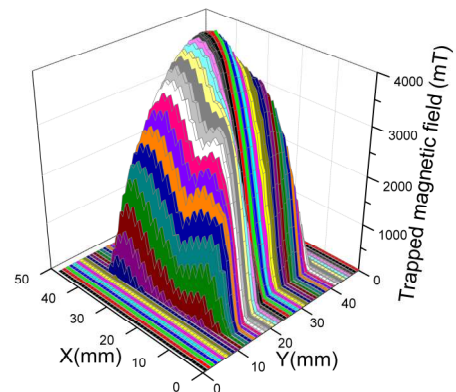


Fig. 3 Distribution of the trapped field above a YBCO bulk

수백개의 초전도 벌크로 이루어진 100 kWh 급 초전도 베어링은 로터와 pining 되는 각 층 위치마다 일정한 강성

특성을 유지하여야 하며 이는 회전체의 안정적 지지에 필수적인 요소다. 따라서 벌크 repulsive force 측정 전에 안정적인 자기적 특성을 파악하기 위하여 초전도 벌크의 포획 자장분포를 평가 하였다. 측정 결과 Fig. 3 에서도 확인 할 수 있듯이 YBCO 초전도 벌크는 seed 방향 기준으로 0.35T 이상의 단결정 자기분포를 보여주었으며 이는 초전도 베어링이 안정적으로 회전체를 지지 할 수 있도록 초전도 벌크 자기분포가 설계되어 있음을 지적한다.

초전도 벌크의 repulsive force 는 거리에 따라 측정이 되며 bulk 표면에 근접함에 따라서 그 힘이 크게 상승하게 된다. 동일한 측정조건에서 벌크 표면의 maximum repulsive force 가 크면 거리에 따른 force 기울기도 함께 증가하게 되며 결국 벌크 표면에서의 강성이 증가된다고 말할 수 있다. 이러한 YBCO 벌크에 대하여 표면 가공 깊이에 대한 반발력 특성변화를 알아보고자 1 mm ~ 5 mm깊이로 표면 grinding 을 실시 하여 그 결과를 Fig. 4 에 나타내었다.

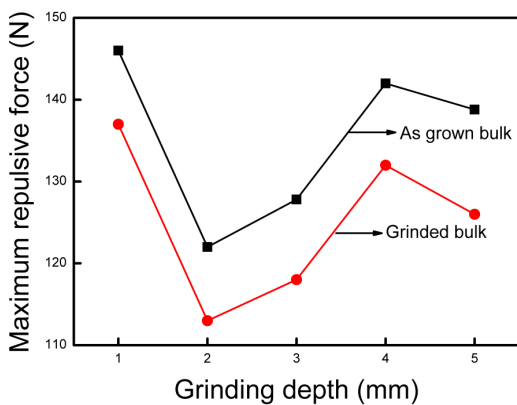


Fig. 4 Force variation of superconductor bearing according to grinding depth

평가 결과, 표면 grinding 에 따라서 모두 10 % 이내로 maximum repulsive force 가 저하 됨을 확인 할 수 있었으며 5 mm이하의 가공 깊이에서는 가공 깊이와 반발력은 큰 상관관계가 없음을 확인하였다. 위 결과는 초전도 베어링 및 벌크 메인터넌스 두께를 최적화 설계하는데 중요한 data 로 활용될 수 있다.

초전도 단결정 벌크의 산소 열처리 공정은 주로 확산(diffusion)에 의하여 지배되는 프로세스 이지만 10 mm 이상의 두꺼운 벌크가 사용되는 초전도 베어링에서는 충분한 확산 공정을 기대하기 어렵다.

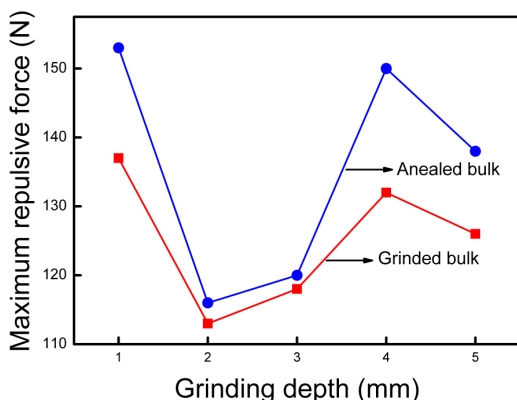


Fig. 5 Force variation of superconductor bearing according to oxygen heat retreatment.

따라서 본 연구에서는 벌크 내부에 잔존하고 있는 산소 결핍 상태를 산소 재 열처리를 통하여 해소하여 grinding 을 통해 취약해 질 수 있는 초전도 벌크의 성능을 향상 할 목적으로 열처리를 실시 하였다. 그 결과 Fig. 5 에서 확인 할 수 있듯이 산소 재 열처리를 통하여 대다수의 벌크는 10% 미만의 반발력 향상을 기대할 수 있었다. 하지만 가공 내부 깊이가 1 mm에서 5 mm로 증가 됨에 따라서 산소 열처리에 대한 의존도는 크게 관련 없음을 확인하였다. 위 결과로 산소 공핍이 내부에 존재하여 산소 재 열처리가 maintenance 에 효율적인 것은 확인하였으나 가공 깊이에 따른 산소 공핍 정도는 5 mm 이하에서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 위 실험을 근거로 초전도 벌크 가공에 따른 특성저하는 산소부족과 큰 상관관계가 있다고 판단할 수 있지만 좀더 세밀한 원인을 규명하기 위해서는 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

100 kWh 급 초전도 베어링 벌크의 반발 자기력 특성을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 초전도 베어링 벌크의 포획자장 테스트 결과 양질의 단결정의 자장분포를 확인 할 수 있었다.
2. 단결정 초전도 벌크는 표면 grinding 을 통하여 반발력이 10% 미만 저하되는 것을 확인 하였다...
3. Grinding 으로 저하된 초전도 벌크의 반발력은 산소 재 열처리를 통하여 회복할 수 있었으며 그 정도는 10% 미만을 나타내었다.
4. 초전도 벌크 표면 5 mm 이내에서 벌크 가공 깊이에 따른 반발력 차이는 미비함을 확인 할 수 있었다.

이러한 결과를 응용하여 100 kWh 급 초전도 플라이휠 베어링 운전에 따른 메인터넌스 및 설계 사이즈를 최적화 하여 효율적으로 플라이휠을 부양시킬 수 있으며, 안정적인 플라이휠을 제작하는데 기여 할 수 있을 것으로 기대된다.

후기

This research was supported by a grant from Korea Institute of Energy Technology Evaluation & Planning (KETEP), Republic of Korea.

참고문헌

1. Coombs, T. et al., "Superconducting magnetic bearings for energy storage flywheels" IEEE Trans. Applied Supercon. (1999) vol.9, pp. 968-971
2. T. H. Sung, S. C. Han, Y. H. Han, J. S. Lee, N. H. Jeong, S. D. Hwang and S. K. Choi, " Designs and analysis of flywheel energy storage system using High-Tc superconductor bearings," Cryogenics 42, pp. 357-362, 2002
3. T. Ichihara, K. Matsunaga, M. Kita, N. Murakami et al, "Application of Superconducting Magnetic Bearings to a 10 kWh-Class Flywheel Energy Storage System," IEEE Tran. Vol.15, No.2, 2005
4. Y. H. Han, J. R. Hull, S. C. Han, N. H. Jeong, T. H. Sung, and Kwangsoo No, "Design and characteristics of a superconductor bearing" IEEE Tran. Vol.15, NO. 2, 2005