

초전도베어링을 이용한 300Wh급 플라이휠 에너지저장장치의 고속운전시험

⁰김영철*, 최상규*, 성태현**, 이준성**, 한영희**

High Speed Operating Test of a 300Wh Flywheel Energy Storage System Using Superconductor Bearings

Young-Cheol Kim*, Sang-Kyu Choi*,
Tae-Hyun Sung**, Jun-Sung Lee**, and Young-Hee Han**

ABSTRACT

A 300Wh class flywheel energy storage system using high Tc superconductor bearings(HTC SFES) is being developed by KIMM and KEPRI. HTC SFES consists of a flywheel rotor, superconductor bearings, a motor/generator and its controller, touch-down bearings, vacuum chamber, etc. Stiffness and damping values of superconductor bearings were experimentally estimated to be 67,700N/m and 29Ns/m respectively. The present HTC SFES was designed to have maximum operating speed of 33000 rpm, which is far above 2 rigid body mode critical speeds of 645rpm and 1,275rpm. Leaf-spring type touch-down bearing were utilized to have the system pass safely through the system critical speeds. It has been experimentally verified that the system can run stably up to 28,000 rpm so that HTC SFES is now expected to reach up to its maximum design speed of 33,000rpm without any difficulties. The Halbach array motor & generator has also been proven its effectiveness on transferring electrical energy to a rotating composite flywheel in kinetic form.

1. 서론

최근 초전도 자기 베어링(superconductor bearing)을 이용한 플라이휠 에너지저장장치(flywheel energy storage system)에 관한 연구가 미국, 일본, 독일, 이탈리아 등 전세계적으로 활발히 진행되고 있으며[1,2], 최근 국내(한국전력연구원)에서도 반경방향과 축방향으로 동시에 하중을 지지할 수 있는 초전도베어링이 개발되어 수평형 플라이휠 에너지저장장치에 응용하기 위한 연구가 진행중에 있다[3].

일반적으로 플라이휠 에너지저장장치는 높은 에너지저장밀도, 높은 에너지출력밀도, 반영구적인 수명 및 환경 친화성 등의 장점을 가지고 있으며, 회전에 발생시키는 에너지의 손실을 최소화하기 위한 비접촉 베어링(noncontacting bearing) 기술과 고강도 및 높은 에너지밀도를 구현하는 복합재휠(composite wheel) 기술 및 전동발전(motor/generator)기술이 그 핵심기술이라 할 수 있다. 이 중에서도 특히 비접촉 베어링중 하나인 고온초전도 벌크를 이용한 초전도 베어링(high temperature superconductor bearing)은 능동제어가 필요 없이 안정된 운전을 할 수 있는 장점이 있다.

* 한국기계연구원 회전체연구그룹

** 한국전력연구원 전력계통연구실

이전의 논문[3,4]에서는 초전도베어링의 동적계수를 규명하기 위한 실험적 결과를 보고하였으며, SUS wheel로 제작된 로터시스템에 대해 공기 중에서 10,000rpm까지 운전하여 초전도 플라이휠 에너지저장장치(high Tc superconductor flywheel energy storage system, 이하 HTC SFES)의 개발가능성을 제시하였다. 하지만 HTC SFES가 제대로 동작하기 위해서는 무엇보다도 그 정상 운전 속도 범위인 20,000~33,000rpm에서 동적 안정성이 확보되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 300Wh급으로 설계 제작된 HTC SFES의 구조를 설명하고, 시스템의 동특성 해석 결과 및 현재까지의 고속운전시험 결과를 정리하였다.

2. 플라이휠 에너지저장 장치

2.1 플라이휠 에너지저장장치

개발중인 고온초전도 플라이휠 에너지저장 장치는 무게가 약 27.71kg인 플라이휠 로터가 20,000~40,000 rpm의 회전속도로 운전함으로써, 가용에너지(usable energy)가 372 Wh 정도로 설계되어졌다. Fig. 1은 HTC SFES의 조립도를 개략적으로 나타낸 것이며, Fig. 2는 공기저항이나 열전달 등에 의한 에너지손실을 최소화하기 위해 진공 챔버 속에 조립되어진 HTC SFES의 사진을 보여주고 있다.

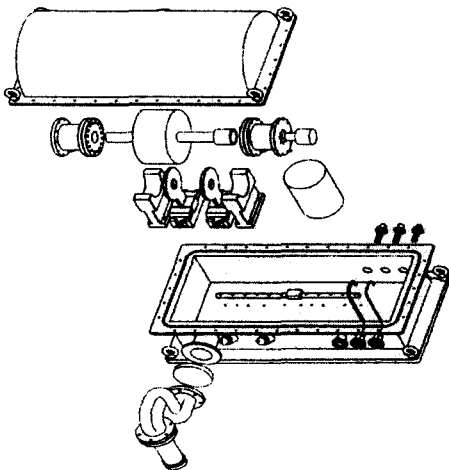


Fig. 1 Assembly of HTC SFES

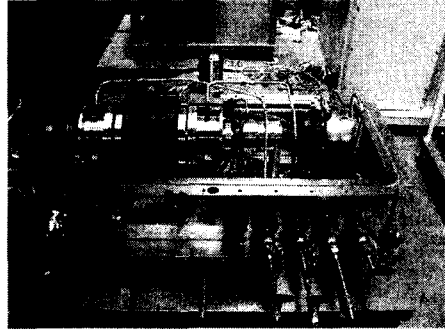


Fig.2 HTC SEFS

Fig. 1과 2에서 보는 바와 같이 HTC SFES는 복합재휠 로터, 초전도베어링, 전동발전기 및 제어장치, 보조베어링 및 수직위치조절장치, 액체질소용기, 냉각장치, 진동 및 각위치 검출센서, 진공챔버 및 펌프 등으로 구성된다.

2.2 플라이휠 로터

복합재휠의 주재료는 T800/2500이며, 복합재휠의 질량은 17.4kg, 길이는 160mm, 직경은 296mm, 극관성모멘트는 0.203kgm^2 , 횡관성모멘트는 0.139kgm^2 이다. 축의 주재료는 스테인레스강이며, 한쪽 끝에 전동발전기 로터가 부착되어진다. 플라이휠 로터의 총 무게는 27.71kg, 총길이는 550mm, 극관성모멘트는 0.211kgm^2 , 횡관성모멘트는 0.421kgm^2 이다. Fig. 3은 제작된 복합재휠의 사진이다.

베어링 위에 놓여지는 축의 구조는 원통형 자석이 NS/SN/NS의 순서로 배열되며, 축의 강도를 높이기 위하여 중심에 직경 15mm의 심(core)이 끼워지고, 축방향으로 2ton정도의 예압(pre-load)이 가해졌다.

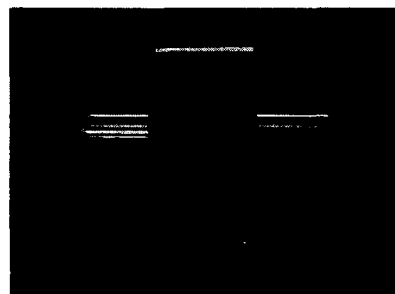


Fig. 3 Composite Flywheel rotor

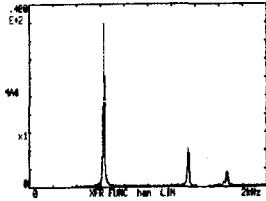


Fig. 4 FRF of the flywheel rotor

Fig. 4는 플라이휠 로터에 대해서 충격모드시험을 수행하여 얻은 FRF인데, 1차 굽힘 고유진동수가 625Hz(37,500cpm)으로 측정되어 33,000rpm까지 운전이 가능할 것으로 판단되나, 설계목표인 300Wh이상의 에너지를 충분히 저장시킬 수 있을 것으로 보인다.

2.3 초전도베어링

Fig. 5는 초전도베어링의 구조를 설명하기 위한 로터(회전자)와 베어링(고정자)의 단면도이다. 로터에서 중심축으로의 자속 경로를 없애고 발생된 자기장이 로터의 반경 방향으로 향하게 하여 고온초전도체와의 작용을 강화한 형태이다. 고온초전도체는 베어링의 원통 외주면을 따라 설치된다. 로터의 외경은 54mm, 베어링의 내경은 63mm, 베어링과 로터사이의 반경방향 간극은 4.5mm, 베어링의 길이는 77mm이다. Fig. 6은 제작된 초전도 베어링의 사진이다.

이전 논문[4]에서 초전도베어링의 정적 부하시험 및 충격가진시험 결과가 보고되었는

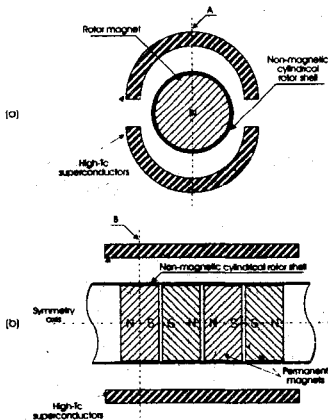


Fig. 5 Cross sections of a high-Tc superconducting bearing.

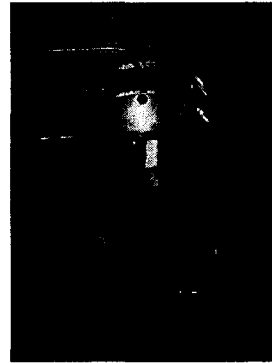


Fig. 6 Superconductor bearing

데, 강성치는 67,700N/m, 감쇠치는 29Ns/m이며 연성항은 아주 적은 것으로 밝혀졌다. 아울러 충격가진시험으로부터 로터-베어링 시스템은 10.75Hz(645cpm, 병진강체)과 21.25 Hz(1275cpm, 회전강체)에서 고유진동수를 가짐이 밝혀졌다.

2.4 보조베어링

HTC SFES의 작동중 과도진동에 의한 초전도베어링의 손상을 방지하고 과도한 에너지의 손실을 줄이기 위해 보조베어링(back-up bearing)을 설치하였다. Fig. 7은 곱판스프링 댐퍼가 장착된 보조베어링 단면도이다. 보조베어링의 내경은 60mm이며, 이 위치에서의 로터 외경은 56mm이고 반경방향 간극은 2mm이다. 보조베어링은 2E7N/m의 강성과 1000~2000Ns/m의 감쇠를 갖도록 설계되어졌다.

Fig. 8은 보조베어링 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이 이 보조베어링은 로터의 위치와 진동을 모니터링 하기 위한 근접 센서(gap sensor)가 부착이 되어지고, 자기베어링의 초기 냉각시 축의 초기위치 및 정적 처

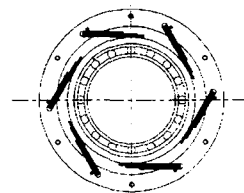


Fig. 7 Cross section of back-up bearing



Fig. 8 Back-up bearing

짐 위치를 진공 챔버 외부에서 핸들로 조절해 줄 수 있도록 하였다.

2.5 전동발전기

전동발전기는 회전체인 플라이휠을 구동하여 입력되는 전기에너지를 회전운동에너지 형태로 저장하였다가, 필요시에 전기에너지로 출력하여 사용하도록 하는 에너지변환장치이다. 비접촉식으로 전동 및 발전이 가능하도록 Fig. 9와 같이 4극 원통형 Halbach 배열형의 전동발전기 및 전력변환회로를 설계 제작하였는데, Fig. 10의 사진에서 보는 바와 같은 로터의 한쪽 끝단에 내전형(inner rotor type)으로 부착되어진다. 회전자의 외경은 44mm, 고정자의 내경은 53mm이며 그 반경방향 간극은 4.5mm이다.

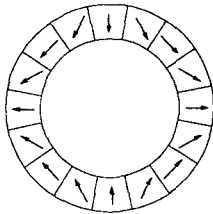


Fig. 9 Halbach array

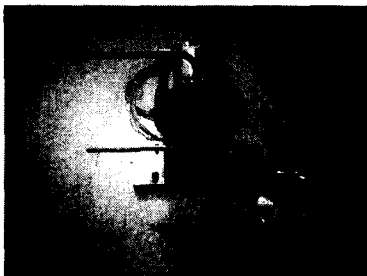


Fig. 10 Motor and generator

3. 플라이휠 로터의 동특성

3.1 플라이휠 로터의 고유진동해석

Fig. 11은 플라이휠 로터의 동특성을 계산하기 위한 유한요소 모델이다. 계산식은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$M\ddot{q}_k + (\Omega G + C)\dot{q}_k + Kq_k = F_k \quad (1)$$

이때 초전도베어링의 강성 및 감쇠치는 각각 67,700 N/m, 29Ns/m를 사용하였으며, 전 회전속도에서, 또 수직방향과 수평방향으로 동일한 값을 갖는다고 가정하였다.

Fig. 12는 undamped critical speed(UCS)를 계산한 그림이며, 그림에 표시한 바와 같이 K=67,700N/m일 때, 637.9cpm에서 1차 공진, 1,311.2cpm에서 2차 공진, 75,155.4cpm에서 3차 공진을 일으키게 될 것으로 예측되었다. Fig. 13은 이들 공진점에서 진동모드를 계산한 결과인데, 1차 공진모드는 강체 병진

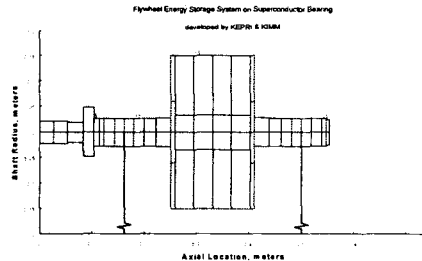


Fig. 11 FEM model of HTC SFES

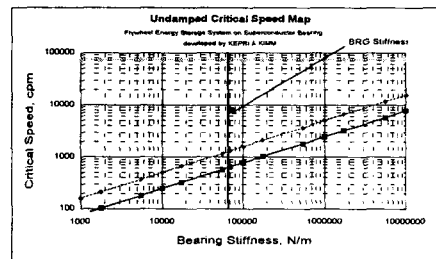


Fig. 12 Undamped critical speed map of HTC SFES



(a)1st mode (2)2nd mode (3)3rd mode

Fig. 13 Mode shape at K=67,700N/m

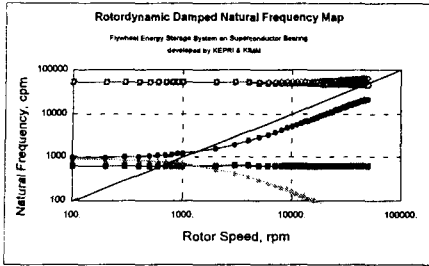


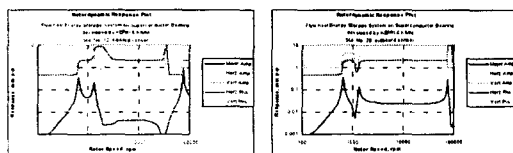
Fig. 14 Whirl natural frequency map of HTC SFES

모드이며, 2차 공진모드는 강제회전모드이며, 3차 공진모드는 1차 굽힘모드임을 확인할 수 있다. 따라서 HTC SFES는 1,500rpm 이하에서 2개의 강제 공진점을 통과하게 되며, 이후 75,000rpm까지 안정한 운전을 할 것으로 판단된다. 그러나 실제 로터는 여러 부분품들로 조립되어 있으므로, 앞 절의 실험결과와 같이 33,000rpm까지는 안정한 운전을 할 수 있을 것으로 판단된다.

이상에서 얻은 결과는, Fig. 14에 보여진 것과 같이 HTC SFES의 선회 고유진동수 해석(whirl natural frequency analysis)을 통해서도 확인할 수 있다. 이때 특히 2차 강제모드는 자이로스코픽 효과로 인해 회전속도에 따라 계속 커짐을 볼 수 있지만, 회전체의 임의의 운전지점에서 50% 이상의 안전율(margin)를 확보하고 있음을 볼 수 있다.

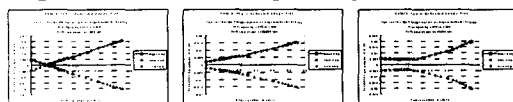
3.2 플라이휠 로터의 불평형응답해석

플라이휠의 고속운전 안전성을 확인해 보기 위하여 다양한 형태의 불평형 가진력에



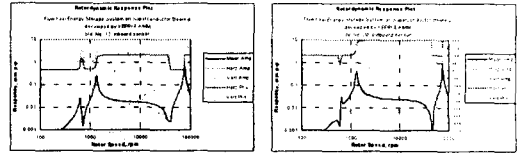
(a)inboard sensor (b)outboard sensor

Fig. 15 Unbalance response plot at case 1



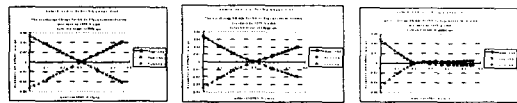
(a)2,000rpm (b)20,000rpm (c)40,000rpm

Fig. 16 Deflected shape at case 1



(a)inboard sensor (b)outboard sensor

Fig. 17 Unbalance response plot at case 2



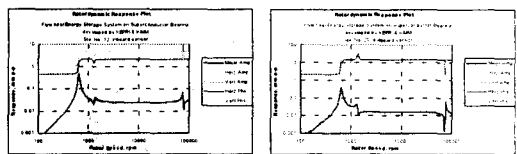
(a)2,000rpm (b)20,000rpm (c)40,000rpm

Fig. 18 Deflected shape at case 2

대하여 불평형응답을 확인해보았다.

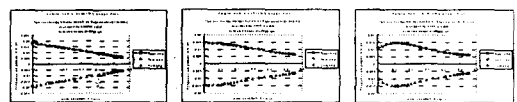
Fig. 15는 플라이휠 양단에 동위상으로 각각 143gmm(1000rpm에서 G1등급기준)의 불평형량을 부과하였을 때 양쪽 보조베어링에서의 불평형응답 곡선을 그린 것이며, Fig. 16은 이와 동일한 조건일 때 각각 (a)2000rpm, (b)10000rpm, (c)20000rpm에서의 변형곡선을 그린 것이다. 이때 모터 근처에 nodal point가 존재하며, 고속으로 가더라도 진폭이 더 이상 커지지 않고 안정해지고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 17은 플라이휠 양단에 역위상으로 각각 143gmm의 불평형량을 부과하였을 때 양쪽 보조베어링에서의 불평형응답 곡선을 그린 것이며, Fig. 18은 이 조건에서의 변형곡선을 그린 것이다. 이때 분명하게 conical 강제 mode가 가진이 되고 있으며, nodal point는 복합재휠 중간에 존재함을 확인할 수 있다.



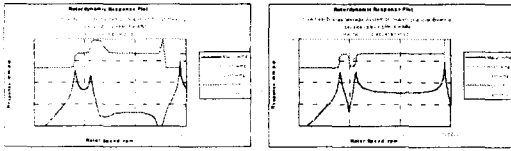
(a)inboard sensor (b)outboard sensor

Fig. 19 Unbalance response plot at case 3

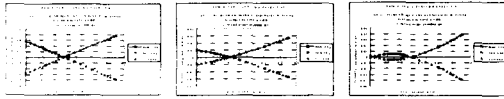


(a)2,000rpm (b)20,000rpm (c)40,000rpm

Fig. 20 Deflected shape at case 3



(a)inboard sensor: (b)outboard sensor
Fig. 21 Unbalance response plot at case 4



(a)2,000rpm (b)20,000rpm (c)40,000rpm
Fig. 22 Deflected shape at case 4

Fig. 19는 플라이휠 중간에 278gmm의 불평형량을, 모터쪽에 동위상으로 28gmm의 불평형량을 부과하였을 때 양쪽 보조베어링에서의 불평형응답 곡선을 그린 것이며, Fig. 20은 이 조건에서의 변형곡선을 그린 것이다. 이때는 병진모드가 현저하게 가진되고 있음을 볼 수 있으며 고속으로 가더라도 진폭이 더 이상 커지지 않고 안정한 운전을 하게 됨을 알 수 있다.

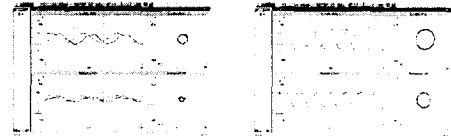
Fig. 21은 플라이휠 중간에 278gmm의 불평형량을, 모터쪽에 역위상으로 28gmm의 불평형량을 부과하였을 때 양쪽 보조베어링에서의 불평형응답 곡선을 그린 것이며, Fig. 22는 이 조건에서의 변형곡선을 그린 것이다. 이때는 분명하게 conical 강체 mode가 가진이 되고 있으며, nodal point는 모터측 베어링 근처에 있게 됨을 확인할 수 있다.

이상의 결과를 고찰하면, 전체 로터는 conical mode로 민감하게 가진이 되며, 30,000rpm 이상의 고속에서는 모터측 베어링 근처에서 굽힘 변형을 일으킴을 알 수 있다.

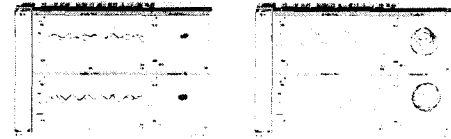
3.3 플라이휠 로터의 고속시험운전

HTC SFES의 동적 안정성을 확인하기 위하여 전체 시스템이 진공챔버에 조립된 상태에서 목표 회전수까지 시험운전을 시도하였으며, 최고 28,000rpm까지 운전이 성공하였다. Fig. 23은 각 회전수에 대하여 양쪽 보조베어링에 끼워진 근접센서(proximity probe)로부터 얻은 시간응답이다.

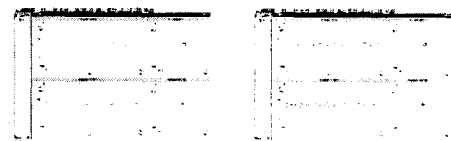
Fig. 23(a)의 300rpm에서는 초전도베어링의 자기불평형으로 인해 slow roll 현상이



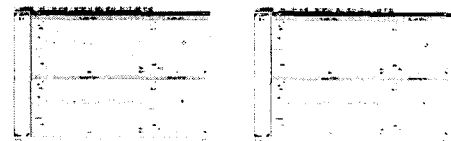
(a)at 300rpm (b)at 500rpm



(c)at 650rpm (d)at 1000rpm



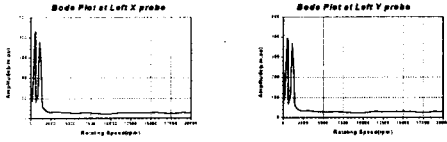
(e)at 1300rpm (f)at 2000rpm



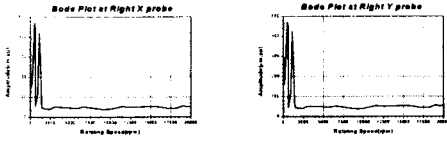
(g)at 10000rpm (h)at 20000rpm

Fig. 23 Dynamic response of HTC SFES

크게 일어나고 있음을 볼 수 있다. Fig. 23(b)의 500rpm에서 1차 병진 강체공진 현상이 나타나고 Fig. 23(c)와 같이 650rpm 근처에서 공진이 사라짐을 확인할 수 있었다. 비슷하게 Fig. 23(d)의 1,000rpm에서 2차 회전(conical) 강체공진 현상이 나타나고 Fig. 23(e)와 같이 1,300rpm 근처에서 공진이 사라짐을 확인할 수 있었다. Fig. 23(f)~(h)는 각각 2,000rpm, 10,000rpm, 20,000rpm에서 측정된 시간응답을 나타내는데, 2개의 강체공진(1300rpm) 이후 로터는 25 μm(peak)이하의 진폭을 유지하면서 28,000rpm까지 안정되게 운전됨을 확인하였다. 진동모드는 1차 공진 이전에는 병진모드로 운전되며, 2차 공진 이후부터는 conical 모드로 운전됨을 확인할 수 있으며, 전체적으로 모터측의 진폭이 그 반대측보다 더 큰 orbit 거동을 보인다. 상기의 결과는 Fig. 24과 같이 HTC SF



(a)Inboard X-probe (b)Inboard Y-probe



(c)Outboard X-probe (d)Outboard Y-probe

Fig. 24 Bode plot of HTC SFES

ES에 대한 Bode Plot을 통하여 확인해 볼 수 있었다. 그리고 20,000rpm 이후에 발전기 모드로 변환시켰을 때 전력이 발생함을 전구를 연결하여 확인해 보았다.

4. 결론

HTC SFES가 제대로 동작하기 위해서는 무엇보다도 그 정상 운전속도 범위인 20,000~33,000rpm에서 동적 안정성이 확보되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 300Wh급으로 설계 제작된 HTC SFES의 구조를 설명하고, 시스템의 동특성 해석 결과 및 현재까지의 고속운전시험 결과를 정리하였다.

- [1] HTC SFES는 복합재휠 로터, 초전도베어링, 전동발전기 및 제어장치, 보조베어링 및 수직위치조절장치, 액체질소용기, 냉각장치, 진동 및 각위치 검출센서, 진공 챔버 및 펌프 등으로 구성된다.
- [2] 초전도베어링은 27.71kg의 플라이휠 로터는 동적 상태에서 충분히 지지하며, 그 강성치는 67,700N/m, 감쇠치는 29Ns/m로 파악된다.
- [3] HTC SFES는 645rpm 및 1275rpm에서 2개의 강체 모드 공진을 통과할 것으로 예측되며, 강체 공진 모드 통과 대책으로 접관 스프링(leaf-spring) 형식의 보조베어링(back-up bearing)이 채용되었다.

[4] HTC SFES의 정상 운전속도 범위는 20,000~33,000rpm으로 예측된다. 현재 최고 28,000rpm까지 운전이 성공한 상태이며, 강체 공진 통과이후 약 25 μ m(peak) 이내의 진폭으로 conical mode로 운전됨을 확인하였다.

[5] 비접촉으로 운전되는 Halbach 배열형 전동발전기는 기계적 에너지와 전기적 에너지를 효율적으로 상호 변환시킴을 확인하였다.

[6] 상기 실험의 결과는 이론적 동적 예측결과와 잘 일치한다.

현재 모터의 전자기적 효과를 고려하여 시스템 안정성을 향상시키는 연구와 고속에서의 축의 굽힘 변형 및 파손에 대처하기 위한 연구가 계속되고 있으며, 조만간 HTC SFES의 개발이 완료될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] M.Komori, S.Matsuoka, and S.Fukata 'Development of a hybrid-type superconducting magnetic bearing System', Applied Superconductivity, Vol. 4, pp253~259, 1996.
- [2] M.Komori, A.Tsuruta, S.Fukata, T. Matsushita, 'Superconducting bearing systems using high Tc superconductors', IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.5, pp 634~637, 1995.
- [3] 김영철, 최상규, 성태현, 이준성, '초전도 베어링을 이용한 플라이휠 로터의 동특성', 한국소음진동공학회 '99추계학술대회논문집, pp417~423, 1999.
- [4] 김영철, 최상규, 성태현, 이준성, '초전도 베어링을 이용한 플라이휠 로터의 동특성', 한국소음진동공학회 '00춘계학술대회논문집, pp1071~1077, 2000.
- [5] 성태현외, '고임계 전류밀도를 갖는 고온 초전도 재료연구', 한국전력연구원 보고서, 2000. 9.