

초전도벌크를 이용한 초전도베어링 개발

한 상 철, 한 영 희, 정 년 호, 성 태 현
한전전력연구원 전략기술연구소 초전도그룹

1. 서 론

베어링은 모든 회전체 분야에서 핵심이 되는 기술이다. 일반적으로 회전체의 마찰을 최소화하고 기계적 마찰을 피하기 위해 오일을 쓰거나 공기를 불어넣는 방법을 취하고 있으나, 마찰을 최소화하기 위하여 가장 좋은 방법은 진공 속에서 접촉하지 않는 상태에서 도는 것이다. 기존의 무접촉 베어링은 자석의 같은 극끼리 반발하는 성질을 이용하여 개발되었으나, 위치를 고정시키기 위한 별도의 위치제어 시스템이 필요하므로 신뢰도를 확보하기가 어렵다. 또한 이를 작동시키기 위해 일정량의 전력이 소모되므로 효율이 낮다.

고온초전도체 개발 후 가장 관심을 받아 온 분야 중에 하나가, 고온초전도체와 영구자석 간의 자기부상력과 고정력을 이용하여 위치제어 시스템 없이 자석을 공중에 띄워서 회전시키는 베어링 분야에의 응용이었다.

초전도 베어링을 이용하여 물체를 회전시키면, 수만 rpm의 고속회전에서 회전체가 초전도 베어링과 일정 간격을 유지하면서 안정적으로 회전한다. 무접촉 베어링은 마찰이 없기 때문에 고효율 에너지 저장장치인 플라이휠 에너지 저장장치에 이용되어 부하평준화, 태양광·풍력발전 에너지의 저장, 무정전 전원공급 장치 등의 분야에 활용될 수 있다. 또한 원심분리기, 반도체 공정의 운반시설, 위성 망원경의 베어링 등에도 적용이 가능하다. 전력연구원에서는 세계 최초로 개발한 강한 부상력을 갖는 초전도 저어널베어링을 플라이휠 에너지 저장장치에 적용하여 새로운 형태의 수평축 플라이휠 에너지 저장장치를 개발함으로써 플라이휠 에너지 저장장치의 대용량화와 안정성 확보를 위한 돌파구를 제시하였다. 이미 이 기술은 국내외 특허로 등록된 바 있으나, 위에서 설명한 바와 같이 초전도 베어링의 폭넓은 용도 및 다양한 용량을 충족시키기 위하여 더 강한 부상력을 갖는 초전도

저어널 베어링을 개발할 필요성이 있다. 뿐만 아니라 수직축형에 사용되는 tm러스트 베어링에 대해서는 강한 부상력의 장점을 잘 살리고 안정성 문제를 해결해 나가는 방향으로 연구가 진행되고 있다. 이를 위하여 초전도체 제조, 자기장해석, 베어링 설계 및 특성 평가 기술을 단계적, 체계적으로 개발해 나갈 필요가 있다.

본 원고에서는 첨단 기술인 초전도 베어링 기술이 무엇이고 최적화되어가는 연구과정을 소개하도록 하겠다.

2. 초전도베어링 자기장 해석

초전도 베어링에 사용되는 초전도 단결정 개발은 이번호의 다른 원고에서 자세히 소개되어 지므로 여기서는 생략하도록 하겠다. 서론에서 잠시 거론했지만 초전도 베어링의 개발은 초전도-자석간 자기장 해석을 근간으로 다양한 형태의 초전도베어링 자기장해석을 통하여 강한 부상력의 초전도베어링을 개발하게 된다. 한발 더 나아가 경제성있는 베어링 개발을 위한 최적화연구결과를 가미하여 최적화된 초전도베어링을 개발하게 된다.

세라믹 고온초전도체는 극단적인 비가역적 제 2종 초전도체의 일종으로 볼 수 있다. 세라믹 고온초전도체의 자성체에 대한 자기부양은 단순한 자속 배척에 의한 척력 이외에 그 극단적인 비가역적 자화 특성에 의한 자속 고정력에 의해 발생한다. 그림 1(a)에서 1(d)까지는 이러한 초전도체에 자석을 가깝게 했다가 멀리 할 때 발생하는 힘을 단계적으로 설명한 그림이다.

그림 1(a)는 비가역적 자화특성을 가지는 제 2종 초전도체에 자석을 근접시킬 때 자기장의 분포와 발생하는 힘을 개략적으로 그린 것이다. 초전도체가 대부분의 자기장을 투과시키지 않음으로 초전도체와 자석 사이의 자속 밀도가 높아져 자기 압력에 의해 척력이

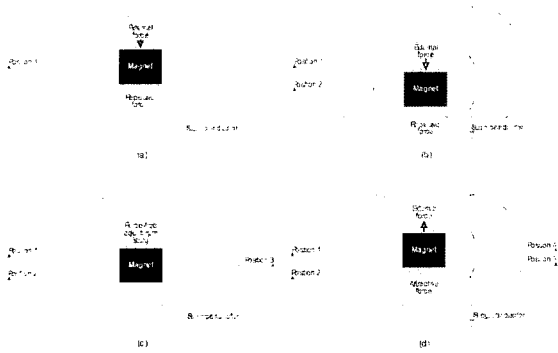


그림 1. 비가역적 자화 특성을 가지는 제 2종 초전도체와 자석 사이에 발생하는 자기장의 분포와 힘의 관계

발생하게 된다.

그림 1(b)는 자석을 2의 위치까지 더 근접시킨 경우이다. 이 경우 위에서 설명한 바 있는 자기 압력에 의해 초전도체 내부의 에너지가 낮은 곳에 일부 자속이 소용돌이의 형태로 침투하게 된다. 침투 중인 자속도 비가역적 과정에 있으므로 초전도체에 침투하지 못한 자속과 함께 자석과 초전도체 사이에 척력을 작용하여, 자석이 1의 위치에 있을 때 보다 더 강한 척력이 발생한다.

그림 1(c)는 2의 위치까지 이동시킨 자석에 가해주던 외력을 제거한 상태를 그린 것이다. 자석은 초전도체와의 척력에 의해 3의 위치까지 밀려 힘이 작용하지 않는 평형점에 도달하게 된다. 초전도체 내부에 고정되지 않은 자속에 의해서는 단지 척력이 작용하나, 초전도체 내부에 고정된 자속에 의해 자석이 이탈되지 않고 평형 위치에 탄력을 가지고 고정된다.

그림 1(d)는 평형 위치에 있던 자석을 4의 위치까지 당겨서 이동시킨 그림이다. 초전도체에 고정된 자속에 의해 자석과 초전도체 사이에는 인력이 발생한다. 자석과 초전도체가 멀어질수록 자석의 극면과 초전도체 사이 공간의 자기 에너지가 커지는 것으로 이러한 힘을 설명할 수 있다.

상기한 바와 같은 특징을 가지는 제 2종 초전도체가 자속을 배척하고 고정하는 등의 작용은, 반지 모양의 형태를 가지는 자속이, 초전도체가 제공하는 불균일한 위치 에너지의 공간에서, 외력 혹은 열적 운동에 의해 이동하고 속박되는 과정으로 쉽게 설명할 수 있

다. 이러한 관점에서 초전도체에 의한 자속 배척·고정은, 초전도체의 자속 배척을 유발하는 자속의 위치에너지 차이에 의한 것으로 볼 수 있다.

결과적으로, 비가역적 자화 특성을 가지는 제 2종 초전도체에 자속 고정이 일어났을 때, 자석은 모든 방향으로 음의 탄성계수를 가지고 고정되며, 이러한 특징이 바로 세라믹 고온초전도체를 이용한 안정적 자기부양의 원리이다.

자기부양의 용도로 가장 많이 사용되는 초전도체는 $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ 물질을 주성분으로 하는 덩어리 고온초전도체이다. 적절한 용융 응고법으로 제조한 이 물질은, 초전도 임계 자기장이 측정 한계를 넘을 정도로 크고 자속 고정력이 뛰어나, 자기부양의 용도로 매우 적합한 특성을 보인다. 현재 기술로 이러한 물질을 자기 이력에 의한 잔류 표면 자기장이 수 T 정도가 되도록 제조할 수 있는 반면에, 현재 사용되고 있는 희토류계 영구자석의 내부 자화는 1.4 T 이하이므로, 강한 자기부양을 위해서는 좋은 자화특성을 갖는 영구자석의 개발과 함께 부양체에 설치할 자석의 효율적인 배치가 중요하게 된다.

효율적인 자석의 배치를 위해서는 앞에서 나타난 자기력의 요소를 고려해야 한다. 자석이 위와 같은 특성의 초전도체에 자기 고정된 평형 위치에 있다는 것은, 초전도체 표면에 작용하는 자기력과 내부 응력을 포함한 힘이 내측, 외측에서 상쇄된 경우로 볼 수 있다. 여기서 자석을 δ 만큼 이동할 때 초전도체 내부의 자속 분포가 변하지 않는다고 가정하면, 초전도체 표면에 작용하는 힘은 자석 이동에 의한 외부 자기장 변화에 의한 것만큼만 변하게 된다. 앞에 보인 자기력의 식에서 선형적 자화 특성을 가지는 공간에서 임의의 면에 가해지는 수직, 수평 방향의 자기력을 다음과 같이 쓸 수 있으므로,

$$F_n = \frac{1}{2\mu} \int_A (B_n^2 - B_t^2) dA$$

$$F_t = \frac{1}{\mu} \int_A B_n B_t dA$$

평형 위치에서의 표면 외측의 자기장을 B_0 , 이동 후의 자기장을 B_δ 로 두면, 이동 후 초전도체 표면에 수직, 수평 방향으로의 힘은 아

래와 같이 얻을 수 있다.

$$F_{\delta,n} = \frac{1}{2\mu} \int_A [(B_{\delta,t}^2 - B_{0,t}^2) - (B_{\delta,n}^2 - B_{0,n}^2)] dA$$

$$F_{\delta,t} = \frac{1}{\mu} \int_A (B_{\delta,n} B_{\delta,t} - B_{0,n} B_{0,t}) dA$$

위에서 얻은 식에서, δ 만큼 자석을 이동하였을 때 초전도체 표면 외측의 자기장 강도의 변화가 클 경우 발생하는 자기력도 크다는 것을 알 수 있다. 실제로는 초전도체 내부 자속 분포의 변화도 고려해야 하나, 그러한 실제적인 상황에서도 자석의 이동에 따른 초전도체 표면에서의 자기장 강도의 변화가 클수록 더 강한 힘에 의한 자기 부양과 자기 고정 이 실현될 수 있음은 자명하다.

위에서 알아 본 초전도베어링의 원리를 생각할 때, 초전도베어링에서 회전자에 쓰이는 자성체가 발생시키는 자기장을 정성적으로 살펴보는 것이 베어링의 설계를 최적화하기 위한 하나의 접근 방법임을 알 수 있다. 물론 초전도베어링의 역학적 특성을 정량적으로 알아보기 위해서는 초전도체의 자기적 특성(flux pinning, flux creep 등)을 수치해석에 포함시켜야 하지만, 이러한 접근 방법은 현재로서는 매우 어렵다고 할 수 있다.

초전도체를 완전 반자성체로 두는 것은 적절한 계산치를 얻기엔 매우 부정확한 근사 방법이며, 이것으로는 근본적으로 초전도체 내부의 자속 고정(flux pinning)에 의한 효과를 계산할 수 없다. 초전도체에 Bean model 등을 사용하여 그 자성을 모사하는 방법은 많이 시도된 바 있고 현재에도 발전되고 있으나, 이러한 접근법은 수직축 스러스트 베어링의 자기장 외 냉각(zero-field cooling) 상태와 같은 단순한 모델에 대해서만 제한적으로 적용되고 있는 실정이다. 이러한 방법은, 복잡한 형태의 다양한 초전도베어링에 적용하거나, 자속 이탈(flux creep) 등의 동적인 특성을 계산하거나, 실제 고온초전도 벌크의 불균일한 특성을 모사하기에는 상당히 불완전한 것으로 보인다.

본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 초전도 베어링의 자기장해석을 수행하였다.

초전도체-자석간 힘의 관계는 동일한 초전도체를 기준으로 하여 외부의 자장에 따라 그 특성이 다르게 나타난다. 즉, 외부 자장에 대

표적으로 영향을 주는 요인인 영구자석의 크기나 영구자석의 배열에 의해 나타나는 자속 밀도에 따라 초전도체-자석간의 힘 관계가 달라진다. 모든 볼륨에 동일한 magnetization 이 일어나는 자석과는 달리 초전도 벌크는 외부의 자장이 균일하게 주어졌음에도 불구하고 초전도 벌크의 중앙부에서 최대 magnetization이 되는 특성을 가지고 있다. 다시 말해 초전도 벌크의 위치에 따라 다른 magnetization이 되는 것은 초전도 벌크의 중앙 쪽으로 갈수록 외부의 자장에 많은 영향을 받으며 가장자리에 갈수록 많은 자장이 들어와도 적은 양의 자화가 되는 것을 알 수 있다. 그림 2는 균일한 외부 자장이 초전도 벌크에 가해졌을 때 M이 가장자리에서 점점 증가하여 중앙부위에서 가장 최대치를 가지고 점점 가장자리에 갈수록 적어지는 현상을 보여주고 있다.

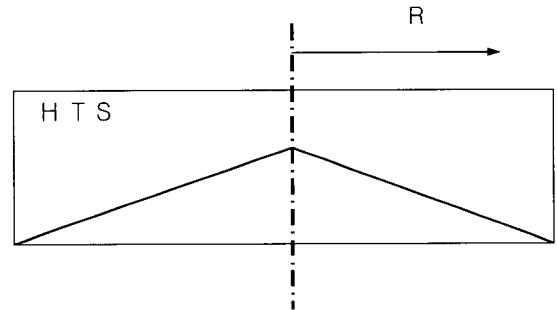


그림 2. 초전도체 자화특성 곡선

초전도체-자석간의 특성을 파악하기 위해 초전도체의 표면이 무한한 길이를 가지고 있다는 가정을 많이 이용하였으나 이는 초전도 벌크의 개수에 따라 달라지는 영향은 고려되지 않은 것이다. 또한 무한한 길이의 가정은 정해진 길이에 포함된 자석들의 여러 배열에 의해 달라지는 초전도 벌크 표면의 자속 밀도나 자속 밀도의 위상기울기를 통해 판단하였다.

이러한 이유로 초전도 베어링에 맞는 최적의 로터를 설계하기 위해서는 초전도 벌크의 자화특성을 적용하여야 한다. 여기서 로터의 최적 설계를 하기 위해 고려해야 할 점은 초전도 베어링에 포획되어있는 로터 자장의 크기와 방향성을 이용하여 로터의 회전성에 대해선 에너지 손실 없이 자유롭게 이동하여야 하나 초기 위치에 대한 x, y, z 성분의 이동에 대해선 에너지 손실은 매우 커 초기 위치

로 돌아오게 하는 힘이 강해야 한다. 즉, 초전도 베어링의 강한 강성을 부여해줘야 한다. 이런 이유로 초전도체 자화특성을 적용한 상태에서 초전도체 표면에 포획된 자속 밀도의 크기나 양의 비교가 아닌 포획된 자속 밀도가 외부자장에 의해 이동하였을 경우 발생하는 에너지 차를 정량적으로 비교함으로써 초전도 베어링에 강한 강성을 부여하는 최적의 로터를 설계할 수 있다.

외부 자장의 강제 이동에 따른 자속밀도의 에너지 차를 비교하기 위해 그림 3과 같이 초전도체의 자화특성을 포함하도록 두개의 초전도 벌크를 배열하였고 이때 가능한 3가지 자석 배열을 시도하였다. 자석 모델 2와 3은 3개의 영구 자석 배열을 이용하였을 경우 영구 자석의 착자 방향이 동일한 장소인 최대 자속 밀도가 나오는 장소를 초전도체의 중앙부와 그 외의 영역에 위치하여 비교하고자 하였다.

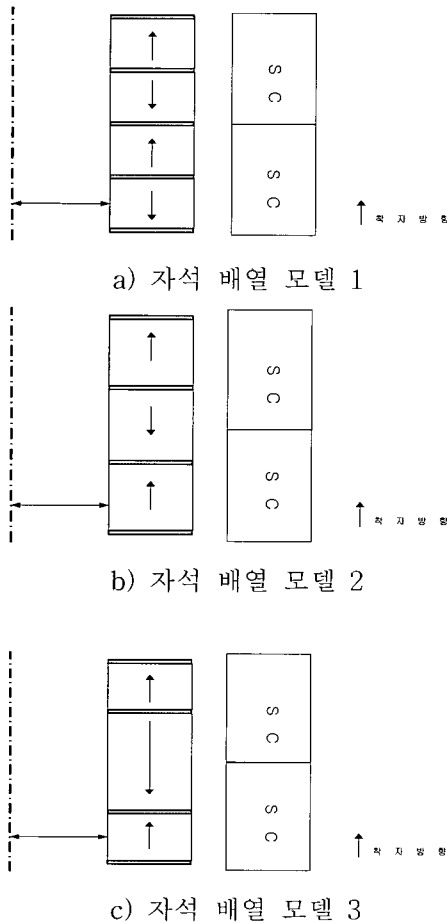


그림 3. 초전도 베어링의 세가지 자석 배열 모델

위의 3가지 경우에 사용된 자석 모델은 flywheel이 최대 운전 속도에서 견딜 수 있는 자석 모델이며 외, 내경 모두 동일하며 두께에 따른 경우로 구분하였다. 3가지 모델에 사용된 shim의 두께는 1 mm, 2 mm로 총 6가지 모델을 비교 검토하였다.

6가지의 모델에 적용된 field cooling distance는 모두 5 mm로 동일하다. 6가지 모델은 Maxwell 2D를 이용하여 자기장 해석을 하였고 그때의 초전도체 표면거리, field cooling distance 만큼 떨어진 거리에서의 자속 밀도, B_r , B_z 값을 구하였다. 외부 자장의 강제 이동에 따른 에너지 차를 정량적으로 비교하기 위해 B_r , B_z 값중 비교적 쉬운 B_z 성분의 차를 이용하여 로터의 성능을 비교하고자 한다. 초전도체 표면에서 구해진 B_z 값은 유한의 길이를 가지는 초전도체의 자화 특성을 적용하여 중앙부에서 나타나는 자속 밀도 성분을 모두 포획하고 가장 자리에서는 0의 값을 갖도록 하는 scale factor를 적용하였고 자석의 초기위치에 의해 초전도체 표면에서 포획된 자속 밀도의 분포가 외부자장의 강제 이동에 의해 dx 만큼 이동 되었을 때 자속밀도차를 ΔB 라 하였을 때 자속 밀도 분포의 면적 차는 $\int \Delta B dx$ 로 구할 수 있다.

위와 같은 방법으로 최적의 자석배열을 찾아낸다.

초전도 베어링의 설계함에 있어서 초전도 베어링의 강성을 계산하고 예측하기 위해선 초전도체-자석간 힘의 관계를 예측하는 것은 매우 필요한 실정이나 현재까지 제시되어온 초전도체-자석간 관계의 모델은 매우 복잡하고 어려운 실정으로 해를 구하는데 많은 어려움이 따르고 있어 보다 쉽게 해를 구할 수 있는 모델이 필요하다. 초전도 베어링의 강성을 수치해석 계산을 하기 위해 초전도체-자석간의 관계를 "Frozen Flux Model"을 이용하여 쉽게 파악하고자 한다.

Frozen flux model은 초전도체가 field cooling이 되면 초전도체 안에 가상의 영구 자석이 생성되는 개념으로 영구자석의 착자 방향과 동일한 극을 가지는 가상 자석과 반대 극을 가지는 가상자석이 초전도체 표면을 대칭으로 하는 위치에 생성되어진다. 첫 번째 가상자석은 영구자석의 반대극성을 가지며 영

구자석의 이동과 상관없이 그 위치에 고정되어져 영구자석의 이동에 따른 인력을 발생하게 된다. 영구자석과 동일한 극성을 가지는 두 번째 가상 자석의 초기 생성위치는 첫 번째와 동일하며 영구자석의 이동에 따라 초전도체 표면을 대칭으로 영구자석과 동일한 위치로 이동하는 특성을 나타내어 베어링의 축방향에 대한 영구자석의 이동에는 아무런 영향을 주지 않는다. 이러한 특성은 field cooling 된 위치를 항상 유지하고 벗어나지 않으려는 초전도체 특성을 잘 표현하고 있으며 그림 4에서 잘 표현하고 있다.

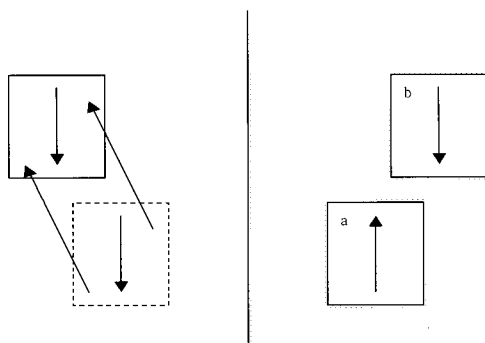


그림 4. Frozen image magnet model

축방향의 normal 방향에 대한 이동에 대해선 첫 번째 가상자석은 인력을 두 번째는 척력을 발생하여 두 가지 힘의 합을 이용하여 초전도 베어링의 강성을 예측할 수 있다. 축방향에 대한 초전도 베어링의 강성은 두 번째 가상자석이 영구자석의 이동시 초전도체 표면을 따라 움직이므로 첫 번째 가상자석과 영구자석간의 관계를 이용하여 구할 수 있다.

초전도체-자석간의 작용력 해석은 Maxwell 3D 수치해석 프로그램을 이용하여 두개의 가상 자석을 정자기력(Static Magnetic Force)을 계산하고 그 값의 차를 통해 작용력을 구할 수 있다. 본 모델은 초전도체가 영구자석을 100% 포획된 상태로 가정하였기에 초전도체-자석간의 작용력 예측에 필요한 보정치가 필요한데 이는 수치해석 결과와 실험치를 비교하여 구할 수 있다.

해석상 효율성을 높이기 위해 하나의 회전자와 원주방향으로 6개의 초전도체가 배열되어 있는 초전도 베어링 구성을 하나의 회전자와 하나의 초전도체간의 작용력을 해석하여 전체 초전도 베어링 모델로 확장하였다.

3. 초전도베어링 최적화 연구

초전도 베어링의 최적화는 2절에서 언급한 초전도 자석간 자기장해석 결과와 영구자석 베어링을 혼합한 하이브리드형 베어링을 통하여 이루어졌다. 회전손실, 자기이력 강성 등의 기초연구 자료를 근거로 소규모 초전도베어링을 설계 제작하여 이론치와 실험치를 비교분석하는 과정을 거치면서 최적설계가 이루어졌다. 그림 5는 소규모 초전도베어링이 장착된 소형플라이휠 시스템이다.

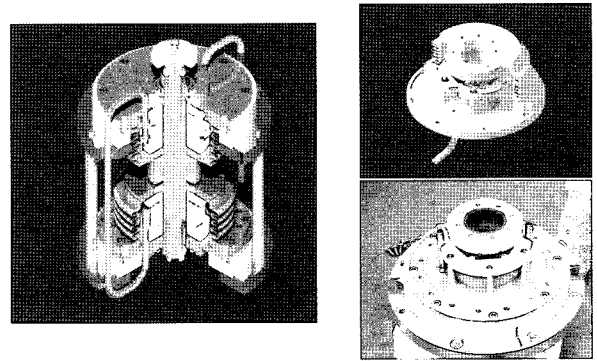


그림 5. 초전도 베어링을 이용한 소형 플라이휠 시스템

그림 6은 300Wh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치에 들어가는 초전도 베어링의 회전테스트 결과이다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 1000 rpm 정도에서 공진에 의해 진폭이 일시적으로 커졌다가 바로 진폭이 줄어들며 28,000 rpm 까지 매우 안정적인 회전을 보임을 알 수 있다. 특히 최대진폭이 25 μm 이하로 매우 작은 우수한 회전 특성을 보였다. 이러한 진동폭은 독일 지멘스의 50 μm 목표치를 이미 넘어섰고 미국과 일본의 진동폭 보다 월등히 우수한 특성을 달성한 것이다.

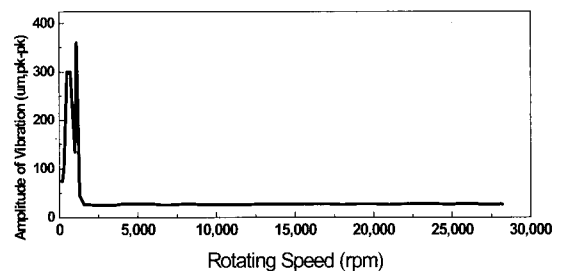


그림 6. 300Wh 초전도베어링의 회전 특성

4. 초전도베어링기술의 전망

회전하는 모든 산업기기에 고효율의 베어링 기술이 요구됨은 물론, 첨단산업 분야의 반도체 제조장비 중 터보펌프용 베어링을 비롯하여 소형 컴프레서용, 우주 산업에서의 인공위성 자세 제어용의 모멘텀 휠 등 고부가가치 산업 및 전력저장 분야에까지 고속 및 고효율의 베어링기술이 요구되고 있다.

고온초전도 베어링 기술은 초전도기술분야에 해당하는 기술로서 대표적인 응용분야인 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 핵심 기술이다. 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치는 3 부분으로 구성되어 있다. 초전도체와 영구자석으로 구성되어 있는 베어링, 회전에 의해 에너지를 저장하는 회전체와 에너지 변환을 위한 모터/발전기이다. 이 중 고온초전도 베어링 기술은 에너지 저장용량과 효율을 결정하는 핵심 기술이다. 따라서 초전도베어링기술은 초전도 플라이휠 에너지 저장기술의 전망과 맞물려서 가게 된다.

초전도 플라이휠 에너지 저장기술은 심야전력 이용, 대체에너지 이용 활성화, 지구온난화 완화를 위한 신규발전소 억제 등 경제·사회적으로 개발의 필요성이 많지만 기술적으로도 효율이 90%, 수명이 반영구적, 매우 높은 에너지 저장밀도, 대용량화시 기하급수적으로 좋아지는 경제성 때문에 에너지 저장시장의 높은 비율을 점유할 것으로 믿어 의심치 않는다. 따라서 앞으로도 지속적으로 플라이휠 에너지 저장장치와 관련된 핵심기술들이 개발되고 빠른 시간 안에 상용화 될 것으로 예상된다.

특히, 2005년 하반기부터 전력연구원이 개발에 착수하는 100 kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발은 전 세계적으로 처음 시도되는 개발로서 상용화, 표준화 등 많은 의미를 내포하고 있으며 한국이 초전도 플라이휠 에너지 저장기술을 선도하게 되는 중요한 계기가 될 것이다.

저자이력

한상철(韓相哲)

1966년 3월 26일생
1987년 고려대학교 공대 금속공학과 졸업, 1990년 KAIST 재료공학과 졸업(공학석사), 1995년 KAIST 재료공학과 졸업(공학박사) 현재 한전전력연구원 선임연구원



한영희(韓榮熙)

1965년 8월 1일생
1988년 서울대학교 공대 무기재료학과 졸업, 1990년 동 대학원 무기재료학과 졸업(공학석사) 현재 한전전력연구원 선임연구원



정년호(鄭年鎬)

1962년 11월 26일생
1990년 고려대학교 이과대 화학과 졸업, 1997년 동 대학원 환경 공학과 졸업(이학석사) 현재 한전전력연구원 선임연구원



성태현(成台鉉)

1959년 10월 9일생
1982년 한양대학교 공대 무기재료공학과 졸업, 1987년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사), 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(공학박사), 1991-92년 ISTEK 근무, 1992-95년 MIT Post. Doc. 현재 한전전력연구원 수석연구원

