

YBCO 고온 초전도체의 자기 부상력 및 에너지 저장응용

김 찬 중

한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀

Abstract - 용융공정으로 제조한 YBCO 고온 초전도체는 임계전류밀도가 높기 때문에 외부자장을 강력하게 반발한다. 영구자석과 YBCO 초전도체간의 부상력을 이용하면 무접촉으로 회전할 수 있는 베어링을 제작할 수 있다. 고온 초전도체 무접촉 베어링은 고에너지 효율의 플라이휠 에너지 저장장치에 활용된다. 초전도 베어링은 전자석을 이용한 자기 베어링에 비해, 위치 제어 시스템 없이 중량물을 공중에 띄워 회전시킬 수 있는 장점이 있다. 플라이휠 에너지 저장장치는 무공해의 환경 친화적인 기술로, 용량과 규모, 에너지 입출력 양과 시간을 조절하기 쉽다. 또한, 장소설정에 제한이 없으므로 에너지를 필요로 하는 장소에 자유롭게 설치할 수 있고, 에너지밀도가 다른 저장시스템에 비해 상대적으로 높다. 현재 선진 각국에서는 에너지의 효율적 저장 및 활용을 위해 고온 초전도체 베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치를 국가적 중점 사업으로 개발 중이며 2000년 초에 실용화될 전망이다. 본 논문에서는 고온 초전도체의 자기 부상력, 플라이휠 에너지 저장장치의 개념설계 및 개발동향에 대해 요약하였다.

1. 초전도체의 자기 부상력

1.1. 자기 부상력

초전도체를 초전도 임계온도 이하로 냉각시킨 후 영구자석 위에 올려놓으면 자석 위에 뜨게 된다. 이는 초전도체가 외부자장을 배척하는 Meissner 효과 때문이다. 1종 초전도체는 외부자장이 초전도체의 자기한계보다 작을 경우에만 Meissner 효과에 의해 부상하며 그 이상의 자력에서는 초전도성을 잃는다. 반면, 산화물 초전도체와 같은 2종 초전도체에는 두 개의 자력한계가 있다. 외부자장이 고온 초전도체의 1차 자력한계(H_{c1})보다 작을 때에는 Meissner 효과에

의해 부상하고 외부자장이 초전도체의 1차 자력한계(H_{c1})와 2차 자력한계(H_{c2}) 사이에 놓이면 초전도체 안으로 침투하여 속박된 자장과 Meissner 효과에 의해 초전도체가 부상한다. 초전도체에 속박된 자력에 의한 부상력은 Meissner 효과에 의한 부상력보다 상대적으로 크다. 초전도체의 부상력은 다음 식으로 주어진다[1].

$$F = m \frac{dH}{dx}, \quad m = MV, \quad M = AJ_c r \quad (1)$$

여기서 m 은 초전도체의 자기모멘트, M 은 단위 부피당 자화율, V 는 부피, A 는 시편의 형상에 의존하는 상수이며, J_c 는 임계전류밀도, r 은 차폐전류루프(shielding current loop)의 크기이다. 즉, 초전도체의 자기부상력을 향상시키려면, 단위 부피당 자화량 M 을 증가시켜야 한다. M 은 초전도체의 임계전류밀도와 차폐전류루프의 크기에 의존하므로, 초전도체의 플럭스 피닝과 초전도 결정립 크기를 증가시키면 부상력이 증가한다.



그림 1. 용융공정으로 제조한 YBCO 초전도체

용융공정으로 제조한 YBCO 초전도체 (그림 1 참조)는 결정립 크기가 수 cm 이상이며, 결정립 내에 많은 플럭스 고정점들이 많기 때문에 외부자장에 대한 부상력과 자기

속박력이 크다.

1.2. 냉각방법

초전도체내에 포획되는 자력분포는 초전도체를 냉각시키는 방법에 따라 달라진다. 초전도체의 임계전류밀도가 이상적으로 높을 경우에는 초전도체 내부로 침투하는 자력선의 양은 극히 제한된다. 초전도체를 자력이 없는 상태에서 냉각시킨 후, 냉각된 초전도체에 영구자석을 접근시키면 영구자석의 자력선 대부분은 초전도체의 자기차폐에 의해 반발된다.

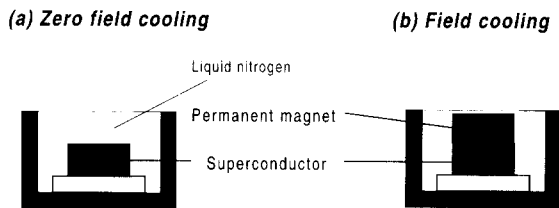


그림 2. 자력냉각과 무자력 냉각법

이런 냉각방법을 무자력냉각(zero field cooling)이라 한다(그림. 2a). 반면, 초전도체를 영구자석과 겹쳐놓고 냉각시키면 영구자석의 자력선이 초전도체 내부로 쉽게 침투한다 (자력냉각: field cooling, 그림. 2b). 이 경우 침투한 자력선의 대부분이 초전도체 내부에 저장된다. 각 경우에 대해 영구자석과 초전도체간의 거리-힘 곡선을 구하면 냉각방법에 따른 부상력 특성차이를 극명히 알 수 있다.

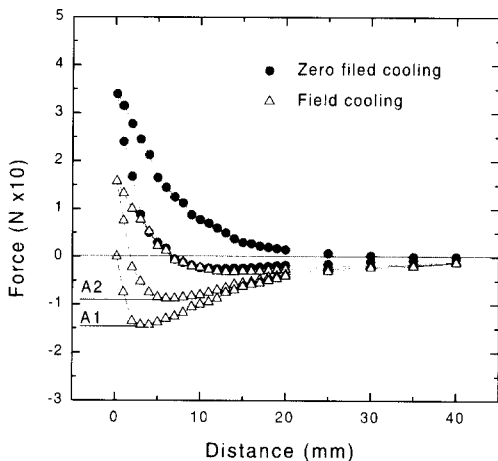


그림 3. 무자력냉각법과 자력 냉각법으로 냉각시킨 용융공정 다결정 YBCO 초전도체의 거리 - 힘곡선

그림 3은 YBCO 초전도체와 영구자석간의 거리-힘 곡선으로, 초전도체를 자력 냉각법과 무자력 냉각법으로 각각 냉각한 후 부상력을 측정 한 결과이다. 무자력 냉각의 경우 초전도체에 영구자석을 접근시키면 초전도체의 반발력은 거리에 반비로 증가한다. 다시 자석을 초전도체에서 멀리 이동시키면 반발력은 작아지면서 초전도체에 포획된 자력에 의한 인력성분이 나타나게 된다. 자력 냉각방법으로 초전도체를 냉각시키면 초전도체가 상대적으로 많은 자력을 속박한 상태가 되므로, 따라서 무자력 냉각법보다 인력성분이 큰 반면 반발력은 작다. 실험에 사용된 초전도체는 용융법으로 성장시킨 다결정 YBCO 시료로, 초전도체와 자석간의 간극이 1 mm, 3500 G 외부자장에 대해 약 5 kg의 반발력 보인다. 간단히 계산해서 100개 가량의 초전도체와 같은 수의 영구자석을 사용하면 약 1 mm 간격에서 500 kg 무게를 부상시킬 수 있음을 의미한다. 초전도체를 영구자석의 자장 하에서 냉각시키면, 초전도체내에 많은 자력을 속박시킬 수 있으므로 큰 인력성분을 얻게 된다. 인력성분이 크면 영구자석을 부착한 중량물을 초전도체 위의 특정 위치에 단단히 고정시킬 수 있으므로 회전 시 발생하는 원심력에 의한 중량물의 이탈이 방지된다.

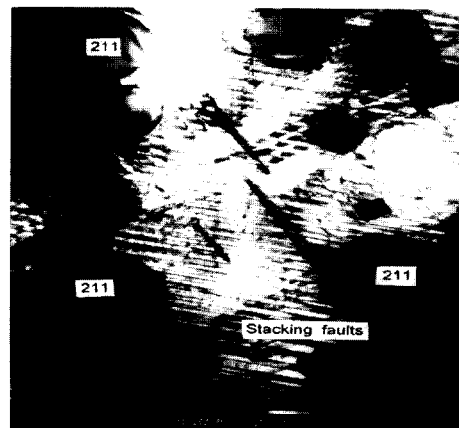


그림 4. 용융공정 YBCO의 투과전자 현미경 사진. 상전이에 의해 생성된 쌍정, 적층결함, 211, BaCeO₃ 등 플럭스 피닝과 관련있는 결함들이 관찰된다.

용융공정으로 제조한 YBCO 초전도체는 결정내에 전위, 적층결함, 개지물과 같은 플

재료 및 소자특성

릭스 고정점들이 많기 때문에 (그림 4 참조) 임계전류밀도가 높고, 결정립을 수 cm 까지 키울 수 있으므로 차폐전류루프의 크기가 크다. 따라서 다른 산화물 초전도체에 비해 자기 부상력이 크며 초전도체 안으로 침투한 외부자장을 쉽게 가두어 둘 수 있다. 초전도체의 부상력은 초전도체 내부에 포획된 자장과 외부자장(영구자석)의 자력크기에 비례한다. Meissner 효과에 의한 부상력은 물체를 밀쳐내는 단순한 반발력이지만 플럭스 피닝에 의한 부상력은 반발력과 인력의 두 성분의 조합이 된다. 초전도체내에 많은 자장을 속박시킬 수 있다면 초전도체를 영구자석으로 활용할 수 있다. 초전도체가 자석이 되면 영구자석 아래에 초전도체를 매달 수 있다. 그림 5는 영구자석 밑에 매달린 YBCO 초전도체를 보여주는 사진이다. 초전도체가 일정한 거리를 유지하며 영구자석 밑에 매달려 있다. 이는 초전도체내에 포획된 초전도체 위에 획된 인력성분과 반발력성분의 자력이 영구자석의 자력과 상호 작용하여 평형거리를 유지하기 때문이다.

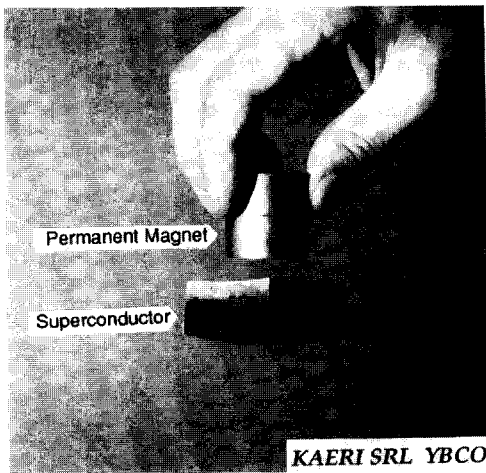


그림 5. 속박자력에 의해 영구자석 아래 매달린 YBCO 초전도체

1.3. 두께에 따른 부상력

제 2 종 고온초전도체에서 두께에 따른 부상력은 다음 식으로 주어진다[2].

$$F = \frac{4}{3} \frac{R^3 M H_d L}{Z^2} \quad (2)$$

이 식은 제 2 종 초전도체에서 자장의 침입깊이가 전 시편을 통과한다는 가정한 식

이다. 여기서 R은 자석의 반경, M은 자석의 자기모멘트, H_d 는 1 차임계 자기장, L은 초전도체의 두께, Z은 초전도체 표면으로부터의 자석높이이다. 초전도체의 자기 부상력이 식 (2)를 따른다면, 초전도체와 영구자석간에 상호 작용하는 힘의 세기는 시편의 두께(L)에 대하여 선형적으로 증가해야 한다.

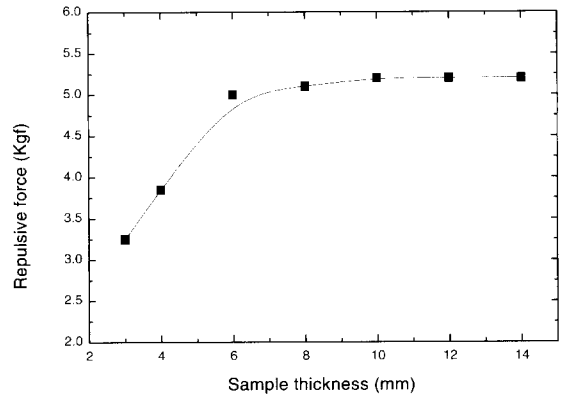


그림 6. 두께에 따른 YBCO 초전도체의 자기 부상력

그림 6은 종자결정법을 이용하여 c-축으로 성장시킨 높이 14 mm, 지름 40 mm YBCO 초전도체를 무자력냉각법으로 측정 한 후, 두께를 점진적으로 줄여 가면서 부상력을 측정한 결과이다. 두께가 14 mm에서 8 mm 까지 감소하더라도 거의 50 N 이상의 일정한 부상력을 보인다. 두께가 8 mm 보다 작으면 부상력은 두께 4 mm, 3 mm에서 각각 38 N과 32 N로 급격히 떨어진다. 용융공정으로 제조한 YBCO 초전도체의 부상력은 두께에 대해 선형적인 관계를 따르지 않고 비선형적으로 변한다. 이는 영구자석의 자속이 초전도체 시편의 전 두께를 통과하기보다는 외부자장 대해 일정한 침투 깊이를 갖기 때문인 것으로 생각된다. 외부자장의 침투깊이는 초전도체의 임계전류밀도와 외부자장의 크기에 비례할 것이다. 초전도체의 임계전류밀도가 높으면 자장이 초전도체로 침투하기 어렵고, 반대로 외부자장의 크기가 크면 자장이 초전도체로 깊이 침투하게 된다. 자장의 침투깊이는 초전도체의 전류밀도의 함수이므로, 임계전류밀도가 높은 초전도체를 사용하면 아주 얇은 판으로도 많은 중량을 띄울 수 있을 것이다. 현재 상용

되는 Nb-B-Fe 영구자석의 최대자력은 약 5000 G이다. 이 자석을 사용하여 초전도 베어링을 제작한다면 초전도 시료의 두께는 약 1 cm 정도로 만드는 것이 적절할 것으로 판단된다.

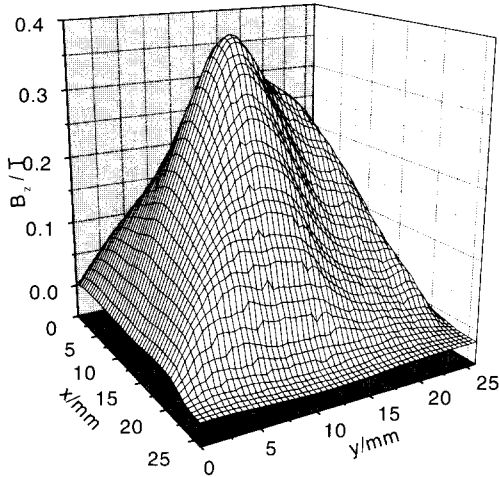


그림 7. 자력냉각법으로 냉각시킨 용융공정 단결정형 YBCO 초전도체의 표면 자력분포

1.4. 포획자력 분포도

그림 7은 0.4 T Nd-B-Fe 영구자석을 사용하여 자력 냉각법으로 냉각시킨 YBCO 초전도체의 표면 자력분포를 Hall probe로 분석한 결과이다. 시료는 성형체 위에 종자를 사용하여 용융공정으로 제조한 YBCO 초전도체로, 시편 상부면이 c-축에 수직하게 성장한 시편이었다. 초전도체 표면에 포획된 자력은 시편의 외곽에서 중앙으로 갈수록 가파르게 증가하며 중앙에서 최대자력 0.4 T을

보인다. 초전도체 표면에 포획된 자력은 영구자석의 자장에 대해 반대의 극성을 갖기 때문에 초전도체와 영구자석은 서로 잡아당기게 된다. 반면, 초전도체를 외부자장이 없는 상태에서 냉각시키면 자력이 포획되지 어렵기 때문에 반발력이 큰 대신 인력성분은 매우 작다. 자석과 초전도체간의 인력성분이 작용하면, 초전도 베어링 위에서 자석을 장착한 회전체를 고속으로 돌릴 때, 회전체에 작용하는 원심력에 의한 회전체의 이탈을 방지하게 된다. 자력냉각과 무자력 냉각을 적절히 잘 조화하면 초전도체 위에 다량의 무게를 이탈 없이 안정적으로 회전시킬 수 있다.

2. 고온 초전도 무접촉 베어링

2.1. 초전도 베어링

고온 초전도체를 이용한 무접촉 자기 베어링기술은 초전도체와 영구자석간의 자기부상력과 척력을 이용하여 중량물을 공중에 띄워 회전시키는 기술로써, 전력저장용 플라이휠, 기계구조물, 원심분리기, 고속카메라용 셔터, 반도체 공정의 운반시설 및 천체 관측용 망원경의 베어링 등 다양한 산업분야에 활용될 수 있다. 전자석-전자석이나 전자석-영구자석간의 자기 부상력을 이용한 기존의 베어링은 중량물의 위치 제어를 위한 별도의 시스템이 필요하며, 이를 연속적으로 가동시키려면 일정량의 전력이 소모된다. 반면 초전도체를 베어링으로 사용하면 위치제어시스템 없이도 회전체를 안정하게 회전시킬 수 있다.

그림 8은 초전도체위의 다양한 위치에



그림 8. 용융공정 YBCO 초전도체 위에 다양한 위치로 부상한 디스크형 영구자석들

재료 및 소자특집

부상시킨 영구자석의 사진이다. 자력 냉각법을 이용하면 초전도체위 임의의 위치에 영구자석을 띄울 수 있다. 초전도체에 포획되는 자력의 형상은 외부자장의 형상을 그대로 따르기 때문에 영구자석의 위치를 미리 정한 뒤 자력냉각법으로 초전도체를 냉각하면 그림과 같이 위치를 자유스럽게 바꿀 수 있다. 중량물을 띄우는 힘은 영구자석과 초전도체간의 자기 부상력, 회전체를 잡아주는 힘은 초전도체에 포획된 속박자력이 된다. 이 속박자력이 회전체를 잡아주게 되므로 원심력이나 진동으로 야기될 수 있는 회전체 이탈을 방지, 안정적인 회전상태를 유지하게 된다. 초전도 베어링을 이용하여 물체를 회전시키면, 수만 rpm의 고속회전에서 회전체가 초전도 베어링과 일정간격을 유지하면서 회전한다. 무접촉 베어링은 마찰이 없기 때문에 회전체의 구동 시 에너지 손실이 거의 없다. 이 점이 무접촉 초전도 베어링을 전기 에너지를 운동에너지로 바꾸어 저장하는 고효율 에너지 저장장치에 활용하는 이유이다.

2.2. 플라이휠 에너지저장

초전도체를 이용한 무접촉 자기베어링 기술의 응용분야 중 가장 주목을 끌고 있는 분야는 플라이휠 에너지 저장장치이다. 이 장치는 전력수용의 변화에 따라 발생하는 잉여전력을 운동에너지로 변환하여 저장한다. 전기수요는 12시간 단위를 기준으로 약 30% 정도의 차이가 발생하고 있으며 수요 절정기에는 더욱 큰 차이를 보인다[3]. 따라서 전력수급의 원활한 수급을 위해 저장효율이 우수한 전력저장장치의 개발이 필요하다. 전력을 저장하기 위한 에너지 저장장치는 대규모 에너지 저장능력, 기존의 송전 설비와의 호환성, 저렴한 비용, 환경 오염 방지, 그리고 높은 내구성 등을 갖추어야만 한다. 현재까지 개발된 에너지 저장기술은 화학전지, 양수발전, 초전도자석을 이용한 에너지 저장장치 등이 있다. 이 중, 화학전지는 수명에 제한이 있고, 폐기물의 독성이 심하여 대규모 시설에는 적합치 않다. 양수발전은 저장용량은 크지만 입지조건이 제한적이다. 초전도자석을 이용한 저장시스템은 액체 헬륨을 냉매로 사용하는 저온초전도자석을 사용하므로 냉각비용이 많이 들어 경제성

이 떨어진다. 반면, 무접촉 초전도 자기베어링을 이용한 플라이휠 장치의 장점은 전기발전 비용 절감, 에너지의 효율적인 저장과 환경오염의 최소화이다. 이외에도 응용범위가 광범위하며, 목적에 따라 용량과 규모를 조절할 수 있고, 에너지 입출력 양과 시간을 자유롭게 조절할 수 있다. 또한, 장소설정에 제한이 없으므로 에너지를 필요로 하는 장소에 자유롭게 설치할 수 있고, 에너지밀도가 상대적으로 높다. 플라이휠 에너지 저장장치는 전철의 전력저장, 컴퓨터에의 안정된 전류공급, 대용량설비 (핵융합 tokamak 등)에의 순간적 전력공급과 대규모의 잉여전력 저장 등에 사용될 수 있다.

2.3. 플라이휠 에너지 저장장치의 설계

고온초전도 베어링을 사용하는 플라이휠 에너지 저장장치는 3부분으로 구성되어 있다.

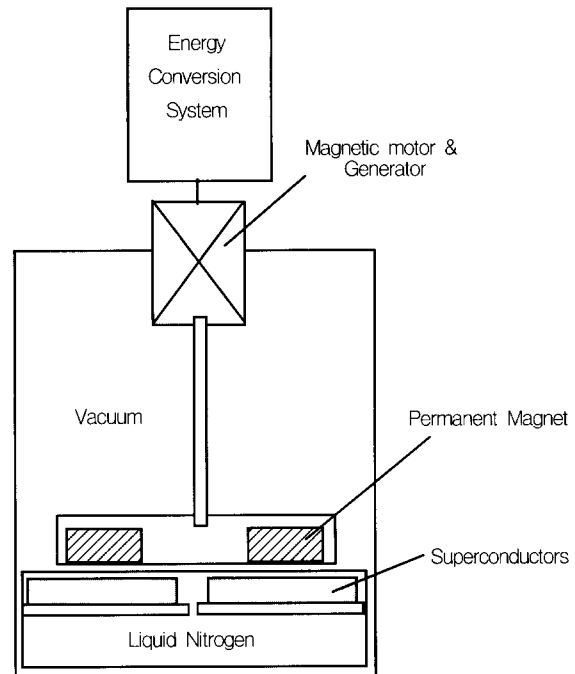


그림 9. 고온초전도체를 베어링으로 사용하는 플라이휠 에너지 저장장치의 개념도

초전도체와 영구자석을 내장한 디스크로 구성되어 있는 베어링부, 회전에 의해 운동 에너지를 발생시키는 회전체(rotor)와 구동과 에너지 변환을 위한 모터/발전기이다. 이외에도 공기마찰을 줄이기 위한 진공장치와, 초전도체를 냉각시키기 위한 냉각장치

등이 필요하다. 주요 구성부 중 영구자석과 초전도체로 구성된 고온초전도 무접촉 베어링이 에너지 저장효율을 결정하는 핵심 요소 기술이다. 초전도체 위에서 회전하는 회전체는 디스크형으로 제작되며 회전체의 밑면에 동심형의 영구자석을 부착하여 사용한다. 회전체에 부착된 영구자석의 자력이 마치 거울에 투영되는 것과 같이 동심형으로 초전도체에 포획된다. 회전체에 부착된 영구자석의 자력과 초전도체에 동심형으로 투영된 자력이 상호 작용하게 된다. 영구자석이 동심형이 아닐 경우에는 초전도체에 포획된 자력 분포가 비대칭이 되므로 회전체를 돌리기 어렵다. 내경 20 cm 이상의 영구자석은 일체형으로 제작이 어려우므로, 직경이 작은 자석은 일체형으로, 직경이 큰 자석은 여러 조각의 자석을 조립하여 동심형으로 연결한다 (그림 10 참조). 전자석을 베어링으로 사용하는 플라이휠 시스템은 전자석-영구자석간의 반발력을 이용하여 중량체를 공중에 띄운다. 이 시스템은 회전자의 위치제어를

위한 특수한 제어장치가 필요하다.

기계적 베어링이나 전자석-영구자석 베어링을 사용하여 에너지 저장시스템을 만들 경우 마찰과 제어장치 운전 등에 따른 에너지 효율 저하로 시간당 최소 1 %, 즉 하루에 저장된 에너지의 약 25 % 이상이 손실된다. 반면, 고온초전도체를 이용하여 무접촉 베어링을 만들 경우, 별도의 위치제어장치가 필요치 않고, 중량물이 초전도체 위의 공간에 고정되어 회전하는 무접촉 방식이므로 마찰에 의한 에너지 손실이 거의 없다. 기존의 자기베어링을 무접촉 초전도베어링으로 대체할 경우, 저장된 에너지의 손실율을 시간당 약 0.1 %, 즉 하루에 약 2 % 까지 낮출 수 있다[4]. 기타 초전도체를 냉각하기 위한 액체질소 소모 및 구동시스템의 전력소모를 고려하더라도 에너지 손실은 10 % 이하가 될 것으로 예상된다.

초전도베어링을 제외한 다른 구성부 설계기술, 플라이휠 형상, 재질, 구동, 전력변환 등은 기존의 전자석 베어링시스템 연구를 통해

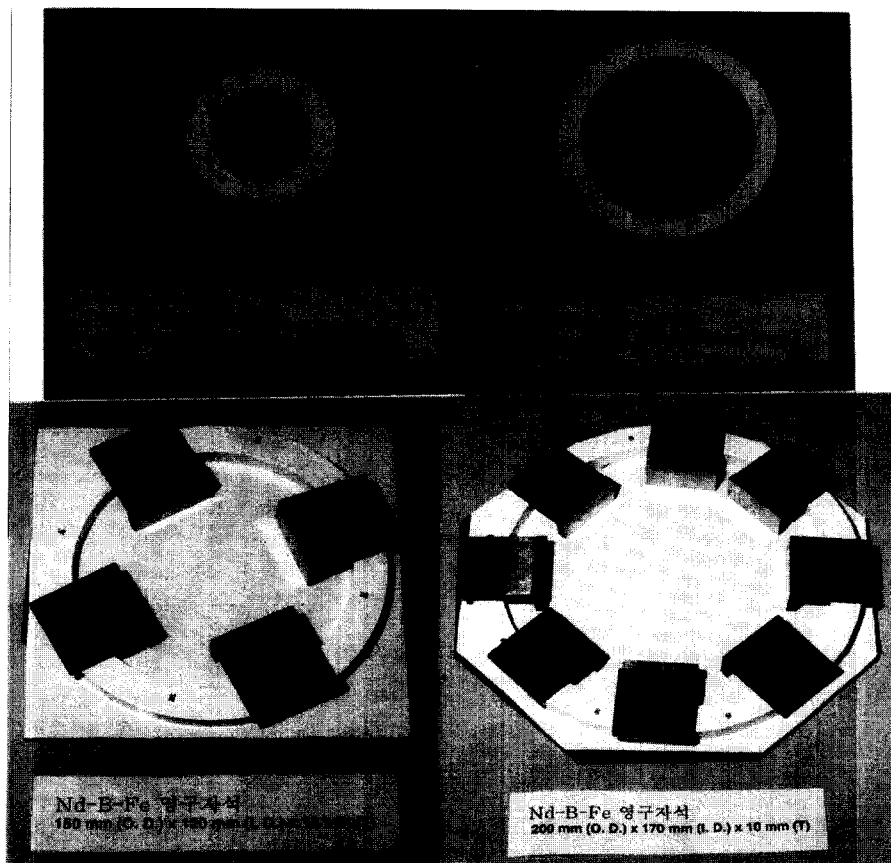


그림 10. 고리형 Nb-B-Fe 영구자석 assembly

재료 및 소자특집

많은 기술이 축적되어 있다. 이 기술들은 초전도체를 베어링으로 사용하는 에너지 저장시스템에도 그대로 활용할 수 있다. 에너지 저장효율을 결정하는 부분은 초전도 베어링이므로 효율이 높은 에너지 저장장치의 개발을 위해서는 강력한 자기 부상력을 갖는 고온 초전도체를 개발하여야 한다.

2.4. 에너지밀도 (Energy density)

플라이휠에 저장할 수 있는 운동에너지의 용량은 회전체의 중량과 각속도에 의해 결정된다. 단위 질량 (λ_m) 및 단위부피당 (λ_v)의 저장에너지는 다음과 같이 주어진다 [4].

$$\lambda_m = K_s \sigma_{\max} / \rho \quad (3)$$

$$\lambda_v = K_s \sigma_{\max} \quad (4)$$

여기서 K_s 와 σ_{\max} 는 각각 회전디스크의 지형인자와 최대 응력을 나타낸다. 이 식에 의하면, 단위질량 및 단위 부피당 저장에너지는 플라이휠의 재료와 모양에 의해 결정되며, 이는 회전체의 크기나 속도에 관계하지 않는다. 또 다른 인자는 회전자의 형상이다. 회전체의 형상에 따라 지형인자가 달라진다. 이상적인 등압구조를 가진 디스크의 경우 지형인자는 최대값인 1.0이다. 플라이휠의 에너지 밀도는 회전체 재료의 강도에 따라 결정된다. 에너지 밀도를 향상시키려면 플라이휠 재료로 저밀도, 고강도 재료의 사용이 필수적이다. 현재 개발된 섬유강화 복합재료들은 일반 금속재료 보다 에너지 밀도가 높다. 만약 밀도 1.6 t/m^3 , 최대 응력 1 GPa의 섬유강화재료(fiber reinforced plastic)를 사용하여 1 MWh(3.6 GJ)의 에너지를 저장할 경우 부피와 질량이 각각 6 m^3 , 10톤 규모의 플라이휠이 필요하다.

2.5. 총 에너지용량

플라이휠에 저장할 수 있는 총 운동 에너지의 양은 아래의 식으로 주어진다[4].

$$E = 0.25Mr^2w^2 \quad (5)$$

여기서 M은 회전판의 질량(kg), r은 반경(m), w는 각속도(rad/s)이다. 에너지

저장량은 회전판의 무게에 직선적으로 비례하고, 회전속도와 회전판 직경의 제곱에 비례한다. 회전체의 회전속도 한계는 회전체의 직경과 관계없이 회전 시 응력과 재료의 강도에 의해 결정된다. 현재 개발된 금속합금은 강도가 높고 밀도가 낮기 때문에 회전속도 한계가 수 백 m/sec에 불과한 반면, 고강도, 저밀도의 섬유 복합재료는 1000 m/sec 이상의 회전이 가능하다. 플라이휠의 저장에너지를 키우려면 직경이 큰 회전체를 사용하여야 하며, 이에 따라 회전체에 부착되는 영구자석도 직경이 큰 것을 사용해야 한다. 그러나 착화기 용량의 한계로 인해 커다란 자석을 한번에 착화하기 어렵다. 따라서 직경이 큰 영구자석을 제작하려면 여러 조각의 자석을 따로따로 착화시킨 후 다시 고리형으로 조립하여 사용하게 된다. 그러나 이 경우 자석 연결 부위에서 자장분포가 균일하지 않기 때문에, 이로 인해 rotor의 회전 시 저장 에너지가 손실된다. 연결부위에 다수의 판상형 자석을 엇갈리게 배열하면 자장 불균일을 최소화할 수 있다.

2.6. 저장 에너지 손실요인

플라이휠의 에너지 저장효율은 휠의 안정적 회전에 달려있다. 휠 회전 중 회전을 방해하는 요인들이 있으면 휠 속도가 감소하여 저장에너지가 손실된다. 플라이휠의 회전력을 감소시키는 원인으로는 영구자석의 불균일한 자장과 그에 따른 초전도체의 불균일 자화, 공기마찰, 영구자석과 플라이휠 금속물 사이에 발생하는 소용돌이 전류(eddy current)에 의한 손실 등이 있다. 영구자석의 균일하지 않은 자장과 공기마찰에 의한 감소는 회전속도에 대해 1차 함수로, 소용돌이 전류에 의한 손실은 2차 함수로 나타난다. 분자들간의 표면마찰과 소용돌이 전류에 의한 회전 억제력은 $7.6 \times 10^{-10} \text{ Nm}$ 였으며, 그 중 75%가 소용돌이 전류에 의해 발생하는 것으로 보고되었다 [5]. 얇은 철 끼움새를 영구자석 표면에 사용하여 자장을 균일하게 하여 주어 소용돌이 전류발생을 줄임으로써 플라이휠의 에너지 저장효율을 높일 수 있었다. 회전 시 공기마찰에 의해 회전자의 회전속도가 감소한다. 공기마찰에 의한 에너지 손실은 용기 내를 진공상태로 만들어 줌으로써 최소화할 수 있다. 전자석

을 베어링으로 사용한 플라이휠의 경우 회전력 감소로 인해 1 kg당 수 W의 전력이 소모되는 반면, 초전도 플라이휠의 경우 회전속도 2000 rpm에서 10^2 - 10^3 W가 소모된다고 한다 [6]. 플라이휠에서 자석의 자장 중심과 회전체의 무게중심이 어긋나 있을 경우 저속에서는 자장중심을 축으로 회전하는 반면 고속에서는 무게중심으로 회전축이 옮겨지므로 고속에서는 회전력이 급격히 감소한다. 5×10^{-1} torr 진공에서 초전도체와 자석간의 간격을 6 mm 유지시킨 다음 5500 rpm으로 회전시킨 결과 두 중심이 일치하지 않았을 경우 4 시간 후에 회전체가 정지했으나, 두 중심이 일치되었을 경우에는 10 시간 지속되었다 [7].

3. 국내외 연구동향

미국, 일본, 독일 등 선진국에서는 고온 초전도 무접촉 베어링을 사용하여 소형 플라이휠의 설계, 제작 및 성능실험을 완료하였고, 제 2 단계 목표로서 실용화를 위한 중형급 장치의 설계 및 제작이 진행 중이다 (그림 11 참조).

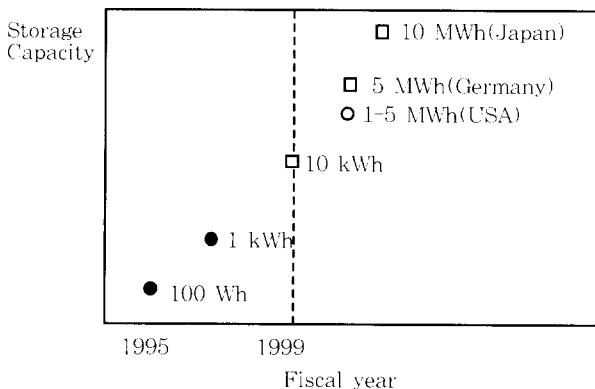


그림 11. 선진 각국의 고온 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 개념도

3.1. 일본

일본 초전도 공학 연구소에서는 고리형 영구자석을 부착한 직경 30 cm의 알루미늄 회전체를 33개의 YBCO 초전도체위에서 약 1 cm 부상시킨 후 분당 3600회의 속도로 회전시켜서 100 Wh의 전력을 저장하는데 성공하였다. 이 결과로부터 직경 3 m, 중량 500 kg의 원반을 회전시키면 10 kWh

의 전력을 안정하게 저장할 수 있을 것으로 계산되었다. 일본 Shikoku 전력회사와 Mitsubishi 전기에서는 직경 6.45 m, 무게 225 ton의 고합금 금속과 직경 6.7 m, 무게 103 ton의 탄소섬유강화 플라스틱을 이용하여 8 MWh의 저장능력을 가진 플라이휠을 설계 중에 있다. 이 경우 발생가능한 모든 손실을 고려할때 하루에 84%의 에너지 저장효율을 예상하고 있다.[41] 일본 신에너지 산업기술 총합연구기구는 1999년까지 10 kWh 급의 플라이휠 제작을 완료하고 2000년 이후에는 상용화 규모인 10 MWh 급 전력저장장치를 제작하여 기존의 납축전지 등의 전력저장장치를 대체할 예정이다 [8].

3.2. 미국

미국에서는 Commonwealth 전력과 Argonne 연구소가 공동으로 2 - 5 kWh의 전력 저장능력을 가진 초기단계의 플라이휠 에너지 저장장치를 초전도베어링을 사용하여 개발하였으며 (1995년), 1997부터는 1 - 5 MWh 용량의 에너지 저장장치를 개발 중이다. Texas 대학 초전도 연구팀에서는 플라이휠의 자기부상력과 안정성(stiffness)을 향상시키기 위해 2개의 초전도 베어링을 회전체의 상하부에 설치한 hybrid형의 초전도 베어링을 제작하였다.

상부에서는 초전도체와 영구자석사이 척력이 작용하고 하부에서는 척력이 작용하도록 설계함으로써 자기 부상력을 증가시켰다. 7×10^3 torr의 진공에서 19 kg의 회전체를 2000 rpm속도로 회전시킨 결과 시간당 에너지 손실은 5 % 미만인 것으로 보고되었다. 현재 에너지 효율을 향상시키고 저장에너지의 용량을 증가시키기 위한 연구가 진행중이다. 또한 Houston 대학은 NASA와 공동으로 천체 관측용 망원경(lunar telescope)을 초전도베어링을 이용해서 제작하는 연구를 수행중이다[9].

3.3. 독일

독일 원자력연구소에서는 용융공정으로 제조된 덩어리형 고온초전도체와 디스크형의 영구자석을 사용하여 초전도베어링을 제작하여 회전실험을 하였다. 마찰계수가 1×10^{-5} mbar의 진공에서 1.6×10^{-9} 이었던

재료 및 소자특집

며, 40 Hertz의 회전수에서 시간당 0.36%의 에너지 손실을 기록하였다. 또한, 중량 19 kg, 직경 30 cm의 회전체를 15,000 rpm으로 회전시켜 3.8 Wh의 전력을 저장하는데 성공하였다. 이후 직경 20 cm, 무게 10 kg의 회전체를 50,000 rpm의 속도로 회전시켜 총 에너지 용량 300 Wh, 출력 10 KVA의 플라이휠을 제작하였다. 1996년 현재 5 MWh 급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 개념설계를 완료하였다. 이 시스템은 0.5 MWh급 저장용량을 가지는 직경 3.5 m인 휠 10개를 수직으로 적층하는 방식으로 설계되었으며 총 중량은 30 ton이다[10]. 이 경우 베어링재료로 $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$ 크기의 YBCO 초전도체 수 천개가 필요할 것으로 예상된다.

3.4. 국내 연구동향

국내에서도 고온 초전도체를 베어링으로 사용한 플라이휠 에너지저장장치에 대한 연구가 1990년 중반부터 진행되어 왔다. 한국 원자력 연구소에서는 양 끝단에 영구자석을 장착한 길이 10 cm인 축형 무접촉 베어링을 제작하여 공기중에서 73,000 rpm의 회전속도를 기록하였다. 또한 지름 3.5

cm 두께 2.5 cm의 초전도체를 제작하여 수 kg 중량의 알루미늄 원반체를 부상하여 15,000 rpm 회전을 기록하였다. 1998년 직경 30 cm, 무게 15 kg의 알루미늄 회전디스크를 진공에서 회전시킬 수 있는 300 Wh급의 플라이휠 에너지 저장장치를 제작하였다 [11] (그림 12). 또한 전력연구원에서는 수평형 플라이휠 에너지 저장장치의 기본형을 제작하여 수백 rpm으로 회전시험을 한 바 있으며 [12], 현재 10 kWh급의 에너지 저장장치의 설계가 진행 중이다. 한국 기계연구원은 전자석을 베어링으로 이용한 300 Wh급 에너지 저장장치를 개발하였으며, 아주대학교 연세대학 기계공학과에서 각각 초전도베어링의 형상설계, 진동특성과 안정성을 연구 중이다. 서울대학교 충북대학교 전기공학과에서는 무접촉 회전, 발전코일 및 전력변환장치에 대한 기술을 보유하고 있다. 초전도 플라이휠 시스템의 핵심기술이라 할 수 있는 고온초전도 무접촉 자기베어링용 초전도체 제조에서는 세계적 수준의 기술을 보유하고 있다. 특히, 종자결정을 사용하여 초전도체의 방위 및 크기를 제어하는 대면적 초전도체 제조와 초전도결정 내부의 플럭스를 제어하는 미세조직 설계기술의 발



300 Wh 급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치

그림 12. 원자력 연구소에서 개발한 300 Wh급 플라이휠 에너지 저장장치. 고리형 영구자석을 장착한 직경 30 cm 회전체위에서 20Kgf 중량의 초등학생을 띄울 수 있다.

전으로 수백 kg의 중량을 부상할 수 있는 베어링제조기술을 확보하고 있다.

4. 시장 전망

지난 10여년간의 고온 초전도체 연구에 대한 지속적인 투자로 국내에서도 무접촉자기베어링에 사용되는 고온초전도체를 제조할 수 있게 되었고, 이에 따라 고온 초전도베어링을 이용한 전력장치의 실용화 연구가 진행 중이다. 고온초전도체를 이용한 플라이휠은 고효율의 전력저장 장치로서 환경보호 측면에서도 장점을 가지고 있으며, 단기간내 실용화될 것으로 판단된다. 미국과 일본은 고온초전도 플라이휠의 초기 실험단계 성능실험을 실시하여 실용화의 가능성을 확인하였고, 현재 2 단계 목표로서 중대형급 플라이휠을 설계 제작하는 단계에 도달했다. 현재 전력저장장치로 사용중인 납축전지는 전력저장효율이 70%이며 많은 공해물질이 배출된다. 반면, 플라이휠 에너지 저장장치는 저장효율이 90%로 상대적으로 높고 환경에 유해한 2차 폐기물을 발생시키지 않는다. 전력계통에서는 플라이휠 에너지 저장장치의 개발을 서두르고 있으며, 세계적으로 2000년 초에 상용화될 전망이다. 국내에서도 고온 초전도 무접촉 자기 베어링을 이용한 플라이휠 연구가 전력회사를 중심으로 활발히 전개될 것으로 예상된다. 현재 국내에서도 300 Wh급의 에너지 저장용 플라이휠 제작을 통해 전력변환기술 및 베어링 설계기술의 기초적인 연구결과를 확보하고 있다. 또한, 전력연구원에서 10 kWh 급의 중용량 시스템 연구가 진행 중이므로 지속적인 연구를 통해 시스템 전반에 대한 기술을 확보할 수 있을 것으로 예상된다.

고온초전도체 관련산업은 고부가가치 첨단 핵심산업이다. 현재 판매되고 있는 베어링용 초전도재료는 크기 3 x 3 x 3 cm³인 입방체 벌크의 가격은 100-200만원(Nippon Steel Co.)의 고가이다. 초전도 베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치를 상용화하려면 고온 초전도 베어링의 국산화가 필수적이다. 초전도 베어링 생산기술이 국산화된다면 현재 가격의 1/5 정도로 공급할 수 있을 것으로 예상된다. 초전도 플라이휠의 기술경쟁력을 확보하려면 에너지 저장효율을

높여야 하고, 이는 초전도체의 자기부상력과 베어링의 설계기술에 의해 좌우될 것이다. 상용화를 위해서는 수십 ton의 중량을 안정적으로 부상시킬 수 있는 강력한 초전도체가 필요하다. 현재 국내에서 개발된 초전도체는 방향성 성장길이가 수 cm 크기인 재료로, 단위면적당 자기 부상력이 40-50 N/cm²[13]로 세계적인 수준이다. 최근 10년간 축적된 고온 초전도체 제작기술을 기반으로 재료제조공정을 적정화하면 저렴한 값으로 우수한 특성의 초전도 베어링 재료를 생산할 수 있을 것으로 기대된다.

일본 등 선진 각국에서는 1999년까지 10 kWh 급의 플라이휠 제작을 완료하고 2000년 이후에는 상용화 규모인 10 MWh 급 전력저장장치를 제작할 예정이다 [8]. 국내의 경우도 초전도 베어링을 사용한 플라이휠 에너지 저장장치가 개발될 경우 영구자석, 초전도 베어링, 진공용기, 냉동기, 모터/발전기 등 수 백억원대의 관련산업이 창출될 전망이다.

전세계적으로 고온 초전도베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치는 2000년 이후에 시장이 형성될 전망이다. 응용분야는 디젤엔진과 건물 비상전원, 핵융합 실험의 순간 전력원, 양수발전의 대체, 전기자동차의 전원, 압축기 등 사용범위가 다양하다. 플라이휠 에너지 저장장치와 경쟁되는 분야는 납축전지(효율70%), 양수발전(60%), compressed air/gas(<50%), combustion turbine (50%) 등이다. 플라이휠 에너지 저장장치가 고효율 (90%), 무공해 환경친화적 장치인 점을 고려하면, 현재 이들이 차지하고 있는 시장의 대부분은 초전도베어링을 사용하는 플라이휠 에너지저장장치로 대체될 것으로 예상된다.

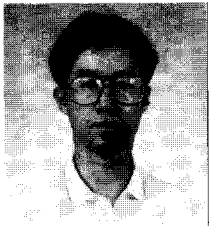
참고문헌

1. M. Murakami et al., Jpn. J. Appl. Phys., 29(11), L1991-L1994 (1990)
2. J. Wang et al., J. Am. Ceram. Soc. 72 (5), 846 (1989)
3. R. G. Abboud et al., The 56th Annual American Power Conference, Chicago, IL Apr. 27, (1994)
4. S. Nakamura, ISTEC Journal, vol. 6, No. 1 43 (1993)

재료 및 소자특집

5. Superconductor week, Vol. 9, no. 2 (1995)
6. H.Higasa, ISTEJ Journal, vol.7, No.1, (1994)
7. H.J.Bornemann, et.al., Applied Superconductivity, in print, (1994)
8. "高温超伝導 flywheel 電力貯藏研究開發," 新energy 産業技術 總聯合開發機構 7年次報告書
9. P. C. Chen et al., Proceeding of the TCSUH workshop in 1992 and Meltprocessed high-temperature superconductors, Edited by M.Murakami, (World Scientific) p. 315 (1992)
10. H.J.Bornemann and M.Sander, 1996 Appl. Supercond. Conf. Pittsburgh, PA, USA, Aug. 25-30, 1996.
11. "초전도체를 이용한 에너지 저장장치" KAERI report No. TR-503-95
12. "고임계전류밀도를 갖는 고온 초전도 재료 연구" 98전력연-단286 (1998)
13. Y. S. Lee et al., Korean J. of Mater. Res., vol. 8, No. 2 (1988)

저자이력



김찬중
1983년 성균관대학교 금속공학과(학사), 1986년 KAIST 재료공학과(석사), 1990년 KAIST 재료공학과(박사), 1992-93년 Notre Dame 대학 전기공학과(Post Doc.), 현재 한국원자력연구소 책임연구원