

## 고온초전도 플라이휠 에너지 저장기술



**한 상 철**  
(한전전력연구원 선임연구원)



**성 태 현**  
(한전전력연구원 책임연구원)

### 1. 머리말

플라이휠 에너지 저장시스템 (Flywheel energy storage system)은 입력되는 잉여 전기에너지를 플라이휠의 회전운동에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기에너지로 출력하는 장치로서 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 현재 선진 각국에서 연구 및 개발이 활발히 진행중인 고효율의 환경친화적 제품이다. 이 제품이 개발되면 산업용, 민수용 및 국방용 등의 다양한 용도, 즉 잉여 전력을 저장하기 위한 양수발전의 대체수단, 병원, 공장, 지하상가 등의 비상전원, 핵융합발전, 레일건 등의 펄스파워 발생용 보조전원, 고속전철, 전철의 회생전력 저장장치, 전기자동차 등 차세대 자동차의 보조 동력원에 사용되어 원가절감, 생산성 향상, 무공해 또는 저공해, 저연비 제품의 개발이라는 당면 과제의 해결에 기여할 수 있는 제품으로 부각되고 있다. 뿐만 아니라 유연성 (Flexibility), 분산형 (Site Efficiency), 그리고 첨단기술집약형 (Technology Intensiveness)의 미래지향적 에너지 저장시스템이기 때문에 고부가가치의 제품화 및 산업계로의 기술파급효과가 매우 큰 제품이다.

플라이휠 시스템은 양수발전, 압축공기 저장방식과 함께 기계적 에너지 저장방식의 일종으로 화학전지와 같이 소형화, 모듈화가 가능하여 흔히 기계전지 (Electro-mechanical

Battery) 또는 플라이휠 전지 (Flywheel Battery)라고 불리우며 입력되는 잉여 전기에너지를 플라이휠의 회전운동에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기에너지로 출력하는 장치로서 크게 에너지저장을 위한 플라이휠 로터, 공기마찰을 줄이기 위한 진공 시스템, 지지부 접촉마찰로 인한 에너지 손실 저감용 베어링, 플라이휠 구동 및 발전을 위한 Motor/generator, 그리고 고효율 에너지 입출력 제어부로 구성되어 있다.

한편, 플라이휠 기술의 응용분야 중 전력기술에서는 위에서 언급한 장점들을 추구하는 것 이외에도, 회전시에 필연적으로 발생할 에너지 손실을 최소화하는 것이 필수적인 요소 기술로서 매우 중요하다. 이러한 기술은 한마디로 회전부와 고정부의 기계적 접촉을 배제하는 무접촉 베어링 기술로서, 전자석을 이용하여 회전체의 위치를 능동적으로 제어하는 자기 베어링과 고온초전도 벌크를 이용하는 초전도 베어링으로 크게 나눌 수 있다.

능동 자기 베어링은 대부분의 정·동적 특성을 임의로 조절할 수 있다는 장점이 있는 반면, 가동시에 계속적으로 전력이 소모되고 별도의 제어 장치가 필요하며 급작스런 고장 발생에 대비해 신뢰성을 확보하기 위해서는 제어 모듈을 중복적으로 설치해야 하는 등의 약점이 있다. 한편, 초전도 베어링은 고온초전도체의 냉각 상태에 의해 베어링이 작동되므

로 신뢰성이 매우 높고 제어 장치가 필요 없으며 초전도체의 냉각 유지에 필요한 정도의 에너지만 소모된다는 장점이 있으나, 베어링의 강성, 감쇠력 등을 임의로 조절하기가 매우 어렵다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 이 두 베어링을 병용하는 방식이 플라이휠 에너지 저장장치에 사용되는 베어링 기술 개발의 주류를 이루고 있다.

이 글에서는 여러 방향으로 진행되고 있는 플라이휠 에너지 저장장치와 베어링 기술 개발 그리고 전력연구원에서 연구 중인 초전도 플라이휠 에너지 저장기술에 대해 간략히 소개하고자 한다.

## 2. 고온초전도 베어링의 특징

고온초전도체가 개발되기 전까지 초전도체의 응용은 전적으로 거시적 양자효과와 전기수송능력을 이용하는 것에 국한되어 있었고, 낮은 임계자기장으로 인해 그 전기수송능력 또한 제한되고 있었다. 고온초전도체의 개발 이후, 기존 초전도체의 거의 모든 응용처를 고온초전도체로 대체하는 연구들이 성과를 보이고 있다는 것 외에도, 고온초전도체의 열적 안정성, 높은 임계자기장, 높은 임계온도 등 많은 장점을 이용하는 새로운 응용 분야들이 탄생되었다. 고온초전도체의 자속 배척, 자속 포획력을 이용하는 자기부양기술도 그 중 하나이다. 고온초전도를 이용하는 자기부양기술 중에는 고온초전도 선재로 제작하는 초전도 전자석 기술도 포함되지만 여기에서는 벌크 형태의 응용만을 다루고자 한다.

고온초전도 재료 중 자기부양기술에 벌크의 형태로 이용되는 것은 주로 YBCO 재료인데, YBCO가 BSCCO 등에 비해 초전도 질서도의 2차원성이 약하다는 것, 즉 고온초전도 재료 내부에 층상 구조에 의해 근원적으로 존재하는 결합(intrinsic junction)이 강하여 초전도체 내부에서 자기장의 국소화를 강하게 한다는 것이 벌크 자기부양 응용을 돕는 중요한 특징이라고 본다. 고온초전도 자기부양 연구 초기에는 YBCO 외에 BSCCO, TBCCO 등 여러 재료에 대한 검토가 있었고[1], YBCO 재료를 부도체 모재(matrix)와 섞어 성형하기도 하였다[2]. 그러나 이후 종자결정법 등의 용융공정에 의해 YBCO 단결정이 제작된 이후에는 YBCO의 특징점이 부각되고, 경제적으로 대면적 단결정을 제작하는 공정에 대한 연구와, 인위적으로 자속 고정력을 향상시키기 위한 연구가 계속되고 있다.

종자결정성장법은 가장 간단하게 Y123 단결정을 제조하는 방법이다. 이 방법은 Y123 성형체위에 그보다 녹는점이 높은 결정을 종자를 올려놓고 용융공정에서와 같은 방법으로 열처리함으로써 종자의 결정 방위와 같은 방향을 갖는 Y123 단결정을 제조하는 것이다. 종자로서는 보통 Y123보다 녹는점이 높고 격자상수가 비슷한 Sm123나 Nd123 단결정이

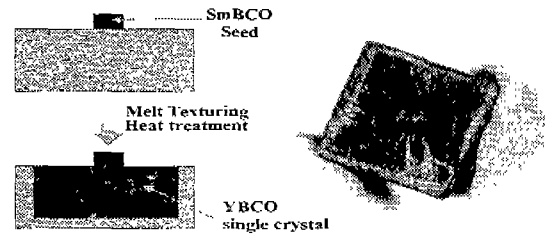


그림 1. 종자결정성장법으로 제조된 YBCO 초전도 단결정.  
(YBCO single crystal fabricated by top seed melt growth method.)

사용된다. Y123 성형체를 (Y211 + 액상) 상태로 용융시키더라도 종자는 용융되지 않고 남아 있다가, 이어서 서냉하거나 또는 과냉각하는 과정에서 Y123 결정이 종자로부터 핵생성되어 단결정으로 자라난다. 이렇게 자라난 단결정은 크기가 수 cm에 이르며 강력한 자기부상력을 나타낸다. 그림 8은 TSMG 방법으로 만든 단결정 Y123 시편을 위에서 본 모습이다. 사각형 모양의 Y123 단결정이 성장된 모습을 보여준다.

고온초전도 베어링은 일반적으로 영구자석을 포함하는 회전자와 고온초전도 벌크로 구성된 고정자로 이루어진다. 회전자를 평형 위치에 두고 고온초전도체를 냉각시킴으로써 회전자에서 발생한 자속이 고온초전도체 내부에 일부 고정되어, 회전자가 평형 위치에서 이동할 경우 발생하는 복원력으로 베어링으로서의 역할을 하게 된다.

고온초전도 벌크의 베어링 고정자로서의 성능은, 자속을 내부에 포획시켜 사용하든 반자성에 의한 자속 배척을 이용하는 어느 경우에 대해서나 초전도체의 자기장 포획 능력으로써 평가할 수 있다. 고온초전도 벌크의 최대 포획자장을 증가시키는 방법은 위에서 언급한 바와 같이 단결정을 대면적화 하는 방법과 내부 미세구조 등을 인위적으로 조절하여 자속 고정력을 향상시키는 방법이 있다. 이 중 대면적화에 의한 효과는 외부에서 제공되는 자기장이 충분히 강할 경우 최대 포획자장이 단결정의 최소 반경에 비례하며, 이러한 경우 발생될 수 있는 자기력도 초전도체의 총 면적이 같을 때 단결정의 반경에 비례하게 되는 것으로 설명할 수 있다. 단 유의해야 할 점은, 초전도체를 2차원적으로 볼 때 초전도체 내부 한 지점의 자속 포획량은 자기장에 수직 방향인 초전도체 외부의 비 초전도 영역과의 거리에 따라 결정된다는 것이다. 또한 비 초전도 영역이 초전도 영역의 내부에 존재할 경우에는 형상기하적인(topological) 이유로 이를 내부의 자속 밀도가 균일한 하나의 큰 자속 고정점으로 보아야 할 것이다. 최근 국내에서도 진행되고 있는 다중 종자에 의한 대면적 결정성장 연구도 위와 같은 특성을 잘 이용하여 좋은 결

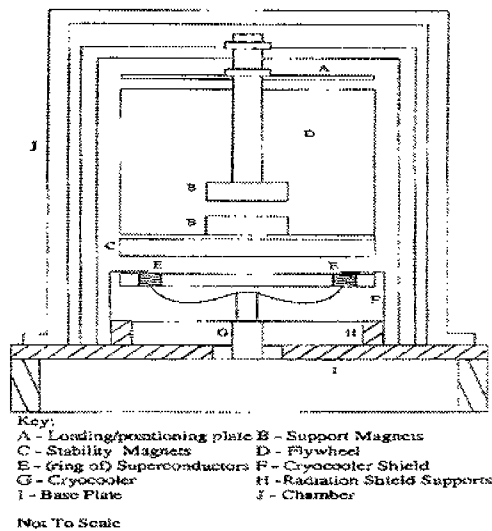


그림 2. 베어링 고정자에 영구자석과 고온초전도체를 병용하여 제작한 수직축형 플라이휠 장치.  
 (A schematic of the vertical axle type superconductor flywheel energy storage device.)

과가 나올 수 있을 것이라고 기대된다.

한편, 고온초전도체의 자속 고정력 향상에 의한 효과는 작은 반경의 단결정에서도 더 높은 포화자장을 얻을 수 있다는 것으로, 특히 베어링 회전자 자기장의 비대칭성과 회전자의 진동 등에 의해 발생하는 자기장 변화에 의한 초전도체 내부의 자속 이동을 줄여 베어링의 특성을 더 좋게 할 수 있다는 점이다. 초전도체 내부의 자속 이동은 초전도체 내에서 발생하는 비가역 손실(hysteresis loss), 회전자의 평형위치이동(levitation drift) 등을 유발시킨다. Hikihara와 Moon은 고온초전도체의 비가역 자화 특성에 의해 발생한 초전도 베어링의 혼돈적(chaotic) 동특성을 측정 분석한 바 있다[3]. 또, Hikihara 등은 중량 456 g의 시험용 회전체를 MPMG-YBCO 위에서 회전시켜 평형위치이동 측정을 한 바 있다[4]. 이 실험의 결과를 참고하여 현실적인 플라이휠 베어링에 대해 유추하기엔 미흡한 점이 많으나, 최근에 제조되고 있는 고품질의 단결정들은 상당히 강한 자속 고정력을 가지고 있어 플라이휠 베어링에 적절하게 사용 가능하리라 본다. 그림 2는 Coombs 등이 제작한 플라이휠 장치의 개략도이다[5]. 이것은 베어링 고정자에 영구자석을 사용하여 회전자 자석과의 인력으로 대부분의 정하중(static load)을 담당하게 하고 고정자 고온초전도체로 고정력을 발휘하도록 한 것으로, 축 방향으로의 평형위치이동을 줄임과 동시에 초전도 베어링에서 발생하는 여러 종류의 회전 손실을 줄이기 위한 구성이다.

고온초전도 베어링에서 회전자 영구자석으로는 주로 Nd-B-Fe 자석을 사용한다. 이 종류의 자석은 잔류자속밀도(Br)가 1.1~1.3 T 정도이고, 보자력(Hc)은 상온에서 14 kOe 정도이며 온도 변화에 따른 보자력의 변화도 커서 -40°C 정도에서 24 kOe에 달하게 된다. 그러나 이 자석으로 이루어진 일반적인 베어링 회전자에서 고정자 고온초전도체에 가하는 자기장은 자기 저항(magnetic reluctance)에 의한 감자 효과로 인해 수천 가우스 정도로 한정되게 된다. 이 정도의 자기장은 단결정 YBCO의 성능 한계에 못 미치므로 고온초전도 베어링의 하중 지지력과 강성을 제한하는 큰 요인이 되고 있다. 따라서 영구자석의 자속 경로를 효율적으로 구성하여 초전도체에 가해지는 자기장을 강화하는 방안이 여러모로 고안되었다. 이 방안들은 대체적으로 자석의 극 배열을 조정하여 자기장과 고온초전도체와의 상호 작용을 극대화하는 방법과, 자속 경로를 강자성체로 구성하여 자기 저항을 줄이는 방법을 혼합한 것으로, 적용 대상인 플라이휠 장치의 구성에 따라 다양함을 보인다.

회전자 영구자석은 고온초전도 베어링의 회전 손실의 가장 많은 부분을 차지하는 또다른 문제점을 가지고 있다. 이것은 회전 방향으로 자기장이 불균일하게 발생하는 문제이다. 이로 인해 회전자가 고속으로 회전할 때 고정자의 전도체 부분에서 와전류 손실이 발생하고, 고온초전도체에서는 비가역 손실이 발생하는데, 후자는 단결정 품질의 개선을 통해 많이 감소되고 있는 실정이다. 이 문제를 해결하기 위해서 회전자의 자석을 회전 방향에 대해 소형의 단일체로 제작하거나, 자석의 고정자 방향에 강자성 재료를 부착하여 자기장 강도를 균일화하는 방안 등이 고안된 바 있으나, 뚜렷한 해결책은 되지 못하고 있다. 장차 플라이휠 장치의 대량생산이 이루어져 대형 자석을 착자하여 사용할 수 있게 된다면 이 문제에 대한 약간의 개선이 이루어지리라 본다. 또, 고정자가 여러 개의 초전도 단결정으로 구성되어 있는 등의 여러 이유로, 고정자에서 유도되는 자기장이 회전 방향으로 균일하지 않음으로 인해 회전자 자석과 도체 부분에서 발생하는 와전류 손실 또한 존재한다. Terentiev 등은 위의 여러 요소에 의한 회전 손실을 측정 분석한 바 있다[6].

### 3. 플라이휠 에너지 저장장치에의 적용

현재 개발되고 있는 방식은 크게 두 가지로 수직축 플라이휠 방식과 수평축 플라이휠 방식이 있다. 수직축 플라이휠 방식은 고온초전도체 판 위에 영구자석이 달린 회전판을 올려놓아 자기력으로 회전체를 들어올리고 회전판을 수직축으로 회전시킴으로써 에너지를 저장하는 방식이다. 수평축 플라이휠은 회전체를 고온초전도 저어널 베어링으로 지지하고, 이 회전체를 회전시켜 에너지를 저장하는 방식이다. 그림 12

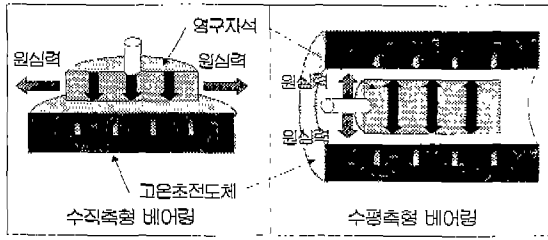


그림 3. 수직축형과 수평축형 초전도 베어링의 도식적 그림.  
(A schematic of vertical and horizontal axle type bearings.)

는 수직축형과 수평축형 베어링을 보여주고 있다.

수직축 플라이휠은 중력 방향과 회전축의 방향이 같기 때문에 베어링이 회전 대칭적인 조건에서 작동하게 된다. 따라서 고온초전도 쓰러스트(thrust)베어링을 사용할 경우 초전도체의 하중 지지력을 최대한으로 이용할 수 있고, 앞서 언급한 평형위치이동이 큰 문제가 되지 않는다는 장점이 있다. 근래에 설계 개발되고 있는 플라이휠 에너지 저장장치의 대부분이 수직축형으로 구성되고 있으며, 여기서 초전도 베어링은 주로 정하중으로 이루어진 회전축 방향의 부하를 담당하기 위해 쓰여지고 복수의 능동형 자기 베어링이 반경 방향의 위치 제어를 위해 사용된다. 이러한 구성은 베어링이 회전 대칭적으로 작동한다는 점 이외에도 에너지 저장 휠을 축 방향으로 비대칭적으로 자유롭게 구성할 수 있고, 회전축의 직경에 대한 제약이 적어 회전체의 고유 탄성 모드를 적절히 조절하여 설계할 수 있다는 등의 많은 장점이 있다. 반면, 반경 방향의 회전체 위치 제어를 위한 베어링이 추가로 필요하고, 회전체를 크게 장축화할 경우 부수적인 건설비용이 많이 소요된다는 것 등은 단점으로 들 수 있다.

아래의 그림 4는 Miyagawa 등이 제작한 수직축형 플라이휠 에너지 저장장치의 구성도이다[7]. 회전체의 정하중은 하부에 위치한 고온초전도 쓰러스트베어링에 의해 지지되고, 반경 방향의 위치 제어는 전자석 베어링에 의해 이루어진다. 축 방향 안정성을 위해 상부에 축 방향 전자석 베어링이 추가로 설치되었다. 고속 회전시의 원심 변형에 견딜 수 있도록 고안된 탄소섬유복합재 플라이휠이 회전축의 상하로 부착되었다. 이런 형태는 종축 회전관성을 횡축 회전관성에 비해 최소화하여 회전 운동의 안정성을 추구하기 위한 구성이다. 이 플라이휠 장치는 30,000 rpm에서 저장 에너지 479 Wh를 달성했다고 보고되었다. 또한 동 저자들은 이 장치의 각종 요소에 의한 에너지 손실률을 분리 측정하여 보고한 바 있다[8].

수평축 플라이휠은 중력 방향이 회전축과 직교하기 때문에 베어링에 걸리는 하중이 회전축에 대해 비대칭적이다. 이 경우에는 회전축 반경 방향으로 부양력과 고정력을 제공하기

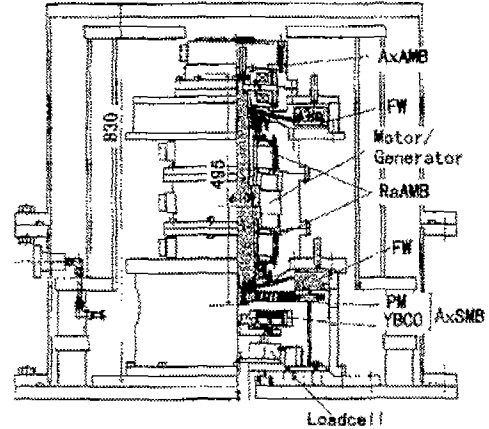


그림 4. 고온초전도 베어링과 전자석 베어링을 혼용한 0.5 kWh 급 수직축형 플라이휠 에너지 저장장치.  
(0.5 kWh class vertical type flywheel energy storage device with high-Tc superconductor bearing and electro-magnetic bearing.)

위해 일반적으로 고온초전도 저어널(journal)베어링을 사용한다. 이 베어링은 동일 하중의 쓰러스트베어링에 비해 다량의 고온초전도체를 필요로 하고 평형위치이동 문제에 더 취약하다는 단점이 있는 반면에, 추가적인 반경방향 제어의 필요성이 비교적 적고 축 방향으로의 자기 고정도 강하다는 장점이 있다. 또 수평축형 구성에서는 저렴한 건설비용으로 회전체를 장축화할 수 있을 것으로 본다. 베어링의 저어널부가 회전체를 변형 모드에 취약하게 만들 수 있다는 점이 현재 걸림돌이 되고 있으나, 이 문제는 다체 연결된 회전체의 설계로 극복할 수 있을 것이라 생각한다.

고온초전도 저어널베어링은 초전도체의 부피에 비해 하중 지지력이 작기 때문에 회전자 자석을 포함한 자성체의 더욱 효율적인 설계가 요구된다. 대표적으로 회전축 방향으로 자화된 실린더형 자석을 같은 극끼리 접합시켜 베어링 저어널을 구성하는 방법이 있는데[9], 이 경우 자석 극면 사이에 자석 재료의 보자력에 근접하는 강력한 자기장이 형성됨에 따라 자구(magnetic domain)의 자화 방향이 변동되어 극소적인 자기장 강화 효과를 반감시키는 것으로 보인다. 이 문제를 해결하기 위해 영구자석으로 지속 경로를 구성하는 방안이 고안되었으나, 이를 실용화하기 위해서는 반경 방향으로 균일한 자화가 가능한 강력한 자석 재료의 개발이 필요하다. 이 외에도 저어널베어링 고정자를 영구자석을 포함한 복합형으로 구성하여 하중 지지력을 강화하고 평형위치이동 문제를 해결하는 방안이 제안되기도 하였다[10].

#### 4. 전력연구원 모델의 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치

#### 4.1 무접촉 고온초전도 저어널베어링의 구조 설계

회전자의 구조는 다수의 원통형 자석을 동일 극이 이웃하도록 N-S N-S N-S N-S 극의 순서로 소정 간격을 두고 비자성체의 원통 안에 강제 배열하여 자속의 방향이 회전자의 반경 방향으로 형성되도록 하였다. 고정자의 구조는 종래의 고온초전도 저어널베어링 고정자에 포함된 고온초전도체 원통의 외주면에 대하여 자석을 설치하여 회전자 자석에 미치는 인력과 척력을 보강하여 부상력을 증가시킬 수 있도록 하였으며, 또 다른 예로 고정자의 상하 면으로는 자석들을 대향 설치하여 회전자와 고정자 간에 인력과 척력을 발생시키고 좌우 측면으로는 고온초전도체를 설치하여 회전자에 대한 고정력을 발생시키도록 하여 부상력을 더욱 증가시켰다.

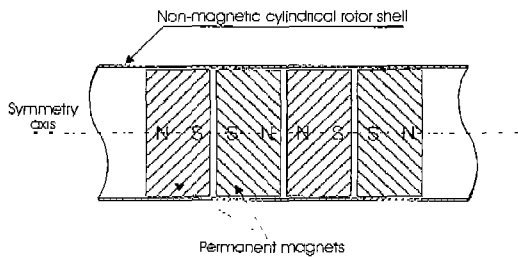


그림 5. 개선된 고온초전도 저어널베어링 구조.  
(An improved structure of high-Tc superconducting journal bearing rotor.)

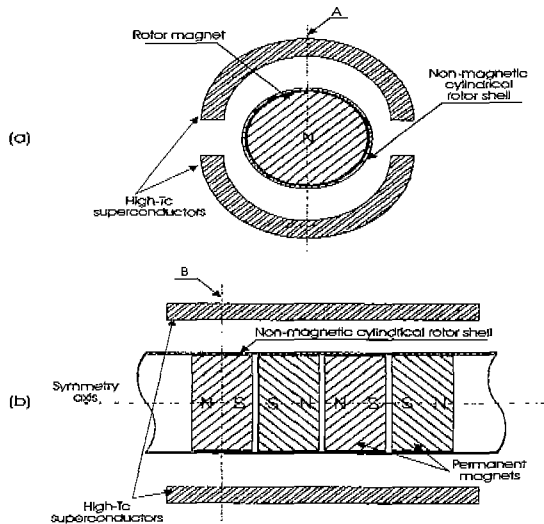


그림 6. 고온초전도 저어널베어링의 단면 모식도.  
(Schematic cross section of a high-Tc superconducting journal bearing (a) Cut perpendicular to the symmetry axis by the plane A. (b) Cut by the plane B.)

이하 상기 내용을 도면에 의거하여 상세히 설명하겠다. 첫째, 고온초전도 저어널베어링의 회전자 자성체 배치를 개선한 내용이다. 그림 5는 고온초전도 저어널베어링 회전자에서 중심축으로의 자속 경로를 없애, 발생된 자기장이 저어널의 반경 방향으로 향하게 하여 고정자 고온초전도체와의 작용을 강화한 형태를 도시한 단면도이다. 축의 역할을 하는 비자성체 원통의 내부에, 동일 극이 이웃하도록 N-S N-S N-S N-S 극의 순서로 다수의 자석을 소정 간격을 두고 비자성체의 원통 안에 강제 배열하여, 자기장이 저어널의 반경 방향으로 형성되도록 구성하는 것이다. 이와 같은 형태로 회전자를 구성할 경우 회전자 표면 부근에서 축 방향, 반경 방향의 자속 밀도변화가 모두 증가하여 고정자 고온초전도체의 자속 고정에 의한 작용력이 강해지게 된다.

그림 6은 그림 5의 회전자를 채용한 고온초전도 저어널베어링의 구조를 도시한 단면도이다. 고정자로는 자속고정용 고온초전도체를 상기 회전자의 외측으로 간격을 두어 상부와 하부에 각각 설치하였다. 회전체에 작용하는 중력 등의 힘을 자기압력(magnetic pressure)으로 상쇄시키기 위해 반원통형의 자속고정용 고온초전도체가 간격을 두고 계란형으로 떨어져 있다. 베어링을 자기장 하 냉각(field cooling)시킬 때 회전체를 힘 방향의 반대쪽에 두고, 냉각 후 힘을 받아 설계시 예정한 위치에 올 수 있도록 한다.

그림 6(b)는 그림 6(a)의 A선 단면도로서 위에서 설명한 고온초전도 저어널베어링의 구성을 보다 명확히 도시하고 있다. 회전자는 비자성체 원통 내에 다수의 원통형 자석을 동일 극끼리 인접하도록 강제 배열시켜 고정하였으며, 회전자의 외측으로는 상부와 하부에 각각 자속고정용 고온초전도체를 설치한 것이다.

#### 4.2 플라이휠 장치의 구성 설계

종래 기술로서 고온초전도 쓰러스트베어링을 이용한 수직축 플라이휠 에너지 저장장치는 플라이휠과 고온초전도 쓰러스트베어링, 전동/발전기는 중력 방향과 평행한 회전축에 부착되어 진공/안전용기 내부에 설치된다. 쓰러스트베어링은 고온초전도체로 이루어진 베어링 고정자와 영구자석 회전자로 구성되어 축 방향으로의 부상력을 주로 제공하고, 축 반경 방향으로의 고정력도 제공한다. 플라이휠은 높은 에너지 저장밀도를 위한 고속회전에 견딜 수 있는 재질과 형태로 제작되며, 진공/안전용기는 내부 진공을 유지해 공기 저항 손실을 줄이고 만일의 사고 발생시 내부 구성물 이탈을 방지하기 위해 제작된다. 전동/발전기는 내부의 접촉식 베어링을 없애 마찰을 없애고 회전시 전자기적 손실을 줄일 수 있도록 설계 제작되어 외부의 전력 변환설비와 제어설비에 연결된다.

상기한 바와 같은 고온초전도 쓰러스트베어링을 이용한 수직축 플라이휠 에너지 저장장치는, 그 회전축이 중력 방향과

평행함으로써 몇 가지 문제점을 가지게 된다. 그 문제점을 크게 나누어 설명하면 다음과 같다.

첫째, 안정성의 문제이다. 고온초전도체의 자기고정력은 외부 자장의 변화에 의해 결정된다. 상기 종래 기술에 의한 수직축 플라이휠 구성에서 회전체가 평형 위치에서 축의 반경 방향으로 이탈하는 경우, 축 방향으로 이탈하는 경우에 비해 영구자석에 의해 발생된 자장의 변화가 비교적 적으므로 베어링이 회전체에 작용하는 복원력이 약하게 된다. 큰 회전관성을 가지고 고속으로 회전하는 플라이휠이 회전축의 평형 위치에서 축에 직각인 방향으로 이탈할 경우 매우 큰 안전상의 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 회전축에 별도로 고온초전도 저어널베어링을 설치하거나 전자석에 의한 능동제어장치를 설치하여 회전축 반경 방향으로의 고정력을 보강할 수 있으나, 이러한 해결책은 장치 제작비용의 증가를 야기한다는 문제점이 있다.

둘째, 확장성의 문제이다. 플라이휠 에너지 저장설비의 대용량화를 위해서는 플라이휠의 회전속도를 증가시키거나 회전관성을 증가시켜야 한다. 회전속도는 플라이휠 소재의 재료적인 한계에 의해 결정되므로, 플라이휠 설비의 대용량화는 플라이휠의 회전관성을 증가시켜 용이하게 이루어질 수 있어야 한다. 플라이휠의 회전관성을 증가시키기 위해 휠의 반경을 증가시키는 방법 또한 휠 소재의 인장강도라는 한계에 부딪히므로, 플라이휠 에너지 저장장치의 대용량화는 축 방향으로 휠과 베어링들을 길게 직렬 연결하는 방법이나 여러 개의 플라이휠 장치들을 병렬로 연결하는 방법으로 구현해야 함을 알 수 있다. 플라이휠 장치들을 병렬로 연결하는 방법은 전동/발전기, 진공/안전용기, 냉각 설비, 제어 설비 등이 플라이휠 장치 각각에 필요하게 되어 매우 비경제적이므로, 결국 회전축 방향으로 휠과 베어링들을 직렬 연결하는 방법이 가장 효율적이라고 볼 수 있다. 그러나 상기 종래 기술에 의한 수직축 플라이휠 에너지 저장장치를 대용량화할 경우 회전축을 중력 방향으로 길게 만들어 휠과 베어링들을 설치해야 하므로 전체 설비의 높이가 커져, 설치가 어렵고 건설비가 많이 들며 설비의 안전성 확보에 어려움이 따르게 된다.

이와 같이, 종래 기술의 고온초전도 스크스트베어링을 이용한 수직축 플라이휠 에너지 저장장치의 경우 회전축 반경 방향으로의 안정성이 비교적 약하고, 확장에 의한 설비의 대용량화가 용이하지 않다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 종래 기술에 의한 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치가 가지는 문제점들을 개선한 새로운 방식의 플라이휠 에너지 저장장치를 고안하여 특허 출원하였다. 새로운 방식의 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치 구성은, 회전축을 중력 방향에 수직인 수평축으로 하여 고온초전도 저어널베어링과 플라이휠, 전동/발전기를 설치하는 구조를 채택함으로써

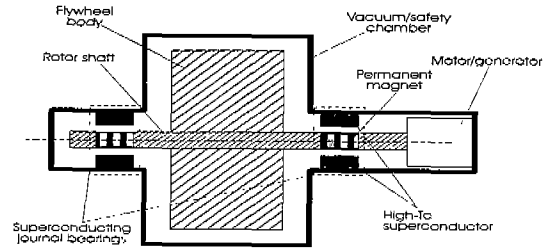


그림 7. 고온초전도 저어널베어링을 이용한 수평축 플라이휠 에너지 저장장치 개념도.  
(A conceptual design of a flywheel energy storage device of horizontal axial type using high-Tc superconducting journal bearings.)

써, 상기 에너지 저장장치의 안정성을 향상시키고 동시에, 다수의 플라이휠과 베어링들의 직렬 연결에 의한 대용량화를 용이하게 하여 이루어진다. 고안된 내용을 정리하면 다음과 같다.

플라이휠을 설치할 회전축으로는 중력 방향에 수직인 수평축을 사용하고, 고온초전도 저어널베어링을 사용하여 부상력과 고정력을 제공한다. 하나 혹은 다수의 플라이휠과 다수의 고온초전도 저어널베어링을 회전축에 설치하고 무접촉 전동/발전기를 축에 연결 설치하여 진공/안전용기 외부의 전력 변환설비와 제어설비에 연결한다. 이와 같은 플라이휠 에너지 저장장치의 대용량화를 위해서는 다수의 플라이휠과 베어링들을 회전축에 축설하여 회전관성을 증가시킨다. 상기한 고온초전도 저어널베어링으로는, "강한 부상력의 고온초전도 베어링"의 명칭으로 이미 특허 출원된 바 있고 혼합형 고온초전도 저어널베어링을 사용하여 부상력을 강화할 수 있다.

그림 7은 본 연구에서 제안한 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 구성 예로서, 하나의 플라이휠로 구성된 고온초전도 저어널베어링을 이용한 수평축 플라이휠 에너지 저장장치의 단면을 개략적으로 도시한 것이다. 플라이휠과 고온초전도 저어널베어링, 전동/발전기는 중력 방향과 수직인 회전축에 부착되어 진공/안전용기 내부에 설치된다. 상기 저어널베어링은 고온초전도체를 포함한 베어링 고정자와 자성체를 포함한 회전자로 구성되어 중력 반대방향으로의 부상력과, 여타 방향으로의 고정력을 제공한다. 플라이휠은 높은 에너지 저장밀도를 위한 고속회전에 견딜 수 있는 재료와 형태로 제작되며, 진공/안전용기는 내부 진공을 유지해 공기 저항 손실을 줄이고 만일의 사고 발생시 내부 구성물 이탈을 방지하기 위해 제작된다. 전동/발전기는 내부의 접촉식 베어링을 없애 마찰을 없애고 회전시 전자기적 손실을 줄일 수 있도록 설계 제작되어 외부의 전력 변환설비와 제어설비에 연결된다.

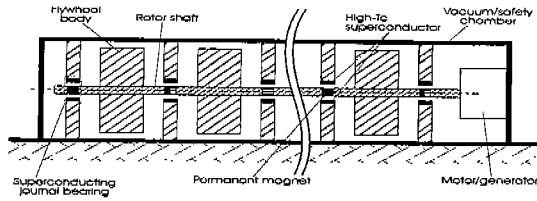


그림 8. 고온초전도 저어널베어링과 다수의 플라이휠로 구성된 대용량 플라이휠 에너지 저장장치의 개념 설계도.  
(A conceptual design of a large scale flywheel energy storage device which consists of parallel-linked flywheels and high-Tc superconducting journal bearings with a horizontal axle.)

위에 예시한 바와 같이 플라이휠 장치를 수평축으로 구성하고 플라이휠의 부상 및 고정을 위해 고온초전도 저어널베어링을 사용할 경우, 종래 기술에 의한 수직축 고온초전도 플라이휠 장치에 비해 회전축 반경 방향으로 더 강한 고정력을 얻을 수 있어, 추가 장치 없이도 더 높은 안정성을 구현할 수 있다.

그림 8은 위에서 제안한 개념의 고온초전도 저어널베어링을 이용한 수평축 플라이휠 에너지 저장장치를 여러 개의 플라이휠을 직렬 연결하여 구성함으로써 대용량화한 경우를 도시한 것이다. 종력 방향과 수직인 회전축에 다수의 플라이휠이 축설되고, 회전체의 하중이 균일하게 분산되어 회전축의 휨을 방지하도록 다수의 고온초전도 저어널베어링이 설치된다.

이와 같이 고온초전도 저어널베어링을 이용한 수평축 플라이휠 에너지 저장장치를 대용량화할 경우 종력 방향과 직각인 회전축을 길게 만들어 설치하게 되므로, 종래 기술에 의한 수직축 플라이휠 에너지 저장장치를 대용량화할 경우보다 설비의 안전성 확보가 용이하고 조립 설치 공정이 쉬워 건설비가 상대적으로 저렴하게 된다. 또한 기존 설비에 적절한 수의 플라이휠과 베어링, 전동/발전기를 수평 방향으로 연결하는 방법으로 쉽게 용량 확장을 할 수 있다는 장점이 있다.

결론적으로, 본 연구에서 제시한 바 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 구성 개념은, 플라이휠 에너지 저장장치를 구성함에 있어 종력 방향과 직각인 수평축과 고온초전도 저어널베어링을 채용하여, 종래 기술에 비해 그 안정성과 확장성을 향상시키고 제작·건설비용을 줄인 것으로, 종래의 플라이휠 에너지 저장장치에 안전성 경제성 측면에서 큰 향상을 가져다줄 수 있다.

#### 4.3 시작품 제작

본 연구에서는 앞에서 기술한 자석배열을 포함한 베어링 기술 그리고 플라이휠 장치의 구성 설계를 시현하기 위해 고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 시작품을 제작하였다. 이 항에서는 본 시작품의 구성과 적용된 기술을 도면과 사진

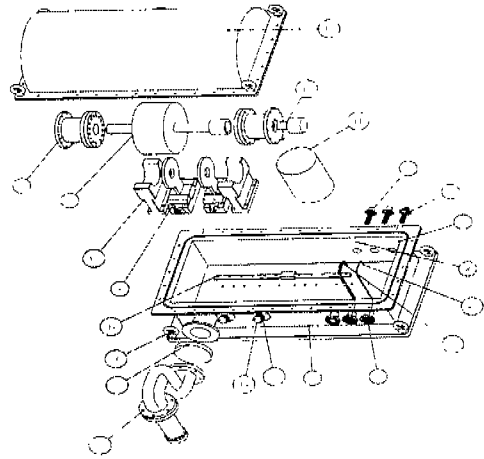


그림 9. 300 Wh 급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 시작품의 개략적인 조립도.  
(An assembling schematic of 300 Wh class superconductor flywheel energy storage device.)

을 통해 설명한 후 개선점과 앞으로의 연구 방향 등을 논하고자 한다.

현재 제작이 완료되어 시운전 중인 플라이휠 에너지 저장장치 시작품은 약 28.7 kg의 회전체가 20,000~40,000 rpm의 회전속도로 운전되도록 설계되었고, 이 때 가용에너지(usable energy)는 372 Wh 정도이다. 좌측으로부터 초전도베어링, 가이드베어링, 복합재 휠, 가이드베어링, 초전도베어링의 순서로 이루어져 있고 중간을 베어링 저어널부를 포함한 회전축이 관통하고 있다. 회전축과 복합재 휠은 특수 열박음으로 결합하여 강성을 보강하여 회전체의 고유진동수를 높여 운전영역을 넓히고, 복합재 휠 부분에 잔류 응력을 발생시켜 고속회전시 발생하는 원심 변형을 다소 보상하도록 하였다. 복합재 휠은 탄소섬유로 이루어져 있으며, 베어링 저어널부는 비자성 금속 용에 Nd 자석들을 같은 극끼리 마주보도록 강자성 금속판을 사이에 두고 끼운 후 기계적으로 결합한 후, 비자성 금속의 캔을 특수 열박음하고 2 mm 두께로 연마하여 강성을 추구하였다. 그 우측에 원주 방향으로 Halbach 배열을 이루는 회전자와 코어리스 타입의 고정자가 내전형 전동발전기를 이루고 있다. 실제로 맨 우측 위상 제어 센서는 회전체의 좌측에 설치되었다.

그림 9는 플라이휠 에너지 저장장치 부품들의 대략적인 조립도이다.

이 구성으로 회전체를 공기중에서 10,000 rpm 이상의 속도로 안정적으로 회전시킬 수 있었다. 구동 초기 강제모드 공간 영역에서는 설치된 가이드베어링이 정상적으로 충격을 흡수하였고, 약 2000 rpm 이상에서는 바람소리만이 들리는 완전한 무접촉 부양 회전을 볼 수 있었다. 회전 초기에 약간

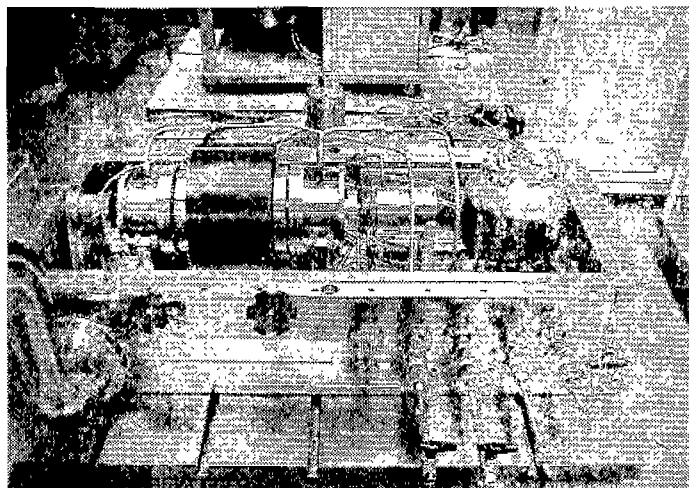


그림 10. 전력연구원에서 개발한 300Wh급 수평축형 초전도 플라이휠 에너지 저장장치.  
(KEPRI's 300 Wh class horizontal-type superconductor flywheel energy storage device.)

의 평형 위치 이동이 있었으나, 이러한 현상은 사전 연구를 통해 충분히 예측된 바 있고, 그 이후 지속적으로 회전체가 회전하는 동안에는 초전도베어링의 평형 위치 이동을 관측할 수 없었다. 그림 10은 조립이 완료된 시작품의 모습으로 뚜껑을 덮지 않은 상태이다.

검증용 SUS휠로 된 HTC SFES 시스템을 공기 중에서 성능 시험하여 성공적인 결과를 얻었다.

공기의 마찰 손실로 인해 10,000rpm 이상의 고속에서 운전하기에 어려우므로, 10,000이하에서 시험 운전하였다. 100rpm에서는 초전도베어링의 자기불평형으로 인해 slow roll이 있었고, 600rpm에서는 강제 공진영역에 들어서 whirl이 커졌다. 1,200rpm를 통과하면서 whirl은 급격히 줄어들기 시작하여 강제 공진 영역을 거의 다 통과하였다.

10,300rpm에서 운전되고 있을 때 whirl은 계속해서 50 $\mu$ m 이하로 유지되며 안정된 운전을 하였는데, 이것은 일반적인 회전체에서는 매우 적은 값이다. 또한 각 신호로부터 얻은 1X filtered 성분에 대한 Bode 선도에서 15,000rpm 이하에서 2개의 강제 공진모드를 통과함을 확인할 수 있으며, 그 이후 시스템은 50 $\mu$ m 이하로 진동변위를 유지되면서 안정된 운전을 하고 있음을 볼 수 있다. 진공중에서는 33,000rpm 이상의 속도까지 지속적으로 안정된 운전이 가능할 것으로 생각된다.

#### 4. 맺음말

플라이휠 에너지 저장장치에 필수적인 기술로는 무접촉 베어링 기술 이외에도 냉각기술, 전동발전기 기술, 전력변환기

술, 휠 제작기술 등이 있다. 이 중 가장 핵심이 되는 분야는 고 에너지저장밀도를 가지는 휠 제작기술이라고 볼 수 있다. 휠이 큰 회전관성을 가지면서 고속 회전시의 응력을 견딜 수 있으려면 재료의 중량 대비 인장강도가 커야 한다. 일반적인 강철이 이론적으로 약 30 Wh/kg의 에너지저장밀도를 가질 수 있음에 비해, Graphite T-1000 등 최근의 섬유복합재들은 최대 수백 Wh/kg의 이론적인 에너지저장밀도를 가질 수 있다고 알려져 있다. 근래에는 이종의 원통형 섬유복합재를 압축응력하에서 조립하여 휠의 에너지 저장밀도를 높이는 연구가 진행되고 있고, 이러한 휠을 이용하여 제작한 플라이휠 장치도 보고되고 있다.

플라이휠 에너지 저장기술의 가장 중요한 기술적 성공 요건을 들라면, 낮은 에너지 손실률과 높은 에너지 저장밀도를 구현하는 것이라 할 수 있을 것이다. 고온초전도 베어링 기술이야말로 복합재 휠 기술과 함께 이 두 요건을 만족시키기 위한 최적의 기술이라고 보여지며, 인류의 새로운 에너지 저장방식을 구현하는 열쇠가 될 것으로 믿는다.

#### 참고문헌

- [1] P. Z. Chang, F. C. Moon, J. R. Hull, and T. M. Mulcahy, *J. Appl. Phys.* 67 (9), 4358 (1990).
- [2] B. R. Weinberger, L. Lynds, and J. R. Hull, *Supercond. Sci. Technol.* 3, 381 (1990).
- [3] Takashi Hikihara and Francis C. Moon, *Physics Letters A* 191, 279 (1994).



- [4] Takashi Hikihara, Hitoshi Adachi, Shunsuke Ohashi, Yoshihisa Hirane, and Yoshisuke Ueda, *Physica C* 291, 34 (1997).
- [5] T. Coombs, A. M. Campbell, R. Storey, and R. Weller, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 9 (2), 968 (1999).
- [6] A. N. Terentiev, H. J. Lee, C.-J. Kim, G. W. Hong, *Physica C* 290, 291 (1997).
- [7] Y. Miyagawa, H. Kameno, R. Takahata, and H. Ueyama, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 9 (2), 996 (1999).
- [8] Hironori Kameno, Yasukata Miyagawa, Ryouichi Takahata, and Hirochika Ueyama, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 9 (2), 972 (1999).
- [9] M. Komori, A. Tsuruta, S Fukata, and T. Matsushita, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 5 (2), 634 (1995).
- [10] 이준성, 성태현, 한상철, 김진중, *Proceedings of the 8th Korean Conference on Materials and Applications of Superconductivity (KCMAS'98)*, 225 (1998).

## 저 자 약 력

### 성명 : 한 상 철

#### ❖ 학 력

- 1987년 고려대학교 공대 금속공학과 졸업  
 1990년 KAIST 재료공학과 졸업(공학석사)  
 1995년 KAIST 재료공학과 졸업(공학박사)

#### ❖ 경 력

현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

### 성명 : 성 태 현

#### ❖ 학 력

- 1982년 한양대학교 공대 무기재료공학과 졸업  
 1987년 동 대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사)  
 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(공학박사)

#### ❖ 경 력

- 1991년-1992년 ISTEK 근무  
 1992년-1995년 MIT Post. Doc.  
 -현재 한전 전력연구원 책임연구원