

고온 초전도체를 이용한 에너지 저장장치(플라이휠)

박해웅*, 김찬중**, 홍계원***
(한국원자력연구소 초전도재료연구팀)

*위촉연구원, **선임연구원, ***초전도팀장

1. 서론

1987년에 발견된 산화물 고온 초전도체는 전이온도가 77K 이상으로, 저가인 액체질소를 사용하여 초전도 현상을 유지할 수 있는 특성으로 인해 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 고온 초전도체는 높은 외부자장하에서 큰 전류를 저장 없이 흘릴 수 있는 전류 통전능력과 외부자장에 의한 자기부상 특성을 가지고 있다. 초전도체의 높은 전류통전능력은 산업적으로 큰 비중을 차지하게 될 대용량장치, 예를 들어 에너지 저장장치, 초전도를 이용한 송전, 모터 및 발전기 등에 응용될 수 있다. 최근에는 이들에의 실용화에 필수적인 통전 전류의 증가를 위한 연구가 진행되고 있으며 그 결과 몇몇 분야에서는 벌써 실용화 초기단계에 도달하고 있거나 수 년 내에 실용화가 가능해질 것으로 예상된다. 그러나, 고온 초전도체를 본격적으로 이용하기 위해서는 휨성, 가연성 등의 기계적 특성과, 고자장하에서도 높은 임계 전류밀도를 유지할 수 있는 초전도성을 동시에 만족시킬 수 있어야 한다.

최근에 개발된 덩어리형 고온 초전도체의 경우 액체질소 온도에서 실용화에 필요한 10^4 A/cm^2 이상의 임계전류밀도를 보이고 있다[1](그림 1). 용융공정으로 제작된 덩어리형 고온 초전도체의 대표적인 응용 분야로는 자기 부상 특성을 이용한 무접점 베어링과 에너지 저장을 위한 플라이휠 장치를 들 수 있다. 최근 보고된 바에 의하면 전기전력은 12시간 단위를 기준으로 약 30% 정도의 수요차이가 발생하고 있으며 수요 절정기에는 더욱 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다(표 1). 전력수급의 효율을 기하기 위해서는 저장효율이 우수한 전력저장장치의 개발이 필요함을 의미한다. 이런 관점에서 고온 초전도체를 이용한 플라이휠 장치는 저장에너지의 용량을 자유자재로 조절할 수 있고, 저장 에너지 자체가 환경을 파괴하지 않는 깨끗한 에너지라는 점에서 대단히 매력적이다. 또한 최근 산업발달에 의한 전력수요 급증은 대용량, 고효율의 에너지 저장장치의 개발을

더욱 절실히 요구하고 있다. 그러므로 고온 초전도체를 이용한 에너지 저장장치의 개발은 기술적인 측면뿐만 아니라 경제적으로도 상당한 잠재력을 지니고 있다. 이러한 관점에서 고온 초전도체를 이용한 플라이휠 장치가 가까운 미래에 실용화될 것으로 전망된다. 본 소고에서는 현재 개발되어

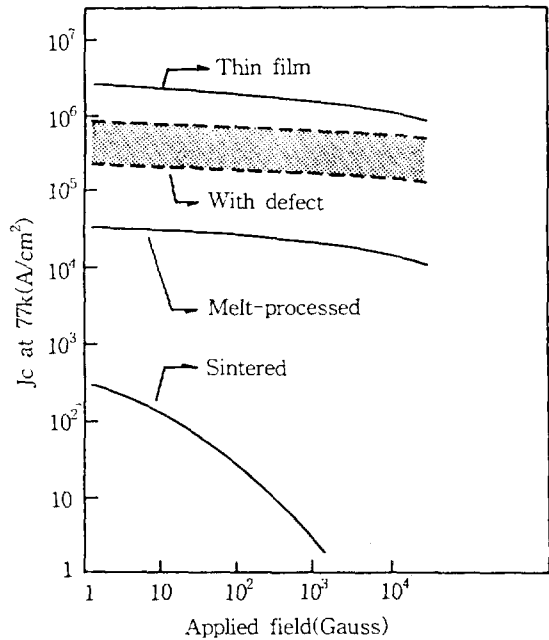


그림 1 외부자장과 고온초전도체의 임계전류밀도

표 1 전형적인 미국 Commonwealth Edison 회사의 전력수요(MWe)

	낮	밤	최고
전력수요	7100	11400	17733

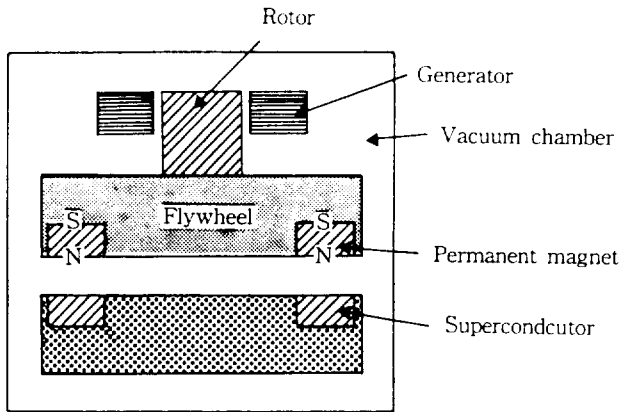


그림 2 플라이휠 에너지 저장장치

있는 Y-계 덩어리형 고온 초전도체의 제조공정과 에너지 분야에의 연구 현황 및 과제에 대하여 논의하였다.

2. 고온 초전도체 플라이휠

고온 초전도체 플라이휠은 초전도체 위에 영구자석을 내장한 원판형 몸체를 회전시켜 에너지를 저장한 후 저장된 운동에너지를 다시 전력으로 바꾸는 장치이다. 그림 2에서 보는 바와 같이 플라이휠은 크게 3부분으로 나뉘어져 있는데, 초전도체와 영구자석을 내장한 디스크로 구성되어 있는 베어링, 회전에 의해 운동에너지를 발생시키는 회전체, 그리고 동력 발생 및 회전속도를 증가시키고 에너지 전환을 위한 모터와 발전기(generator)이다. 이외에도 진공, 냉각, 그리고 제어장치 등이 필요하다.

초전도체를 이용하여 에너지를 저장할 경우에는 1) 마찰에 의한 에너지 손실이 거의 없고 2) 임계온도 이하에서 자체 자장을 발생함으로써 외부 자장 침투를 억제하는 마이스너(Meissner) 현상때문에 자기부상의 안전성(stiffness)이 향상되는 장점이 있다. 현재 실용화되고 있는 영구자석의 반발력을 이용한 베어링은 외부 자장하에서 자석, 즉 회전체의 안정화를 위하여 특수한 제어장치가 반드시 필요하다. 이 경우 베어링에 의한 마찰을 어느 정도는 줄일 수 있으나, 결과적으로 자석간의 마찰과 제어장치 등에 의한 에너지 효율 저하로 인해 시간당 최소한 1%, 즉 하루에 저장된 에너지의 약 25% 이상이 손실된다. 반면에 고온초전도체의 경우 저장된 에너지의 손실은 시간당 약 0.1%, 즉 하루에 약 2%에 지나지 않는다[2]. 특히 고온 초전도체의 경우 임계 자기장이 10(77K) - 100(4K) Tesla[3]에 이르므로 보다 광범위한 외부 자기장하에서도 응용이 가능하다.

2.1 고온 초전도체의 제조공정 및 특성

2.1.1 용융공정[4]

고전적인 고상반응법으로 제조된 다결정 초전도체는 여

러 개의 고각 입체를 형성하고 있으며 입체 사이에 불순물과 균열 등으로 인해 높은 전류를 흘릴 수 없는 단점을 지니고 있다. 반면에 Bulk형태의 Y-계 초전도체를 부분 용융시킨 후 서서히 냉각할 경우 초전도 입자들이 일방향으로 배열될 뿐 아니라 $Y_2BaCuO_5(211)$ 과 같은 미세한 결함을 포함하는 큰 결정으로 성장할 수 있기 때문에 임계 전류밀도를 향상시킬 수 있는 장점이 있다. 이러한 용융 방법은 Jin 등에 의해 처음 개발되었다[5]. Melt-texture-growth 공정은 초전도 분말을 포정 반응온도(약 1000°C) 이상으로 가열하여 고상의 211과 Ba-Cu-O의 액상으로 부분 용융시킨 후 다시 초전도상이 생성되는 온도로 서서히 냉각시킴으로써 초전도 분말을 일방향으로 성장시키는 방법이다. 이 경우 수mm-cm 크기의 커다란 초전도결정이 성장되며 결정 내부에는 211입자들이 포획된다. 211 잉여 조성으로 제조된 초전도체는 임계전류밀도가 1T의 자장에서 $10^4 A/cm^2$ 이상으로 211이 첨가되지 않는 경우보다 상대적으로 높다. 임계전류의 향상에 대한 211의 역할은 아직 명확하지 않으나 1) 계면의 자력속박 자리로 작용 2) 잔류액상의 제거 3) 상전이나 열충격에 의한 미세 균열의 생성 및 전파를 억제하는 등 유익한 효과를 준다[6].

용융공정된 초전도체는 흔히 여러 개의 커다란 초전도 결정들로 구성되어 있으며 결정 내에서의 초전도 입자들을 강하게 연결되어 일방향으로 배열되어 있으나 결정 사이의 입체때문에 전류의 흐름을 방해받는다. 결정크기를 증가시키는 방법으로는 노내에서의 온도 구배를 이용한 방향성 방법과 종자증식법이 사용되고 있다. 종자를 사용하여 입자를 성장시킬 경우 한 곳에서만 초전도 결정의 핵을 생성, 성장시킬 수 있을 뿐만 아니라 입자의 성장방향을 선택할 수 있는 장점이 있다. 현재 종자로서는 MgO , Al_2O_3 , $SmBa_2Cu_3O_7$, 그리고 $NdBa_2Cu_3O_7$ 등이 사용되고 있다. 고온 초전도체에 제 2 상 입자들을 첨가하게 되면 초전도체 내에 자력속박 자리가 증가되고, 그 결과 고자장하에서 임계전류밀도가 증가한다. 또한 첨가된 2상 입자들은 초전도체의 기계적 특성을 향상시킨다. 가장 널리 사용되고 있는 백금이나 세륨 등의 경우 211 핵생성자리를 증가시키고 액상의 특성을 변화시킴으로써 211상을 미세화시킨다. 이러한 공정을 통하여 제조된 초전도체는 고자장에서 $10^4 A/cm^2$ 이상으로 거의 실용화 단계에 접근하고 있다. 고온초전도체에 중성입자를 조사할 경우 미세결함을 증가시킬 수 있고 그 결과 자력속박 자리와 임계전류밀도를 향상시킬 수 있다.

2.1.2 초전도체를 이용한 에너지 저장

초전도를 이용하여 전력을 저장하는 방법에는 초전도 자석으로 구성된 폐쇄된 회로에 전류를 공급하여 저장한 후 원하는 시기에 저장된 전력을 외부로 추출하여 사용하는 SMES(superconducting magnetic energy storage)와 덩어리형 초전도체와 영구자석을 이용하여 원판체를 초전도체 위에서 회전시켜 에너지를 저장한 후 저장된 운동에너지를 다시 전력으로 변환시키는 flywheel장치가 있다. 초전도 자

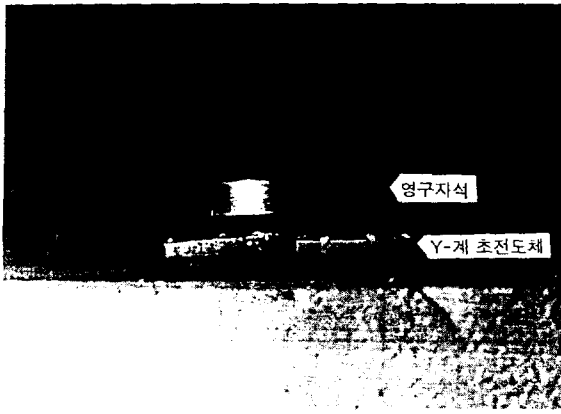


그림 3 Y-계 초전도체 위에서 영구자석의 부상

적으로 에너지를 저장시킬 경우에는 에너지 손실이 거의 없다. 현재는 Ni₃Ti이나 Ni₃Sn과 같은 저온 초전도선을 이용한 초전도자석으로 이 장치를 개발하고 있다. 고온초전도체를 이용할 경우에는 저온(4.2K)에서 임계전류밀도가 위 재료들에 비하여 상대적으로 높기 때문에 4.2K에서 저온 초전도자석보다 다량의 전력을 저장할 수 있는 장점이 있다. 그러나 액체질소온도에서는 고온초전도체의 임계전류밀도가 낮기 때문에 77K에서 응용화는 실현되지 못하고 있다.

초전도체를 이용하여 에너지를 저장할 수 있는 또다른 방법으로 플라이휠을 들 수 있다. 그림 3은 용융법으로 제조한 초전도체 위에 부상한 영구자석을 보여준다. Y-계 초전도체를 용융법으로 제조할 경우 결정립이 큰 초전도상을 성장시킬 수 있고, 초전도결정의 크기를 크게 할수록 다량의 무게를 지탱할 수 있는 초전도체를 제조할 수 있다. 초전도체 위에서 부상시킬 수 있는 무게를 증가시킬수록 플라이휠에 저장할 수 있는 에너지도 많아진다. 그림 4는 초전도체와 영구자석간의 힘의 형태를 보여준다. 용융법으로 제조한 초전도체는 외부자력에 대한 강력한 반발력(repulsive force)뿐만 아니라, 자력이 초전도체에 포획되어 발생하는 인력(attractive force)을 보유하게 되므로 회전체를 초전도체 위, 어떤 임의의 위치에서 고정시켜 회전시킬 수 있다. 이러한 인력은 자력이 초전도체에 속박되는 flux pinning force로 인해 발생하는데, 이 때문에 플라이휠이 기계적으로 회전할 때 상당량의 에너지가 소모된다. 또한 회전체의 균일성을 부여하고 회전체와 대기와의 마찰을 줄일 수 있도록 진공중에서 사용한다면 기계적인 회전에 의한 에너지 손실은 상당량 감소시킬 수 있다.

2.2 초전도체의 자기 부상력

초전도체는 내부에 자장이 침투할 수 없을 뿐만 아니라 초전도체가 되기 전에 내부에 침투되어 있던 자장도 밖으로 밀어내는 반자성 특성(마이너스 효과)을 지니고 있다. 고온 초전도체는 외부자장이 1차 임계자장(H_{c1})보다 낮은 자장에서는 type I 초전도체와 같이 완전 반자성체로 되며,

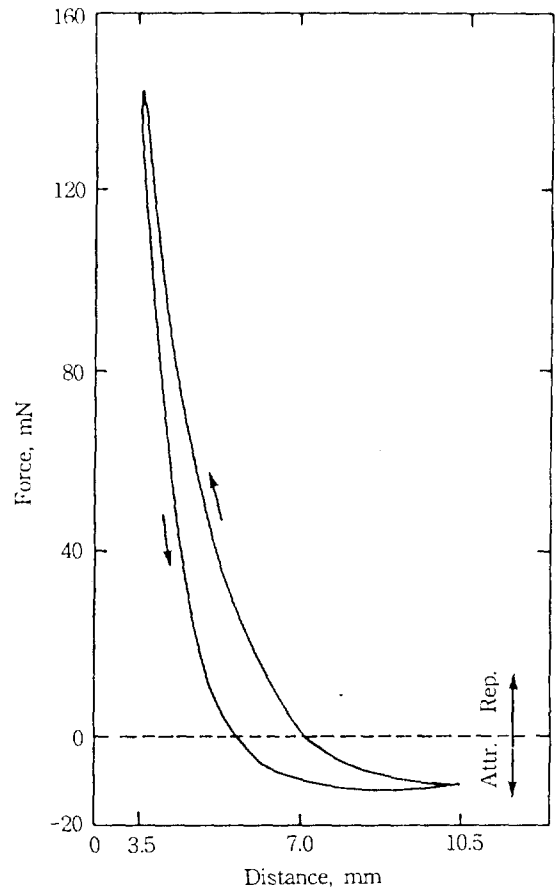


그림 4. 초전도체-영구자석간의 거리에 따른 인력과 반발력

외부자장이 H_{c1} 이상일 경우, 침투된 자력은 초전도체 내부의 미세결함에 의한 속박(pinning)으로 인하여 내부자장의 구배가 형성된다. 일반적으로 초전도체의 부상력(levitation force)은 다음과 같이 표시된다.

$$F_z = m \times (dh_z / dz) \tag{1}$$

총 magnetic moment(m)은

$$m = VAJ_c d \tag{2}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 V는 초전도상의 부피, A는 지형인자, J_c는 임계전류밀도, 그리고 d는 전류 loops의 길이를 나타낸다. 그러므로 고온 초전도체의 자력속박이나 임계 전류밀도를 증가시킴으로써 자기 부상력을 향상시킬 수 있다. 또한 입자간의 결속력과 초전도입자를 크게 성장시킴으로써 d를 증가시킬 수 있으며 결국 부상력을 증가시킬 수 있다. 최근 개선된 용융공정에 의해 제작된 Y-계 텅어리형 고온 초전도체는 단결정 또는 몇 개의 큰 결정상으로

이루어져 있을 뿐만 아니라, 각 결정상 내에서는 입자들이 강하게 결합되어 일방향으로 배열되므로 강한 자기 부상력을 얻을 수 있다.

2.3 단위면적당 부상력(levitation pressure)

고온 초전도체를 이용한 플라이의 주 구성부는 초전도체와 그 위에 부상되어 있는 영구자석이다. 따라서 베어링에서 단위면적당 부상력은 두 구성부간의 척력, 영구자석 자장의 제곱, 또한 초전도체의 자기부상력에도 비례한다. 단위면적당 부상력을 향상시키기 위해서는 1) 초전도체의 자기부상력 향상, 2) 영구자석의 자력 증가, 3) 두 자석간의 거리 단축 등을 통해 향상시킬 수 있다. 현재 플라이휠의 단위면적당 부상력은 쉽게 100kPa을 능가할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

2.4 플라이휠의 저장에너지

2.4.1 에너지밀도(energy density)

플라이휠에 저장할 수 있는 운동에너지의 용량은 여러 가지 요소에 의해 결정된다. 플라이휠 회전체는 고속회전시 원심력이 발생하고 그에 따른 응력은(ω^2)에 비례하므로 단위 질량(λ_m) 및 단위부피당(λ_v)의 저장에너지는 다음과 같이 표시될 수 있다[7].

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

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

여기서 K_s 와 σ_{max} 는 각각 회전디스크의 지형인자와 최대 응력을 나타낸다. 위의 식에서 보는 바와 같이, 플라이휠의 재료와 모양이 결정되면 단위질량 및 단위부피당의 저장에너지의 회전체의 크기나 속도에 관계없이 결정된다. 표 2는 디스크 구조에 따른 지형인자를 나타내는데, 이상적인 등압 구조를 가진 디스크의 경우 지형인자는 최대값 1.0을 가진다. 또한 플라이휠의 에너지 밀도는 표 3에서 보는 바와 같이, 회전체 재료의 강도에 따라서도 결정된다. 에너지 밀도를 향상시키기 위해서는 저밀도에 고강도를 가진 재료가 필수적이며 표에서 보는 바와 같이 현재 개발된 섬유강화 복합재료들이 일반 금속재료보다 높은 에너지 밀도를 지니는 장점이 있다. 만약 밀도 1.6 t/m³, 최대 스트레스 1 GPa의 섬유강화재료(FRP)를 사용하여 1 Mwh(3.6 GJ)의 에너지를 저장하고자 할 경우 부피와 질량이 각각 6m³, 10톤 규모의 플라이휠이 필요하다. 현재 일본 Mishubishi 전기연구소에서는 에너지밀도 100 Wh/kg을 목표로 고강도재료를 연구 개발하고 있다.

2.4.2 총 에너지용량

플라이휠을 이용하여 저장할 수 있는 총 운동에너지의 양은

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

표 2. 디스크의 구조와 지형인자




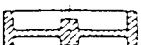
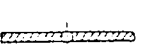

Shape	Title	Shape factor K_s
	Isostress disk	1.0
	Shape disk	0.9
	Flat disk	0.606
	Rimmed disk	0.4
	Flat disk with bore	0.303
	Flat disk with boss	0.303

표 3. 플라이휠 재료의 강도와 에너지 밀도

Material	σ_B (kg/mm ²)	σ_A (kg/mm ²)	ρ	σ_A/ρ	K_s	λ_w (Wh/kg)	Remarks
Cast steel	50	40	7.7	5.2	0.8	11.3	
High tensile steel	80	64	7.8	8.2	0.8	17.6	
Maraging steel	200	160	7.8	20.5	0.8	44.3	
E glass/Epoxi	140	70	2.1	33.3	0.5	45	one-directional material
Carbon/Epoxi	210	110	1.6	68.8	0.5	93	=
Aramid/Epoxi	175	90	1.4	64.2	0.5	87	=

로 표시된다. 여기서 M 은 회전판의 질량(Kg), r 은 반경(m), ω 는 각속도(rad/s)이다. 그러므로 에너지 저장량은 회전판의 무게에 직선적으로 비례하고, 회전속도와 회전판의 직경에는 그 제곱에 비례한다. 회전체의 회전속도 한계는 회전체의 직경과는 관계없이 회전시의 응력과 재료의 강도에 의해 결정된다. 현재 개발된 금속합금은 상대적으로 낮은 강도와 높은 밀도 때문에 회전속도 한계가 수 백 m/sec에 불과한 반면, 고강도, 저밀도의 섬유 복합재료는 1000 m/sec 이상의 회전속도가 가능하다. 또한 저장에너지를 증기시키기 위해서는 큰 회전체가 사용되어야 하는데 직경이 큰 영구자석은 제작상 많은 어려움이 따르므로 판상형의

자석을 여러 개 조합하여 문제를 해결할 수 있다. 단 자석의 연결 부위에서 불균일한 자장으로 인해 회전시 마찰이 발생하므로, 이 경우 여러 층의 자석을 엇갈리게 배열함으로써 마찰을 제거할 수 있다.

2.4.3 플라이휠 drag

플라이휠의 회전력을 감소시키는 원인으로는 1) 영구자석의 불균일한 자장과 그에 따른 초전도체의 자화약화, 2) 공기마찰, 그리고 3) 영구자석의 불균일한 자장과 플라이휠 금속물 사이에 발생하는 eddy 전류에 의한 손실 등이 있다. 이들은 회전속도에 비례하는데, 영구자석의 불균일한 자장과 공기마찰에 의한 감소는 1차 함수로, eddy 전류의 손실은 2차 함수로 나타난다. 그러므로 플라이휠의 회전력은 고속이 될수록 급격히 감소된다. 최근 독일에서 제작된 플라이휠의 경우 분자들간의 표면마찰과 eddy 전류에 의한 회전 반발력은 $7.6 \times 10^{-10} \text{Nm}$ 였으며, 그 중 75%가 eddy 전류에 의해 발생하는 것으로 보고되었다[8]. 플라이휠의 회전력 감소는 얇은 철끼움재를 영구자석 표면에 사용하여 자장을 균일화하고, 그 결과 eddy 전류의 발생을 줄임으로써 개선되었다. 또한 회전시 공기 저항을 줄이기 위해서 플라이휠은 진공에서 작동되어야만 한다. 일반 자석으로 제작된 플라이휠의 경우 회전력 감소로 인해 1kg당 수 W의 전력이 소모되는데 반해, 초전도 플라이휠의 경우 회전속도 2000rpm에서 $10^2 - 10^3 \text{W}$ 가 소모되는 것으로 보고되었다[9]. 또한 플라이휠에서 자석의 자장중심과 회전체의 무게중심이 어

긋나 있을 경우 저속에서는 자장중심을 축으로 회전하는 반면 고속에서는 무게중심으로 회전축이 옮겨지므로 고속에서는 회전력이 급격히 감소한다. $5 \times 10^{-4} \text{torr}$ 진공에서 초전도체와 자석간의 간격을 6mm 유지시킨 결과 두 중심이 일치하지 않았을 경우 4시간 후에 회전체가 정지했으나, 일치되었을 경우에는 10시간 지속되었다[10].

3. 플라이휠의 응용

잉여 전력을 저장하기 위한 에너지 저장장치가 성공적으로 실용화되기 위해서는 큰 에너지 저장능력, 기존의 송전 설비와 호환성, 저렴한 비용, 환경오염 방지, 그리고 높은 내구성 등을 갖추어야만 한다. 표 4는 현재 실용 가능하거나 또는 개발중에 있는 여러 가지 전기에너지 저장방법과 그들의 장·단점을 요약하였다. 표에서 보는 바와 같이 초전도체를 이용한 플라이휠 장치는 전기 발전 비용 절감, 에너지의 효율적인 저장, 그리고 환경오염의 최소화를 통한, 새로운 발전소의 건설이나 비상 전력공급을 위한 설비를 줄일 수 있다. 이외에도 플라이휠을 에너지 저장장치에 응용할 경우 여러 가지 장점들이 있다. 예를 들면 1) 응용 범위가 광범위 하며 목적에 따라 용량과 규모를 조절할 수 있다. 2) 에너지 입출력의 양과 시간을 자유롭게 조절할 수 있다. 3) 장소 설정에 제한이 없으므로 에너지를 필요로 하는 장소에 자유롭게 설치할 수 있다. 4) 에너지밀도가 상대

표 4. Comparison of Energy Storage Technologies

	FES	Batteries	Pumped Hydro	Compressed Air/Gas	Micro-SMES ^a	SMES ^a	Combustion Turbine
Efficiency	~90%	~70%	~60%	<50%	~90%	~90%	~50%
Energy Capacity	high	medium	high	high	very low	high	N/A
Modular	yes	yes	no	no	yes	no	>30 MW
Cycle Life	unlimited	×100	×1000	×1000	unlimited	unlimited	×1000
Charging Time	minutes	hours	hours	hours	minutes	hours	N/A
Site Availability	very high	medium	low	low	high	very low	medium
Stored Energy Measurement	excellent	poor	excellent	excellent	excellent	excellent	N/A
Construction Time	weeks	months	years	years	weeks	years	months
Environmental Impact	benign	large	very large	very large	benign	very large	large
Accident Consequence	low	medium	high	medium	low	high	medium
Environmental Controls	none	significant	some	some	none	none	some
Thermal Requirements	LN ₂ ^b	elevated	none	high	LHe ^c	LHe ^c	high
Availability	under development	now	now Geo limited	now Geo limited	under development	under development	now

^a SMES = Superconducting magnetic energy storage

^b LN₂ = Liquid nitrogen

^c LHe = Liquid helium

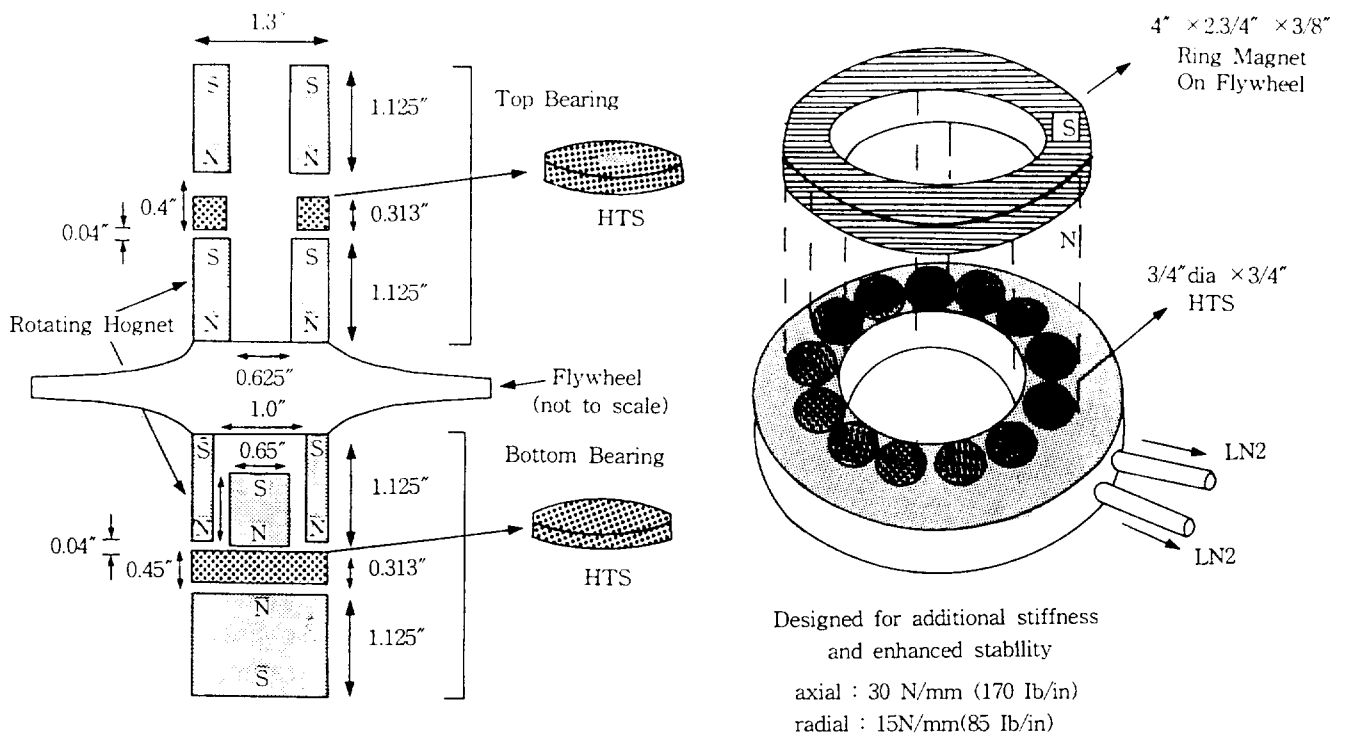


그림 5. Texas 연구소의 플라이휠

적으로 높다. 이러한 장점들을 이용함으로써 플라이휠 에너지 저장장치는 표 5에서 보는 바와 같이 여러분야에서 응용될 수 있다. 또한 전철의 전력저장, 컴퓨터에의 안정된 전류공급, 대용량설비(핵융합 tokamak 등)에의 순간적 전력공급, 그리고 대규모의 잉여전력 저장 등에도 사용될 수 있다.

4. 연구 현황

여러 선진국에는 용융공정된 초전도체를 이용하여 실험 단계적인 플라이휠의 설계, 제작 및 성능실험을 진행중이거나 완성하였고, 제2단계 목표로서 실용화를 위한 보다 큰 규모의 설계 및 제작에 대한 연구를 진행중이다. 일본 초전도공학연구소에서는 알루미늄으로 제작된 직경 30cm의 회전부를 33개의 초전도체로 약 1cm 부상시킨 후 분당 3600회의 속도로 회전시켜서 100wh의 전력을 저장하는데 성공하였다. 그들은 직경 3cm, 중량 500kg의 원반 회전시킴으로써 10kwh의 전력을 안정하게 저장할 수 있을 것으로 예상하고 있다.

일본 Shikoku전력회사와 Mitsubishi전기에서는 직경 6.45m, 무게 225t의 고합금 급속과 직경 6.7m, 무게 103톤의 CFRP

를 이용하여 각각 8Mwh의 저장능력을 가진 플라이휠을 설계중에 있다. 이 경우 모든 손실을 고려할 때 예상되는 에너지 효율은 하룻동안 84%가 가능할 것으로 보고되었다.

미국에서는 현재 Commonwealth전기와 Argonne연구소에서 2-5Kwh의 전력 저장능력을 가진 초기단계의 플라이휠을 개발하였으며 1997년까지 1-5Mwh 용량의 에너지 저장장치를 제작, 시험할 목표로 연구가 진행중이다[11]. Texas대학 초전도 연구팀에서는 플라이휠의 자기부상력과 안정성(stiffness)을 향상시키기 위해 2개의 초전도 플라이휠을 회전체의 상하단부에 설치하였다(그림 5). 상단부의 플라이휠에서는 초전도체와 영구자석 사이에 인력이 작용하고 하단부에서는 척력이 작용하도록 설계함으로써 자기부상력을 배가시켰다. 설계 제작된 플라이휠은 7×10^{-3} torr의 진공에서 19kg의 회전체를 2000rpm속도로 회전시킨 결과 시간당 에너지 손실은 5% 미만인 것으로 보고되었다. 현재 에너지 효율을 향상시키고 저장에너지의 용량을 증가시키기 위한 연구가 진행중이다. 독일 원자력연구소(KFK)에서는 용융공정으로 제조된 텅어리형 고온초전도체와 디스크형의 영구자석을 사용하여 1×10^{-5} mbar의 진공에서 1.6×10^{-9} 의 마찰계수를 나타내며, 40Hertz의 회전수에서 시간당 0.36%의 에너지가 손실되는 플라이휠을 제작하였다[10]. 또한 플라이휠 초기실험으로서 19x30cm의 회전체를

표 5. 플라이휠의 응용

에너지의 입출력주기	유지 시간	응용분야
비상시	장기간	디젤엔진 비상가동시 건물 등의 비상전원
각종 실험시	단기간	핵융합 실험 등의 순간적인 전력원
1~2 회/일	수시간~수십시간	양수발전저장의 대체
수~수십 회/일	수분~수시간	전기로, 밀링 기계
수십~수백 회/일	수분~수십분	전기자동차
수십~수백 회/일	수십초~수분	전기자동차 또는 자동차의 전원
계속	단기간	엔진, 압축기

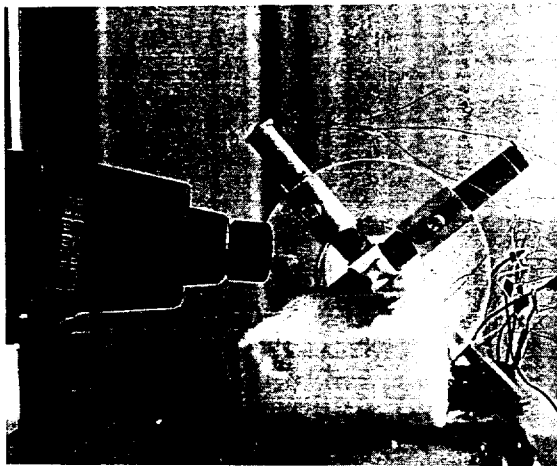


그림 6. 한국원자력연구소에서 개발된 초전도베어링

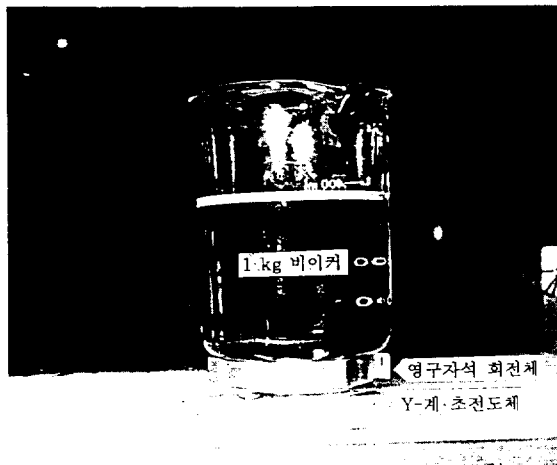


그림 7. 고온 초전도 위에서 1Kg 바이커의 부상

15000rpm으로 회전시켜 3.8Wh의 전력을 저장하는데 성공

하였으며, 현재 직경 20cm, 무게 10kg의 회전체를 50000 rpm의 속도로 회전시켜 총 에너지 용량 300Wh, 출력 10KVA의 플라이휠을 제작중이다.

국내에서도 플라이휠의 효율과 저장용량을 증가시키기 위한 연구가 진행되고 있다. 원자력연구소 초전도연구팀에서는 그림 6에서 보는 바와 같이 초전도 베어링을 제작하여 공기중에서 73500rpm의 회전속도를 기록하였다. 또한 그림 7에서 보는 바와 같이 지름 3.5cm, 두께 2.5cm의 초전도체를 제작하여 수kg의 알루미늄 회전체를 부상하는데 성공하였다. 현재 직경 30cm 이상의 알루미늄 회전 디스크를 진공에서 회전시킬 수 있는 초기단계 플라이휠 장치를 설계하여 제작중이며 2단계 목표로서 100kg 이상의 회전체를 이용한 플라이휠 장치의 설계와 개발을 추진하고 있다.

5. 결 론

고온 초전도체의 전류 통전능력과 자기부상 특성이 급속히 향상되어 수년내에 부분적으로 전력장치에 실용화가 가능해질 전망이다. 특히 Y-계 덩어리형 고온 초전도체를 이용한 플라이휠은 고에너지 효율의 전력저장 장치로서 환경보호 측면에서도 장점을 가지고 있으며 단기간 내 실용화가 가능할 것으로 판단된다. 미국, 일본 등에서는 고온초전도 플라이휠은 초기 실험단계인 성능실험을 통해 실용화의 가능성이 확인되었고 현재 2단계 목표로서 중대형의 플라이휠을 설계 제작하는 단계에 도달했다. 고온초전도체를 이용한 플라이휠이 효율적인 전력저장장치로서 실용화되기 위해서는 다음과 같은 문제점들을 개선하기 위한 연구노력이 계속되어야 한다.

- 1) 초전도체의 자기부상력의 향상
- 2) 고온 초전도체의 강도, 견고성, 그리고 내구성 향상
- 3) 영구자석의 자장 균일성 향상
- 4) 휠의 진동에 의한 전력손실 개선
- 5) 저밀도, 고강도의 재료 개발을 통한 에너지밀도 향상
- 6) 모터와 generator의 power 향상

참 고 문 헌

- [1] Jin, S. et al., Processing and Properties of High-Tc Superconductors, CH. 11, World Scientific Publishing Co., 1993.
- [2] Hull, J. et al., Revolutionary Bearing Creates Efficient Energy Storage Device, Logos, Vol. 12, No. 1, 1994.
- [3] Chen, Q. Y. et al., Hybrid High Tc Superconducting Magnetic Bearings for Flywheel Energy Storage System, submitted to J. Appl. Supercond., 1994.
- [4] 김찬중, 용융공정에 의한 bulk형 Y-Ba-Cu-O 초전도체 제조, 요업재료의 과학과 기술, Vol. 9, No. 2, 1994.

저 자 소 개

- [5] S. Jin, T. H. Tiefel, R. C. Sherwood, M. E. Davis, R. B. van Dover, G. W. Kammlott, R. A. Fastnacht and H. D. Keith, Appl. Phys. Lett. 52(1988) 2074.
- [6] C. J. Kim, et al., J. Mater. Res. 7 2349 1992
- [7] Nakamura, N., Flywheel Technologies and High-Tc Superconductor, ISTEK Journal Vol. 6, No. 1, 1993.
- [8] Superconductor week, Vol. 9, No. 2, 1995.
- [9] Higasa, H., Energy Storage Using Flywheels, ISTEK Journal, Vol. 7, No. 1, 1994.
- [10] Bornemann, H. J. et al., Low Friction in a Flywheel System with Passive Superconducting Magnetic Bearings, Applied Superconductivity, in print, 1994.
- [11] Abboud, R. G. et al., Flywheel Energy Storage Using Superconducting Magnetic Bearings, presented at the 56th Annual American Power Conference, Chicago, IL, April 27, 1994.



박해웅(朴海雄)

1984년 인하대학교 금속공학과 졸업.
1989년 일리노이대학 재료공학과 졸업(석사). 1994년 일리노이대학 재료공학과 졸업(박사). 1994년~현재 한국원자력연구소 위촉연구원.



김찬중(金讚中)

1983년 성균관대학교 금속공학과 졸업.
1986년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(석사). 1990년 한국과학기술연구원 재료공학과 졸업(박사). 1992년~1993년 미국 Notre Dame대학 전기공학과(Post Doc.). 1986년~현재 한국원자력연구소 선임연구원.



홍계원(洪啓源)

1978년 서울대학교 요업공학과 졸업.
1980년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(석사). 1983년 한국과학기술원 재료공학과 졸업(박사). 1983년~현재 한국원자력연구소 책임연구소(초전도재료 연구팀장)