

## 초전도 플라이휠 에너지 저장장치

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

### 1. 서 론

전력의 안정공급과 비용절감, 지구온난화 방지에 기여, 증가하는 부하변동의 흡수 등에 대응하는 초전도플라이휠에너지저장(SFES : Superconductor Flywheel Energy Storage)기술에 대한 기대는 높다. 초전도 기술은 전력 기술에만 아니라 제조업, 냉각산업 등 다른 업종의 기술을 크게 변화시키는 등, 장래에 큰 가능성이나, 파급효과를 갖는 기술이다. 아직 현시점으로서 한국의 초전도기술은 일본, 유럽과 미국에 대하여 조금 앞선 부분도 있지만, 많은 부분은 아직 따라가고 있는 실정이다. 그러나 초전도 플라이휠 저장기술면에서는 현재 선진국과 평균적으로 보면 대등한 수준이라 할 수 있다.

초전도 베어링의 개발 이전에도 전자석 베어링을 이용한 플라이휠 에너지 저장장치에 대한 연구 개발이 진행되고 있었다. 대표적인 예로 NASA에서는 우주항공용으로 330 Wh 급의 플라이휠 UPS를 개발 완료하였으며, Active Power 사에서는 20 kWh / 500 kW 급, Beacon Power사는 25 kWh / 100 kW급의 플라이휠 UPS를 상업화한 바 있다. 플라이휠 에너지 저장장치는 전기에너지로 모터를 돌려 회전체를 고속으로 회전시켜 회전에너지로 변환시켜 저장하였다가 필요할 때 발전기를 연결하여 전기에너지를 뽑아내는 방식을 사용하는 에너지 저장장치이다. 이를 구성하는 것은 회전할 수 있도록 베어링과 에너지를 저장할 수 있는 로터, 전기에너지에서 회전에너지, 또한 회전에너지에서 전기에너지로 변환할 수 있는 전동/발전기의 3 부분으로 되어 있다. 플라이휠 에너지 저장장치에서 중요한 것은 저장 에너지밀도와 변환효율 그리고 손실율이다.

기존의 전자석 플라이휠의 개발이 활발히 진행되는 상황에서 전자석 베어링의 대기전력에 의한 손실부분을 없앨 수 있을 것으로

예상되던 초전도 베어링을 이용하는 것은 어찌면 당연한 수순이었는지 모른다. 본고에서는 초전도 베어링을 이용한 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발에 대한 외국의 연구 현황과 국내 현황을 비교해 보고 앞으로의 개발 방향을 제시하고자 한다.

### 2. 초전도 플라이휠 에너지 저장 기술

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 불리며 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.

이러한 플라이휠 에너지 저장시스템에 저장할 수 있는 회전 운동에너지는 다음과 같이 표현된다.

$$E = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (1)$$

여기서 E는 저장되는 총 운동에너지 양이며 I는 관성모멘트이고,  $\omega$ 는 각속도 (rad/s)이다. 물체의 관성모멘트는 물체의 형태와 질량의 분포상태는 물론, 그 물체가 회전하고 있는 특정된 축에 의해서 달라지는데 여기서는 원통축에 관하여만 고려하여 볼 때,  $I = mr^2/2$ 이다. 그러므로 저장되는 총 운동에너지의 양을 다른 식으로 쓰면,

$$E = \frac{1}{4} m(r \cdot \omega)^2 \quad (2)$$

여기서  $m$ 은 회전체의 질량 (kg),  $r$ 은 반경 (m),  $\omega$ 는 각속도 (rad/s)이다. 그러므로 에너지 저장량은 회전체 무게에 직선적으로 비례하고, 회전속도와 회전체 직경에는 제곱에 비례한다. 따라서 에너지를 많이 저장하려면 무게를 증가시키기보다는 회전체의 크기(직경)를 크게 하는 것과 속도를 빠르게 하는 것이 더 효과적임을 알 수 있다. 회전체의 회전 속도 한계는 회전체의 직경과는 관계없이 회전시의 응력과 재료의 강도에 의해 결정된다. 종래에 플라이휠의 재료로 사용하던 일반금속은 재료의 인장강도가 약해 고속회전이 불가능하여 플라이휠 에너지 저장시스템의 고속화에 치명적인 약점으로 작용하였다. 그러나 최근 급격히 발전하고 있는 고강도 복합재료의 개발은 플라이휠의 선주속도를 1110 m/sec 이상으로 끌어올려 10만 RPM이상의 고속회전을 가능하게 하였고, 따라서 플라이휠의 단위 무게 및 단위 부피당 에너지 밀도를 획기적으로 증가시킴으로써 소형, 고출력의 에너지 저장시스템의 개발이 가능하게 되었다.

현재 실용화되고 있는 영구자석의 반발력을 이용한 베어링은 외부 자장하에서 자석, 즉 회전체의 안정화를 위하여 특수한 제어장치가 반드시 필요하다. 이 경우 베어링에 의한 마찰을 어느 정도 줄일 수 있으나, 결과적으로 자석 간의 마찰과 제어장치 등에 의한 에너지 효율 저하로 인해 시간당 최소한 1%, 즉 하루에 저장된 에너지의 약 25% 이상이 손실된다. 반면에 고온초전도체와 자석간의 부상력과 고정력을 이용한 초전도베어링의 경우 저장된 에너지의 손실은 시간당 약 0.1%, 즉 하루에 약 2%에 지나지 않는다.

초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 고효율·대용량화는 강한 부상력의 초전도 베어링, 회전손실저감, 장시간 운전을 가능케 하는 축 강하 방지, 진동제어, 고속 회전에 견딜 수 있는 복합재질의 설계 및 제조, 고출력의 전동/발전기 기술이 필요하다.

### 3. 연구동향

#### 3.1. 국외

미국에서는 플라이휠 관련 프로젝트에 많은 연구진들이 참여하여 우주산업분야에서부터 도심형 버스에까지 폭넓게 연구되고 있다.<sup>1)</sup>

초전도 베어링을 이용한 플라이휠 관련 프로젝트중 초전도 베어링 관련 기술 개발에 대한 연구는 주로 ANL(Argonne National Laboratory) 이 플라이휠 시스템 개발은 보잉사에서 주로 수행하고 있다. ANL에서 개발된 고온 초전도 베어링은 기존의 기계식 베어링에 비해 약  $10^{-7}$  정도, 전자석 베어링보다는 대략  $10^{-2}$  정도 낮은 회전손실 특성을 갖으며, 플라이휠 시스템에 적용시켜 하루에 2% 도 못 미치는 에너지 손실을 갖는 플라이휠 시스템을 개발하였다. 2% 에너지 손실은 플라이휠 시스템이 갖는 회전손실에 고온 초전도 베어링을 냉각시키는데 수반되는 모든 에너지 손실을 포함한 것이다. ANL은 보잉사와 공동으로 10 kWh / 3 kW 플라이휠 시스템과 요소별 설계를 하여 시스템을 구축하였다. 플라이휠은 stroke, composite rim and hub, lifting bearing, radial bearing과 stabilizer로 구성되어 있다.

ANL은 3 kW 플라이휠 시스템을 구성하여 spin test를 수행하였고 이와 더불어 spin test용 동적 모델을 개발하여 실험을 수행하기 전에 미리 플라이휠 시스템의 동특성을 예측하는데 사용하였다. 또한 시스템의 안정성을 평가하기 위한 방법으로 고속 회전하는 플라이휠을 touch down시킴으로써 플라이휠 시스템의 제어가 실패하였을 때의 현상과 그때의 안정성을 평가하였다. composite rim과 hub는 냉각 열박음 방식을 사용하였다. 10 kWh / 3 kW 플라이휠 시스템의 composite rim과 composite stroke로 구성된 rim과 hub는 13,600 rpm까지 성공적으로 회전하였다. 10 kWh / 3 kW 플라이휠 시스템에 사용된 모터/전동기는 4 pole로 구성되어있으며 radial gap이 큰 것이 특징이다. 모터/전동기 특성을 평가하기 위해 87,000 rpm에서 회전 특성 실험을 수행하였다. 출력은 3 kW이고 이때 발생하는 모터/전동기 손실은 45 W이다. 100 kW UPS 플라이휠 시스템에 적용될 모터/전동기 특성은 24,000 rpm에서 수행되었으며 출력은 100 kW이고 손실은 약 1.6 kW 정도였다.

Spin test와 touch down test 결과를 통해 각 요소별 디자인을 수정하였고 100 kW UPS 플라이휠 시스템을 구축하는데 활용하고 있다. Touch down test 결과를 바탕으로 ANL은 S-Bracket 안전챔버를 설계하여 100 kW

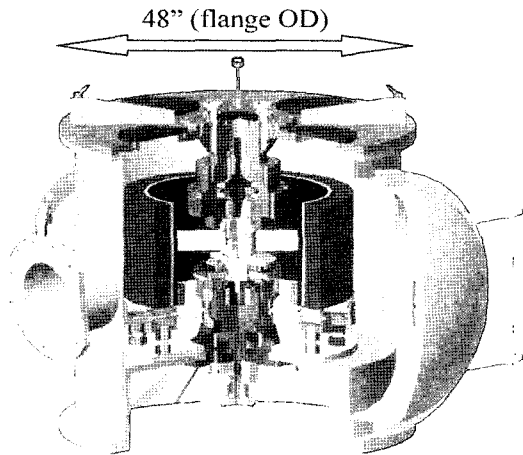


그림 1. Boeing 사의 10 kWh 부하평균  
화용 초전도 플라이휠 시스템

UPS 플라이휠 시스템용으로 개발하였고 개발된 안전챔버는 플라이휠 시스템을 더욱 안전하고 작은 사이즈로 구성하는 역할을 하게 되었다.

일본에서는 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)의 지원하의 국가적 과제로써 연구기관과 기업간 상호 협력하에 초전도 플라이휠 시스템에 대한 연구를 활발히 수행하고 있다. 일본은 데이터 백업 시장을 고려한 플라이휠 시스템 시장이 2010년에 25 조 엔이 될 것으로 예상하고 있다.

ISTEC과 중부전력은 현재 10 kWh급 초전도 플라이휠 시스템 시작품을 제작하여 직경 1 m에 무게 400 kg인 플라이휠 로터를 12,000 rpm까지 성공적으로 회전시킴으로써 대용량 초전도 플라이휠 시스템의 가능성에 대한 확신을 얻게 되었다.<sup>2)</sup> 10 kWh 급 초전도 플라이휠 시스템은 초전도 베어링과 두 개의 전자석 베어링, Carbon Fiber Reinforced Plastic으로 구성되어 있고 이에 사용되는 레디얼 방식 초전도 베어링은 10 N/cm<sup>2</sup>(71 K) 부양능력을 달성하였다. 초전도 베어링은 실린더 형태이며 직경 12 cm에 9 cm 높이를 갖는다.<sup>3)4)</sup>

독일은 Karlsruhe 연구소가 직경 20 cm, 무게 10 kg의 회전체를 50,000 rpm의 속도로 회전시켜 총 에너지 용량 300 Wh, 출력 10 kVA의 시제품을 제작하였다.

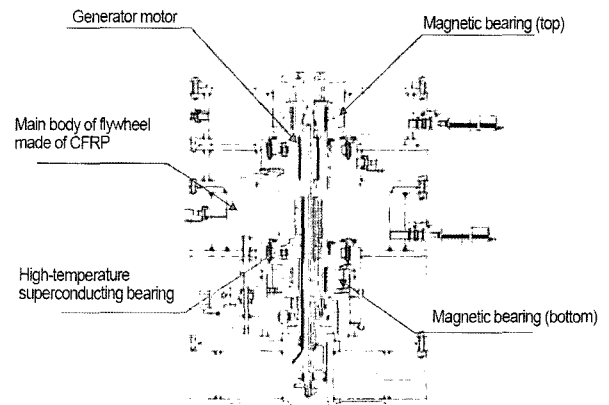


그림 2. 시코쿠전력의 10 kWh급 SFES  
모식도

### 3.2 국내

한국원자력연구소는 수직축 초전도 베어링을 이용한 소형 고온초전도 플라이휠을 제작하여 진공 중에서 10,000 rpm의 회전속도를 기록하였고 직경 30 cm, 13.5 kg 중량의 알루미늄 회전 디스크를 진공에서 무접촉 구동하여 15 Wh급의 플라이휠 에너지 저장장치를 제작한 바 있다.

한국기계연구원은 전자석을 베어링으로 이용한 15 Wh급 에너지 저장장치를 개발한 경험이 있다.

한전전력연구원은 1998년 초전도 베어링을 장착하여 직경 30 cm, 15 kg의 휠을 3,600 rpm 회전하여 7 Wh급 플라이휠 에너지 저장장치 시작품을 제작하였으며, 2000년 30 kg의 휠을 부양할 수 있는 초전도 베어링과 액체질소 자동공급 시스템, 1 mtorr 진공 그리고 40,000 rpm까지 구동하고 1 kW의 부하를 사용할 수 있는 무접촉 모타/발전기를 장착한 300 Wh급의 초전도 플라이휠 에너지 저장장치를 개발하였으며 현재 5 kWh급을 개발 완료하고 고속운전 테스트 중이다. 한전의 5 kWh 초전도 플라이휠 에너지저장장치의 특징은 영구자석 베어링을 사용하여 플라이휠의 하중을 지지하고, 초전도 베어링으로 안정된 부양 및 베어링의 역할을 하도록 구성되어 있어 초전도 베어링용 cryostat의 크기가 타 모델에 비하여 작고 그에 따라 열부하도 크게 감소시켜 전체 시스템의 효율을 대폭 향상시킨 것이다.

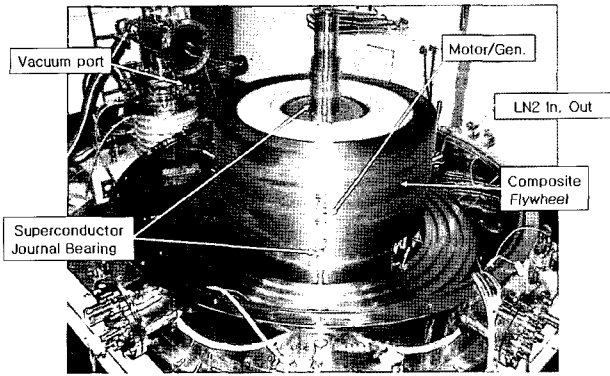


그림 3. 전력연구원의 5 kWh급 SFES 시스템

#### 4. SFES기술의 전망

##### 4.1. 경제적 전망

국내의 전력저장 도입 가능량을 예측하고 계획된 발전용량을 기초 데이터로 이용하면 전력저장 도입 잠재량 및 시장규모를 한전 내부 자료인 2015년까지의 제5차 장기 전력 수급계획과 장기 수요관리 계획에 근거하여 표 1과 같이 예측하였다. 대체에너지는 2010년에 충전원설비의 2%, 2015년에 2.5%를 점유한다고 가정하였다. 이 예측에 의하면 2015년에 플라이휠 에너지 저장장치의 시장규모는 1조 5천억원 그리고 2030년에 5조 2천억원 가량으로 될 것으로 전망된다.

##### 4.2. 기술적 전망

초전도 플라이휠의 주된 구성 요소는 초전도 베어링 외에 플라이휠 본체, 제어형 자기 베어링, 전동발전기, 전력 변환기, 터치다운 베어링, 진공 용기 등으로 이루어져 있다. 구조적으로는 아우터(outer) 로터(rotor)형의 고속 회전기라는 특징을 갖는다.

플라이휠은 경량·고속화를 도모하고 저장 에너지 밀도를 높이기 위해서 카본 섬유를 이용하고 있다. 현재 상태로서는 플라이휠 링(ring)과 회전축을 연결한 허브(hub)가 neck(neck)가 되어, 카본 섬유의 강도 한계 최대치까지 활용하지 못하고 있지만, 플라이휠 개발이 진행됨에 따라, 해결될 것이다. 이와 같이, 플라이휠 개발은 카본섬유를 회전기에 이용할 때, 복합 재료의 설계 기술과 동시에 그 성형·가공 기술을 확립시키고, 카본섬유의 새로운 시장을 개척함과 동시에, 재료 개발의 인센티브를 준다.

표 1. 한국의 전력저장 도입 잠재량 및 시장 규모

	시산방법	잠재도입 가능량 (만kW/만kWh)		시장규모(억원)		
		'10년	'15년	'10년	'15년	'30년
부하평준화	대규모 중간/첨두전원 설비의 5%	158	159	17,317	17,426	17,500
		1,264	1,272			
	중규모	403	482	44,169	52,827	61,500
소규모	404	444				
	대형냉방설비의 20%	404	444	44,278	48,662	53,000
		3,232	3,552			
peak cut	수요관리 목표의 30%	168	223	18,413	24,441	30,500
		1,344	1,784			
대체에너지 저장	대체에너지 설비의 50%	67.4	92.5	7,384	10,138	13,000
		539	740			
총계		1,200	1,401	131,520	153,550	175,500
		9,600	11,208			
초전도플라이휠 에너지저장 (2015년 전력저장의 10%, 2030년 30% 점유)		120	420	0	15,300	52,650
		960	3,360			
		초전도플라이휠 비용: 137,000원/kWh				

제어형 자기 베어링은 초전도 베어링으로 회전체 중량을 지지한 톤(ton) 단위의 중량물을 음속의 수배의 고속으로 안전하게 비접촉 회전시키기 위해 불가결한 기술이다. 플라이휠 제어에 수반한 회전 손실 절감 기술이 엄격하게 요구되어 제어의 로직(logic)을 포함한 저손실화 기술이 개발되지 않으면 안 된다. 이러한 기술에 의해 제어형 자기 베어링의 응용은 새로운 중량물에의 적용 확대와 에너지 절약화가 추진된다.

플라이휠의 전동발전기는 종래에 없는 고속 회전의 요구와 동시에 가동 중의 고효율과 비 가동 중(공전 대기 중)의 저손실이라고 하는 상반되는 성능을 요구되는 새로운 타입의 전동발전기의 개발이 필요하다. 또한, 아우터 로터형의 구조로 되어 있기 때문에 아우터 로터형 전동발전기의 대형기에 적용될 수 있는 길을 개척한 것이 된다.

전력변환기는 신형전지 전력저장이나 SMES와 함께 공통의 전력용 전자공학 기술이지만, 그 중에서도 가변속 제어기술에 속한다. 따라서 풍력 발전이나 가변속 양수 등의 가변속 기기에의 기술 파급이 예상되고, 전력

용 전자공학(power electronics) 시장의 확대에 따라 비용 절감에 연결되어 가는 것이 기대된다.

초전도 베어링의 이상 시에 플라이휠을 안전하게 정지시키는 역할을 하는 타치다운 베어링은 종래의 베어링의 한계인 DN (직경×회전수)값이 100 만을 초과하는 성능이 요구되어, 현재 상태의 타치다운 베어링으로는 대응할 수 없다. 이 때문에 새로운 타입의 타치다운 베어링의 개발을 재촉해 폭넓게 고속 회전에 있어서 안전성 확보에 기여한다. 그리고 저온 기술, 진공 기술은 초전도에 공통의 기반 기술이다. 초전도 플라이휠이라는 새로운 분야가 출현한 것에 의해 새로운 측면으로부터의 기술 개발이 되어 초전도 전력 기기에 요구되는 신뢰성이 확보되어 가고 있다.

이와 같이, 플라이휠 요소기술은 기존 재료의 새로운 응용 분야를 개척하고, 기존 기술이라도 종래의 사양을 초과한 새로운 성능 향상을 얻을 수 있기 때문에 기술 개발을 활성화시키고, 더 나아가서는 그러한 성과가 신규 산업 창출을 촉진시키는 효과가 있다.

현재 전력연구원에서는 실용화를 목표로 세계에서 최초로 100 kWh급 SFES를 개발하고 있으며 2010년에 개발이 완료되고 2015년에 상용화할 계획이다.

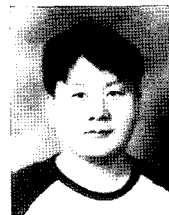
### 참고문헌

- [1] Robert Hebner, Joseph Beno, Alan Walls, "Flywheel batteries come around again. Kinetic energy storage will propel applications ranging from railroad trains to space stations", IEEE SPECTRUM, April, 2002
- [2] Naoki Koshizuka, "Feature articles on superconducting flywheel Prospects for the development of the superconducting flywheel", Superconductivity Web21, January 15, 2004, p15
- [3] Osamu Saito, "Feature articles on superconducting flywheel Technical development and prospects for ultra high - speed flywheels",

Superconductivity Web21, January 15, 2004, p16

- [4] Fumihiko Ishikawa, "Feature articles on superconducting flywheel Progress report on the technical development of the superconducting bearing", Superconductivity Web21, January 15, 2004, p17-18

### 저자이력



한상철 (韓相哲)

1987년 고려대학교 공대 금속공학과 졸업, 1990년 KAIST 재료공학과(공학석사), 1995년 KAIST 재료공학과(공학박사), 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원



한영희 (韓榮熙)

1984-1988년 서울대학교 무기재료공학과, 1988-1990년 서울대학교 무기재료공학과 석사, 1990-1997년 쌍용 중앙연구소, 1998년-현재 한전 전력연구원 선임연구원



정년호 (鄭年縞)

1990년 고려대학교 화학과 졸업, 1997년 고려대학교 환경공학과(공학석사), 1990년 한국전력공사, 1993년-현재 한전 전력연구원 선임연구원



성태현 (成台鉉)

1982년 한양대학교 공대 무기재료공학과 졸업, 1987년 동대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사), 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(공학박사) 1991- 92년 ISTEK 근무, 1992-95년 MIT Post. Doc. 현재 한국전력공사 전력연구원 수석연구원. 초전도그룹장