

## 한전의 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 개발 현황

한영희, 성태현, 한상철, 이준성, 김상준  
한전 전력연구원 전력계통연구실

### 1. 서 론

국내의 전력수요는 98년 한해 잠깐 줄어들었으나, 평균적으로 매년 10% 씩 증가하여 2010년에는 현재 수요의 2 배에 달할 것으로 예측되고 있으며, 이에 따라 발전·송전시설의 추가건설이 필요하다. 전기수요는 수요의 특성상 주간과 야간의 차이가 평균적으로 약 30% 정도 되며, 냉방설비의 이용이 증가하는 여름철에는 더욱 큰 차이를 나타내는데, 이를 모두 수용하는 발전용량을 확보하는 것은 경제적으로 낭비이며, 설비의 증대에도 어려움이 있다.

그러므로 변동하는 전력수요에 유연하게 대응하고 수요지점 근방에 분산배치가 가능한 환경친화적인 전력저장장치를 개발, 활용함으로써 이를 통한 원가절감 및 생산성향상을 추구하는 것이 시급하다고 판단된다.

현재 환경 친화적인 전력저장장치로 각광 받고 있는 것은 플라이휠 에너지 저장장치로, 전자석 베어링과 초전도 베어링을 사용하는 두 가지 기술이 있다. 전자석 플라이휠 에너지 저장장치는 플라이휠에너지 저장장치를 자석의 반발력으로 부양시키고, 전자석으로 구성된 active controller를 사용하여 중심에서의 이탈을 억제하며 운전하는 방법으로, 현재 약 10여개의 기업에서 UPS 용으로 상업화를 시도하고 있다. 그러나 active control에 전력이 사용되기 때문에 고온 초전도 베어링을 사용하는 고온초전도 플라이휠에너지 저장장치(superconductor fly-wheel energy storage system)에 비하여 상대적으로 저장효율이 낮을 것으로 판단되고 있다.

고온초전도 플라이휠 에너지 저장기술은 고온초전도체를 이용하여 마찰이 없는 무접촉 베어링을 제작하고, 이 베어링을 이용하여 전기에너지를 플라이휠의 회전 운동에너지로 저장하고 에너지를 마찰에 의한 손실이

없도록 유지하였다가, 발전하여 사용하는 방법이다.

고온초전도 플라이휠 에너지 저장기술의 장점은 에너지 저장효율이 90% 이상으로 타 저장방식에 비하여 매우 높고, 에너지 저장밀도도 높다는 것이다. 또, 양수발전기술이나 배터리 등 대부분의 에너지 저장기술들이 환경을 파괴하는 반면에, 고온초전도 플라이휠 에너지 저장기술은 환경 친화적이라는 특징을 가지고 있어, 세계 선진 각국에서도 활발히 연구가 수행되고 있다.

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 방식으로 한전 전력연구원에서 세계 최초로 개발한 바 있다.

### 2. 본 론

한전에서는 '98년부터 본격적으로 고온초전도 수평축 플라이휠에너지 저장장치의 개발에 착수하였으며, 2010년 이전에 100 kWh급의 실용화를 목표로 하고 있다.

한전의 개발상황을 언급하기 전에 간단하게 국내외의 개발동향을 살펴보고, 고온 초전도 플라이휠의 기술적인 개발 목표, 연구 진행상황, 앞으로의 연구방향과 경제성 평가에 대해 기술하겠다.

#### 1) 국내 연구개발 동향

국내에서도 고온초전도체를 베어링으로 사용한 플라이휠 에너지저장장치에 대한 연구가 1990년 중반부터 진행되어 왔다.

# 전력기술 심포지엄 특집

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

한국기계연구원은 전자석을 베어링으로 이용한 15 Wh급 에너지 저장장치를 개발하였으며, 아주대학과 연세대학 기계공학과에서 각각 초전도베어링의 형상설계 및 진동특성과 stiffness 특성을 연구 중이다.

서울대학과 충북대학교 전기공학과에서는 무접촉 회전, 발전코일 및 전력변환 장치에 대한 기술을 보유하고 있다.

## 2) 국외 연구개발 동향

### 가) 일본

일본 초전도 공학 연구소(ISTEC)에서는 고리형 영구자석을 부착한 직경 30 cm의 알루미늄 회전체를 33개의  $YBa_2Ca_3O_7$ (이하 YBCO) 초전도체위에서 약 1 cm 부상시킨 후 분당 3600 회의 속도로 회전시켜서 100 Wh의 전력을 저장하는데 성공하였다. 이 결과로부터 직경 3 m, 중량 500 kg의 원반을 회전시키면 10 kWh의 전력을 안정되게 저장할 수 있을 것으로 계산되었다.

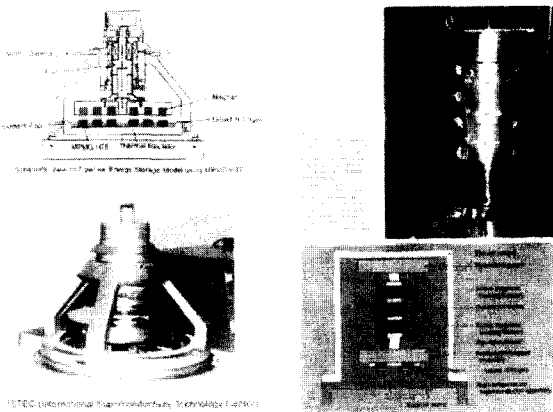


그림 1. 일본 ISTEC과 Shikoku 전력에서 개발 중인 플라이휠 에너지 저장장치.

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 MWh

의 저장능력을 가진 플라이휠을 설계 중에 있다. 이 경우 발생 가능한 모든 손실을 고려할 때 하루에 84%의 에너지 저장효율을 예상하고 있다.

### 나) 미국

미국에서는 Commonwealth 전력과 Argonne 국립연구소가 공동으로 2 - 5 kWh의 전력 저장능력을 가진 초기단계의 플라이휠 에너지 저장장치를 초전도베어링을 사용하여 개발하였으며 (1995년), 1997부터는 1 - 5 MWh 용량의 에너지 저장장치를 개발 중이다.

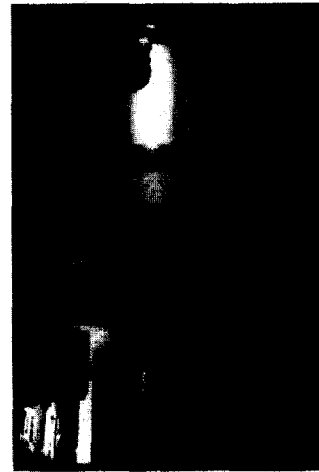


그림 2. Argonne 과 commonwealth가 개발하고 있는 플라이휠 에너지 저장장치.

Texas 대학 초전도 연구팀에서는 플라이휠의 자기부상력과 안정성(stiffness)을 향상시키기 위해 2개의 초전도 베어링을 회전체의 상·하단부에 설치한 hybrid형의 초전도 베어링을 제작하였다. 상단부에서는 초전도체와 영구자석사이에 인력이 작용하고 하단부에서는 척력이 작용하도록 설계함으로써 자기부상력을 배가시켰다.  $7 \times 10^{-3}$  torr의 진공에서 19 kg의 회전체를 2000 rpm속도로 회전시킨 결과 시간당 에너지 손실은 5% 미만인 것으로 보고되었다. 현재 500 MJ 용량의 플라이휠 에너지 저장장치를 개발하는 연구가 진행중이다.

또한 지난해 NASA와 USFS가 전자석 플라이휠을 60,000 rpm에서 성공적으로 운전하였다고 발표한 바 있는데, 이것은 전

자석 플라이휠과 초전도 플라이휠이 비슷한 회전체계를 사용하는 것에 비추어 중요한 연구 성과이다.

**다) 유럽**

독일 원자력연구소(KFK)에서는 용융공정으로 제조된 덩어리형 고온초전도체와 디스크형의 영구자석을 사용하여 초전도베어링을 제작하였다. 회전실험을 한 결과,  $1 \times 10^{-5}$  mbar의 진공에서  $1.6 \times 10^{-9}$ 의 마찰계수를 얻었으며, 40 Hz의 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.

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. 일본 신 에너지 산업기술 총합연구기구는 1999년까지 10 kWh 급의 플라이휠 제작을 완료하고 2000년 이후에는 상용화 규모인 10 MWh 급 전력저장장치를 제작하여 기존의 납축전지 등의 전력저장장치를 대체할 예정이다. 독일의 경우 1996년 현재 5 MWh 급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 개념설계를 완료하였다. 이 시스템은 0.5 MWh 저장용량을 가지는 직경 3.5 m인 휠 10 개를 수직으로 적층하는 방식으로 설계되었으며 총 중량은 30 ton이다.

**3) 한전 연구개발 결과 및 향후계획**

한전 전력연구원에서 제작된 플라이휠 총 에너지 저장장치의 에너지 저장용량은 선진국과 비교해 상대적으로 작지만, 기본적인 요소기술은 모두 확보하고 있다. 특히, 초전도 플라이휠 시스템의 핵심기술 중 하나인 고온초전도 베어링 제조에서는 세계최초로 수평축의 개념을 도입하고, 이를 이용하여 prototype을 제작하는 등 세계최고 수준의 기술을 보유하고 있다. 한전 전력연구원에서는 앞에서 언급한바와 같이 새로운 개념의

수평형 플라이휠 에너지 저장장치를 중점적으로 연구하고 있으며, 현재 300 Wh급의 에너지 저장장치의 개발을 진행 중이다.

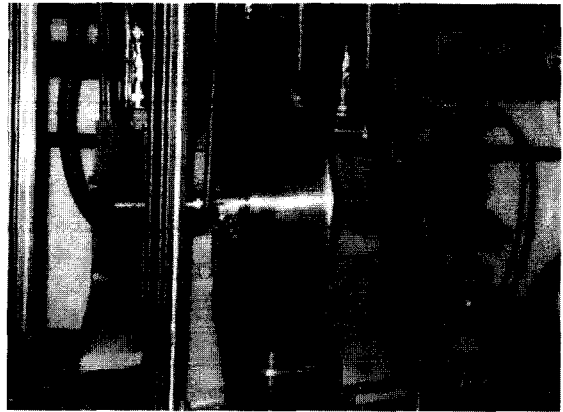


그림 3. 전력연구원이 개발한 7 Wh급 수평축 초전도 플라이휠 에너지저장장치

고온 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 제조기술은 고온초전도 베어링 기술과 회전체 설계 기술, 무접촉 전동/발전기 기술, 진공 시스템 기술, 냉각시스템 기술 등으로 구성되어 있다. 이중 회전체계 설계, 진공 및 냉각기술은 세계적으로 일정수준 이상으로 정립되어 있는 상황으로 시스템에 맞게 적용시키기 위한 연구가 요구된다.

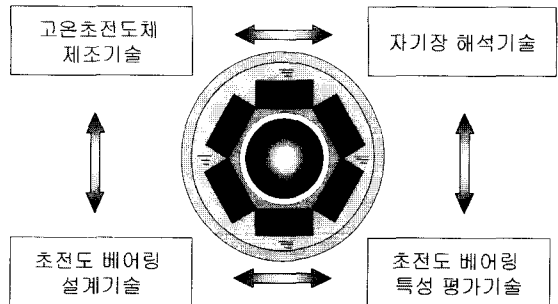


그림 4. 초전도베어링을 구성하는 기술요소

**가) YBCO 단결정 제작**

YBCO 고온 초전도 단결정은 베어링에서 회전자에 들어 있는 자석을 부양시키고, 중심에서 벗어나지 않도록 고정해 주는 역할을 하는 핵심 부품으로 보통 TSMG법(Top Seeded Melt Growth method)을 사용하여 제작한다.

YBCO 단결정은 강한 부상력을 갖도록

## 전력기술 심포지엄 특집

하는 연구와 대면적을 제작할 수 있도록 하는 두 가지의 연구를 진행하고 있다.

강한 부상력을 갖도록 하기 위하여 Y211 상의 분포를 조절하기 위한 분말조성을 개발하였고, 이를 바탕으로  $4 \times 4 \times 2 \text{ cm}^3$  크기의 고온초전도체를 제작한 바 있다. 그림 5는 제작된 YBCO 고온초전도 단결정의 모습이다.

또한 대면적의 결정을 비교적 짧은 시간안에 성장시키기 위하여, 다중자를 사용하여 고온초전도체를 제조하는 연구도 진행하였다.

향후  $8 \times 8 \times 2 \text{ cm}^3$  크기의 고온초전도체를 제조하고, 이를 확대 적용하여 원통형인 고온초전도 저어널 베어링에 적용될 곡률을 갖는 고온초전도체의 제조 등에 대한 연구를 진행할 계획이다.

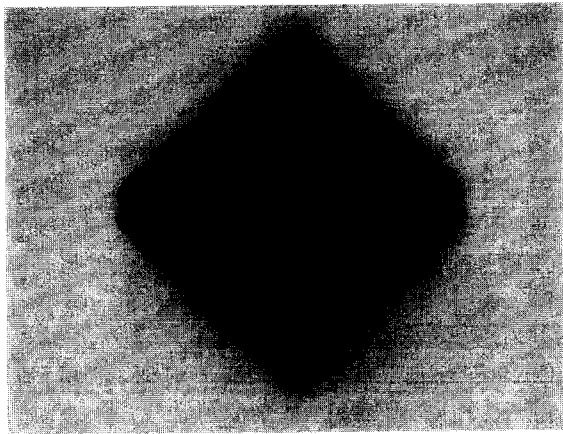


그림 5. TSMG법으로 제작한 YBCO 초전도 단결정 ( $4 \times 4 \times 2 \text{ cm}^3$ )

### 나) 자기장 해석 기술

고온 초전도 베어링의 작용은 자기력에 의한 것이므로, 회전자의 자기장 분포에 대한 연구는 필수적이다. 또한 자기장과 고온초전도체 사이의 작용력은 완전히 이론적으로 규명되지 않았으며 이에 관한 Anderson-Kim model 등의 여러 가지 모델이 제안되고 있는 형편이다.

현재 자석배열에 따른 자장 분포를 모사하고, 자체 제작한 3차원자장 측정장치로 측정된 값들과의 비교로 모사 변수들을 조정하는 작업을 진행 중이며, 향후 시·공간적 경계 조건과 확률에 의한 초전도 베어링의 자속확산(flux creep)과정을 수치 해석적으로 모사하고, 이 결과를 실측치와 비교하여 고온초전도체의 강자장 하에서의 자기적 거동

을 고온초전도체의 내부적 특성과 연계하는 연구를 계속 진행할 계획이다.

### 다) 초전도 베어링 설계기술

자기장 해석 기술과 관련하여 실제로 적용 가능한 초전도 베어링 모델은 강한 부상력과 고정력을 갖도록 고온초전도체와 영구자석을 배열하고, 영구자석과 고온초전도체의 위치설정 방법, 고온초전도체의 냉각방법과 냉매인 액체질소의 유로 확보방법, 베어링으로의 열침입을 차단하는 방법, 저온 진공실링 방법 등을 총체적으로 고려하여 설계되어야 한다.

지금까지의 연구성과로 하중지지능력 15 kg의 고온초전도 저어널 베어링을 설계 제작한 바 있으며, 그림 6의 결과와 같이 부상력을 더 높이기 위한 설계를 계속하고 있다. 향후 자기장 해석 연구 결과에 덧붙여서, 사용되는 재료들의 온도관련특성(thermal properties)에 대한 데이터 베이스를 확보하고, 극저온 환경에서의 문제 발생 요인을 제거하고 열 전달에 의한 효율 저하를 최소화할 수 있도록 설계를 최적화하는 방향으로 진행할 계획이다.

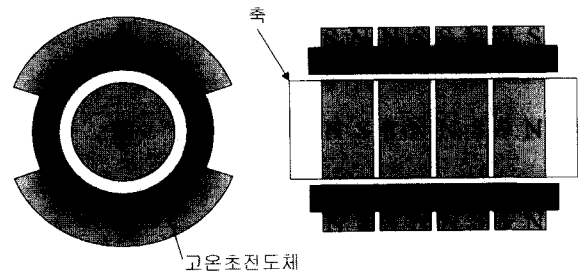


그림 6. 고온초전도 베어링의 설계 예.

### 라) 초전도 베어링 특성평가

초전도 베어링은 벌크 고온초전도체와 자석과의 상호 작용에 의해 작동된다. 이 기술은 자석에서 발생하는 자기장을 고온초전도체가 포획 또는 배척하는 원리에 의한 것이므로, 강자장 하에서의 고온초전도체의 자기적 거동 특성에 의해 기존 베어링과는 다른 특징을 띠게 된다. 그 특징은 베어링의 복원력이 초전도체를 냉각하는 시점에서의 회전자 위치에 따라 달라진다는 것과, 베어링 회전자의 거동에 따른 이력 특성(hysteresis)이 나타

난다는 것으로 요약될 수 있다. 이러한 성질은 초전도 베어링 각각의 고유한 특성을 이루며 베어링 성능의 가장 중요한 지표가 된다.

현재 로드셀 장비를 이용하여 초전도 저널 베어링의 복원력-이동거리 관계와 이력 특성을 초기 냉각 위치에 따라 측정하는 방법으로 초전도 베어링이 작동할 수 있는 모든 방향에 대해 적용하여 베어링의 특성을 규정하고 있으며, 또한 시험 회전체에 베어링을 연결하여 동적 특성을 평가하는 연구를 진행하고 있다.

또한 이러한 회전 실험을 통해 진공 중에서의 회전체 속도 감소율을 측정하여 초전도 베어링의 마찰 계수를 얻을 수 있으며, 이 결과를 베어링 자기장 측정치와 비교 분석하여 베어링의 회전 손실 기구를 파악할 수 있다. 이렇게 얻은 이론을 통해 회전 속도와 하중에 따른 초전도 베어링의 특성을 예측하여, 최종적으로 적용 대상 기기의 성능 및 효율을 추정하고 이에 따른 설계의 최적화 방안을 확립할 계획이다.

**마) 기타**

회전체계 설계기술, 무접촉 전동/발전기 기술은 기계식 플라이휠에너지 저장장치의 제작경험이 있는 한국기계연구원에 위탁개발하고 있으며, 그 결과 그림 7과 같이 300 Wh급의 복합재 회전체를 설계 제작하였으며, 국내 최초로 4극 할바크 배열의 무접촉 전동/발전기를 제작하였다.

그림 8은 제작된 내전형 4극 할바크 전동/발전기 고정자의 자속 분포를 나타낸 것이다. 그 외의 진공시스템과 냉각시스템은 자체 설계하여 전문업체에 의뢰하여 제작하였다.

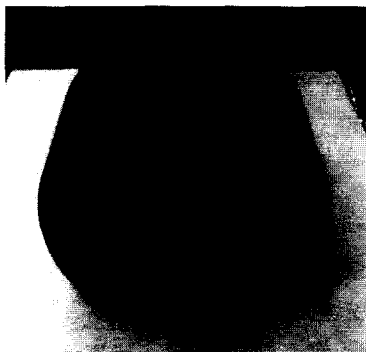


그림 7. 300Wh급 플라이휠에너지 저장장치에 사용된 복합재 휠 시제품

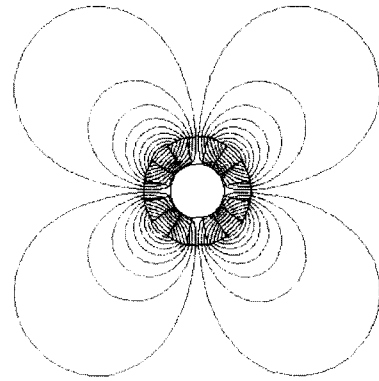


그림 8. 300 Wh급에 사용된 내전형 4극 할바크 전동/발전기 고정자의 자속 분포.

**바) 전력저장장치 제작**

이러한 연구결과들을 종합하여 30kg의 휠을 부양할 수 있는 초전도 베어링과 액체 질소 자동공급 시스템, 1 mtorr 진공 그리고 33,000 rpm까지 구동하고 1 kW의 부하를 사용할 수 있는 무접촉 모터/발전기를 장착한 300 Wh급의 초전도 플라이휠 에너지 저장장치(그림 9)를 제작하여 성능시험 중이다.

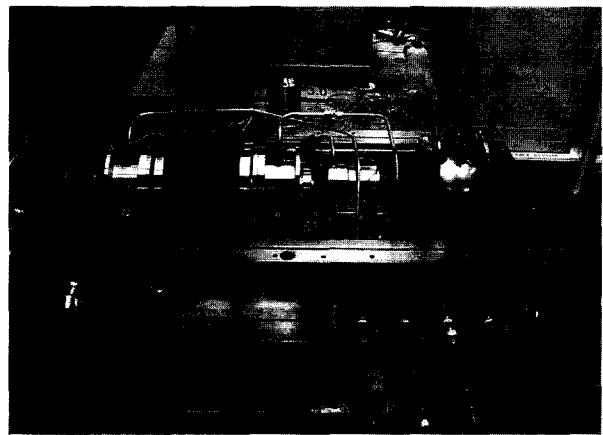


그림 9. 한전 전력연구원이 개발한 300Wh급 수평축 초전도플라이휠 에너지저장장치.

300 Wh급에 사용한 T800/2500의 복합재휠은 직경 296 mm, 길이 160 mm이며, 전체 회전체 무게는 27.71 kg이고 길이는 550 mm이다. 최고 운전속도는 40,000 rpm까지 가능하며, 350 Wh 이상의 에너지가 저장된다. 회전체는 1,500 rpm이하에서 2개의 강체 공진점을 통과하며, 1차 굽힘 공진점을 만날 때까지 안정된 거동을 보일

것으로 예측되었다.

현재까지의 플라이휠 에너지 저장장치의 측정결과를 종합적으로 나타낸 것이 그림 10으로 베어링의 진동을 측정된 결과를 나타낸 것이다. 20,000 rpm까지 50  $\mu\text{m}$ 이하의 진동만을 보이는 매우 안정된 회전을 하고 있음을 알 수 있다.

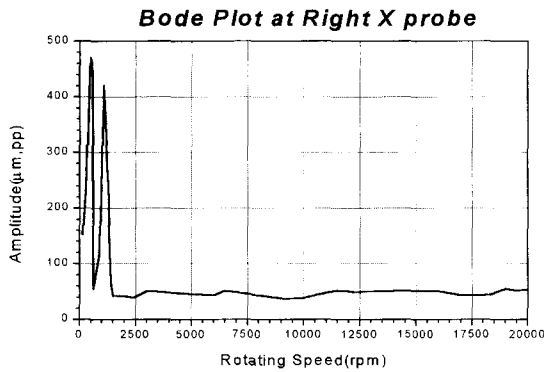


그림 10. 베어링 X 신호에 대한 Bode Plot

#### 4) 경제성 평가

개발 완료 시점의 고온 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 경제성을 평가하였다. 국내에서 사용하는 것을 전제로 하고, 한전의 전기료를 기준으로 하고, 에너지 저장장치의 효율이 90%, 할부비가 0.2(회수기간 5년), 출력 55 kW에 8시간 방전할 수 있는 440 kWh급 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 경우 경제성 있는 투자비는 약 180,492 원/kWh이다.

표 4. 450kW 출력의 450kWh 유효저장(총 600kWh 저장용량)을 갖는 초전도 플라이휠 시스템의 추정 비용 (단위: \$)

Flywheel rotor (\$3/lb graphite composite)	28,000	33,600,000
Motor/Generator (\$4/kW)	1,800	2,160,000
Power Electronics (\$20/kW, Switched among 10 flywheels)	900	1,080,000
Superconductor Bearing	16,667	20,000,000
Miscellaneous Structure	2,000	2,400,000
Assembly	2,000	2,400,000
Total	51,400	61,680,000
Approximate Energy Storage cost is \$114/kWh, ₩137,000/kWh		

고온초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 제조 단가는 45kWh급 10대를 1 unit로 하여 필요한 부품들의 대량 생산시의 가격을 개발완료 시점의 가격으로 추정하여 이것을 기준으로 kWh당 초기 설치비를 산출하였다.

그 결과 초기 설치비는 137,000 원/kWh으로 미국 오크리지 국립연구소에서 조사한 전자석 플라이휠 저장장치의 설치비 130,800 원/kWh에 비해서는 약간 높으나, 경제성 있는 투자비 180,492 원/kWh 보다는 낮으며, 에너지 저장효율이 상대적으로 높기 때문에 유지비 측면에서는 전자석 플라이휠에 비해서도 경제성은 높다. 이외에도 플라이휠 에너지 저장장치에는 기본적으로 무정전 전원장치 기능과 power conditioner 기능이 있기 때문에 고가의 중요장비를 사용하는 업체의 경우 전기료 절감 이득 보다 무형의 더 큰 이득을 볼 수도 있다.

### 3. 결 론

지금까지 초전도 플라이휠 에너지 저장장치의 원리와 세계 각국의 개발동향, 한전 전력연구원의 개발 현황 및 향후 연구계획에 대하여 간략히 기술하였다.

종합하면 한전 전력연구원에서는 상대적으로 안정성이 우수한 수평축형의 모델을 독자적으로 개발하고, 이의 실현을 위한 연구를 진행하여, 현재 300 Wh 이상의 전력을 저장할 수 있는 에너지 저장장치를 제작 완

료하여 성능 측정 중에 있다.

향후 2003년까지 10 MJ(≒3 kWh)급의 에너지 저장장치를 제작 완료하고, 2010년까지 100 kWh급의 에너지 저장장치를 제작할 계획이다.

이렇게 개발된 초전도 플라이휠 에너지 저장장치 기술은 선진국과 대등한 기술수준이 될 것이고, 초전도 베어링의 기반기술인 초전도 단결정 제조기술, 자기장 해석기술, 특성평가 및 해석기술 그리고 베어링 설계기술 수준을 동반 향상시킬 것이다. 또한 개발된 초전도 베어링 기술은 플라이휠 에너지 저장 분야에의 응용뿐만 아니라 초전도체와 자석간 상호작용을 근본 원리로 하는 자기부상 수송 분야 등에도 적용될 수 있을 것이다.

### 저자이력

#### 한영희 (韓榮熙)



1965년 8월 1일 생, 1988년 서울대학교 무기재료학과 졸업(학사), 1990년 서울대학원 무기재료학과 졸업(석사), 현재 한국전력공사 전력연구원 선임연구원.

#### 성태현 (成台鉉)



1959년 10월 9일 생, 1982년 한양대학교 공대 무기재료공학과 졸업, 1987년 동대학원 무기재료공학과 졸업(공학석사), 1991년 동경공업대학 재료과학 전공(공학박사), 1991 - 92년 ISTEEN 근무, 1992-95년 MIT Post. Doc., 현재 한국전력공사 전력연구원 책임연구원.

#### 한상철 (韓相哲)



1965년 8월 1일 생, 1988년 서울대학교 공대 무기재료학과 졸업, 1990년 동대학원 무기재료학과 졸업(공학석사), 현재 한국전력공사 전력연구원 근무.

#### 이준성 (李峻誠)



1972년 2월 14일생, 1995년 포항공과대학교 물리학과 졸업, 1997년 동 대학원 물리학과 졸업(석사), 현재 한전 전력연구원 일반연구원.

#### 김상준 (金相俊)



1951년 2월 7日生, 1986년 서울産業大學校 電氣工學科卒業, 1987년 發送配電技術士, 1991년 서울大學校 大學院 電氣工學科 卒業(碩士), 1993년 科學技術處長官賞(蔣英實賞), 1999년 高麗大學校 大學院 材料工學科 卒業(博士), 1976년 ~ 現在 韓電 電力研究院 電氣利用技術그룹장/責任研究員