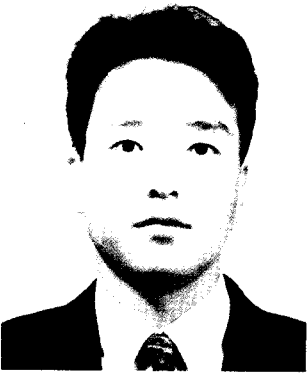


## 고속 플라이휠 에너지저장기술의 개발현황 및 전망



최 상 규(KIMM 구조시스템연구부)

- '79 - '83 한양대학교 기계공학과(학사)
- '84 - '85 한국베어링 연구실(사원)
- '86 - '88 미국 Texas A&M univ. 기계공학과(석사)
- '88 - '92 미국 Texas A&M univ. 기계공학과(박사)
- '93 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

### 요약문

플라이휠 에너지 저장시스템은 입력되는 잉여 전기에너지를 플라이휠의 관성을 이용, 회전 운동에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기에너지로 순시에 출력하는 장치로 배터리와 같은 화학적 에너지 저장장치에 대비되는 기계적 에너지 저장방식 (Electro-mechanical Battery)이다. 플라이휠 시스템은 많은 에너지를 단시간에 저장하고 이를 순발적으로 활용할 수 있는 고효율, 장수명, 무공해의 청정 에너지저장/재생장치로 선진국에서는 무공해 교통수단(전기자동차 등)의 차세대 보조 동력원을 비롯한 각종 민수용, 국방용으로의 응용연구가 활발히 진행되고 있다 (전력저장용, 인공위성의 태양광 에너지 저장 및 자세제어용, 무소음 적진침투용 차세대 전차의 보조동력원 등). 고효율의 에너지 저장 및 재생을 위해 플라이휠 에너지 저장시스템은 크게

- 고속화, 고에너지저장을 위한 복합재 플라이휠 로터
- 공기 마찰손실 저감용 자가 진공펌프 (Self Vacuuming system)
- 지지부 접촉마찰로 인한 에너지 손실 저감용 자기베어링/제어부
- 플라이휠 구동 및 발전을 위한 Motor/generator
- 고효율 에너지 입출력 제어부

등의 첨단기술부품으로 구성되어 있는 바, 본 논문에서는 이러한 플라이휠 에너지 저장기술의

국내의 개발현황을 소개하고 현재까지 파악된 기술적 문제점 및 향후 기술개발 전망에 대해 논하고자 한다.

### 1. 서론

플라이휠 에너지 저장시스템 (Flywheel energy storage system)은 에너지를 효율적으로 사용하기 위해 현재 선진 각국에서 연구 및 개발이 활발히 진행중인 환경친화적 제품의 하나로, 잉여 및 소실에너지의 저장을 통한 에너지 절약효과, 무공해 에너지의 재생을 통한 환경 보호효과가 화학전지(chemical battery)와 같은 타 에너지 저장 시스템에 비해 월등히 뛰어난 시스템으로서, 개발시 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) - 복합재휠 설계 및 제작기술, 고속회전체 설계 및 제어기술, 손실저감을 위한 자기베어링 설계 및 제작기술, 진공기밀 기술등 -의 미래지향적 에너지 저장시스템이기 때문에 고부가가치의 제품화 및 산업계로의 기술과급효과가 매우 큰 제품이다.

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

라이휠 전지(Flywheel Battery)라고 불리우며 그림 1과 같이 입력되는 잉여 전기에너지를 플라이휠의 회전운동에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기에너지로 출력하는 장치로서 크게

- 고속화, 고에너지저장을 위한 복합재 플라이휠 로터
- 공기마찰에 의한 에너지 손실 저감용 자기진공 시스템
- 지지부 접촉마찰로 인한 에너지 손실 저감용 자기베어링/제어부
- 플라이휠 구동 및 발전을 위한 Motor/generator
- 고효율 에너지 입출력 제어부로 구성되어 있다.

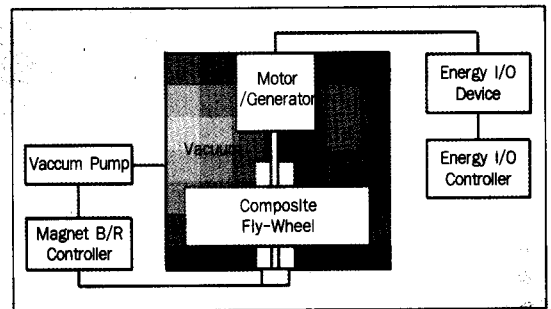


그림 1. 플라이휠 에너지 저장시스템의 구성도

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

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

윗식에 있는 바와 같이 플라이휠에 저장되는 에너지는 플라이휠의 극관성모멘트 I에 선형적으로 비례하고 플라이휠의 크기보다는 회전속도의 증가가 매우 효과적임을 알 수 있다. 그러나 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 플라이

휠의 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.

복합재의 개발과 함께 플라이휠 에너지 저장시스템의 개발을 촉진시킨 것은 비접촉식 베어링인 자기베어링의 발전이다. 자기베어링은 기존 접촉식 구름베어링의 최대 단점인 접촉마찰에 의한 에너지 손실 문제와 진공상태에서 발생하는 윤활제의 Outgassing 문제를 해결함으로써 플라이휠 에너지 저장시스템의 에너지 저장효율을 90%이상으로 끌어 올리는 견인차 역할을 하고 있다.

플라이휠 에너지 저장시스템에서 가장 핵심은 플라이휠을 구동하여 입력되는 전기에너지를 플라이휠의 회전운동에너지로 저장하였다가 필요시 전기에너지로 출력하는 전동발전기(Motor/Generator)라고 할 수 있다. 플라이휠 시스템에서의 전동발전기는 특성상 소형이어야 하며 또한

고출력이어야 한다. 최근 Nd-Fe-B등 자속밀도가 높은 희토류 계통의 영구자석이 개발됨으로 이러한 설계조건을 만족시키는 소형, 고출력의 전동발전기가 개발 가능해져 플라이휠 시스템의 출력 밀도(Power Density : W/kg)가 높아지고 이에 따라 전력저장과 같은 민수용에서 순간적 펄스파워가 필요한 레일건 등의 국방용으로 그 응용범위가 확장되어 가고 있는 추세이다.

이러한 부속기술의 개발 및 발전에 따라 플라이휠 에너지저장 시스템은 같은 기계적 에너지 저장장치인 양수발전이나 화학적 에너지 저장장치인 화학전지(Cheical Battery)에 비교해서 에너지 저장효율이 매우 높으며(표 1 참조), 순시충방전이 가능하고 장수명이며, 화학전지와 달리 저온에서 상대적으로 성능저하가 없다는 장점을 가지게 되어 선진국에서는 에너지 저장용, 전기자동차, 하이브리드 전기자동차의 보조동력원 등, 다양한 형태로 연구가 진행되고 있으며 국내에서는 한국기계연구원 등에서 UPS용 500Wh급 플라이휠 에너지 저장시스템의 기반기술연구를 수행하고 있다.

표 1. 에너지 저장시스템의 장단점 비교 분석

구 분	플라이휠저장	화학전지저장	양수발전
에너지 저장효율	90% 이상	70~80%	60~70%
가용에너지 밀도	~200wh/kg	30~40wh/kg	6~9wh/kg
충전·방전속도	충전·방전속도의 조절가능	충전시간이 길다 (Several hours)	-
수 명	반 영구적	4~8년	반 영구적
입출력 형태	전기적 또는 기계적 입출력	전기적 입출력만 가능	전기적 입출력만 가능
Current Type	DC/AC	DC	AC
에너지보존기간	6~12months.	-	반 영구적
환경 평가	- 무공해 - 입지절약형	- 누설시 오염물질 배출 - 입지절약형	- 환경에 영향 - 입지제한형
용지면적(m <sup>2</sup> /Mwh)	7	10~45	~640
특 징	- 복합재기술, 자기 B/R기술, 진공기밀기술, 고속회전체 설계기술등 산업전반에 파급효과가 큰 첨단기술의 집약형		

2. 플라이휠 시스템 연구개발 현황

2.1 국외 연구개발 현황

미국, 일본, 독일 등의 기술선진국에서 개발하고 있는 플라이휠 에너지 저장시스템은 크게 1) UPS 또는 잉여 전력의 저장과 같은 순수 에너지 저장용과 2) 전기자동차, 전차, 또는 Hybrid 전기자동차 등의 보조동력원 및 회생제동용으로 쓰이는 수송기계용의 2가지 용도로 구분할 수 있다. 각 용도별 선진국의 개발현황은 다음과 같다.

2.1.1 에너지 저장용 플라이휠 시스템

1) 플라이휠 무정전 전원장치

무정전전원장치(Uninterruptable Power Supply)는 낙뢰등에 의한 정전, 부하변동에 따른 순간 전압저하등의 상용전원의 사고에 대응해서 시스템을 보호하기 위한 Back-up 장치로 최근 우리 사회의 급격한 정보화로 날로 그 사용이 증가하고 있는 컴퓨터 시스템과 사무자동화(Office Automation : OA) 및 공장자동화(Factory Automation : FA) 기기의 비상전원장치로 사용되고 있다. 특히 최근에는 전원전압의 변동에 민감해서, 불과 천분의 일초의 순간적 전압저하에도 정지 또는 오동작해서 데이터 소멸의 위험이 있는 정보, 통신 네트워크의 급속한 보급에 따라 수요가 확대되고 있어 일본의 경우 90년도 기준으로 약 500억엔의 UPS시장이 형성되어 있으며, 특히 미국의 경우는 92년도 Wall Street Journal에 의하면 이러한 전력전압의 변동으로 인한 산업계의 손실이 연간 120억불(한화 약 10조원)을 상회하는 것으로 보고되고 있다.

무정전 전원장치는 에너지 저장방식에 따라 크게 화학전지 방식과 플라이휠 방식으로 나눌 수 있는데 현재는 일부 실험용을 제외하고는 화학전지 방식이 대부분이다. 그러나 플라이휠 방식은 화학전지 방식과 비교해 긴 수명, 저손실형의 에

너지 저장방식으로, 저공해, 고효율, 저렴한 유지 보수비용의 특징을 갖고 있으며, 중량과 부피가 동급의 화학전지 방식에 비해 약 1/2-2/3에 불과해 일본에서는 미스비시와 관서전력, 그리고 장강기술대학 공동으로 개발, 상용화를 시도한 바 있으며 (그림 2, 주철제 로터, 12000rpm, 2Kva), 미국의 경우, Lawrence Livermore National Lab에서 최대저장에너지 3Kwh, 90,000 rpm의 UPS를 개발, 연구소 전산시스템에 사용중에 있고 (그림 3) 현재 이 기술을 이용하여 Westinghouse와 공동으로 최고출력 100Kw급의 공장용 전압제어장치를 개발중에 있다. 또한 미국 Boston에 위치한 Satcon Technology사는 2Kwh급의 플라이휠 UPS를 개발, 미국 최초로 상용화에 성공하여 케이블 TV 및 무선통신회사를 상대로 시판중에 있다(그림 4).

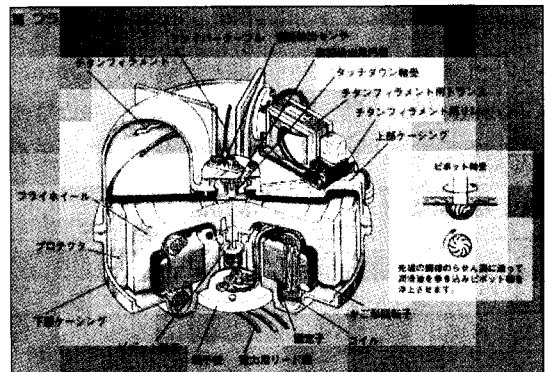


그림 2. 미스비시 플라이휠 무정전 전원장치

2) 인공위성의 에너지 저장

인공위성이 궤도에 올려진 후 그 기능을 제대로 수행하기 위해서는 지속적인 에너지의 공급이 필요하다. 이를 위하여 인공위성은 태양전지판(solar pannel)을 장착하여 사용하나 궤도운행 특성상 궤도 공전주기의 반주기는 태양에너지를 사용할 수 없게 된다. 따라서 모든 인공위성은 태양에너지를 저장하여 사용하는데 화학전지는 수명이 짧고, 에너지 밀도가 작아 인공위성의 소형화, 장수명화에 장애가 되어 왔다. 이러한 화학전

지를 이용한 에너지 저장시스템의 단점을 보완하기 위해 미국의 NASA와 Satcon Technology, Maryland대학, 프랑스의 Aerospatiale 등은 에너지밀도가 높고 수명이 반영구적인 플라이휠 에너지 저장시스템을 개발, 현재 사용중에 있다. 특히

Aerospatiale에서 개발한 플라이휠 시스템은 80년대에 발사된 인공위성에 탑재되어 95년 현재 10년이상 사용되고 있음이 보고되고 있다. 그림 5는 미국 항공우주국과 Maryland대학이 공동으로 개발중인 90000rpm, 0.5Kwh급 플라이휠 에너지

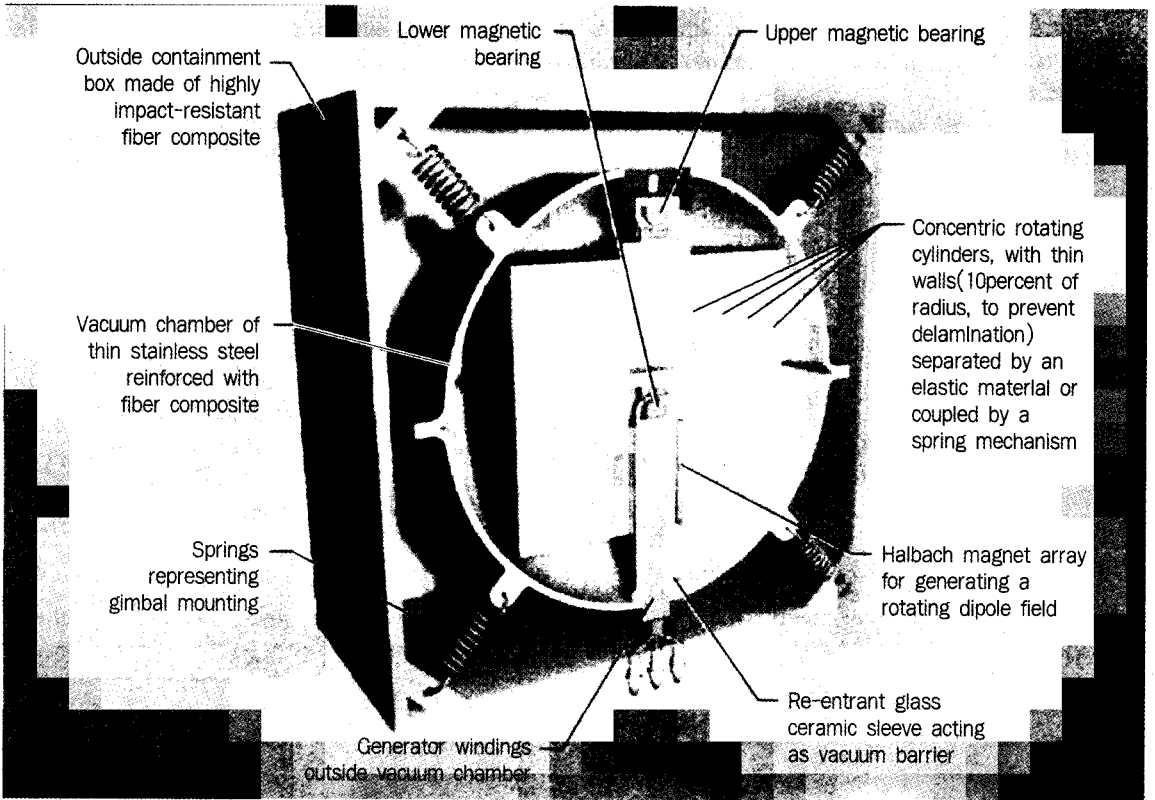


그림 3. LLNL back-up용 플라이휠 전원공급장치

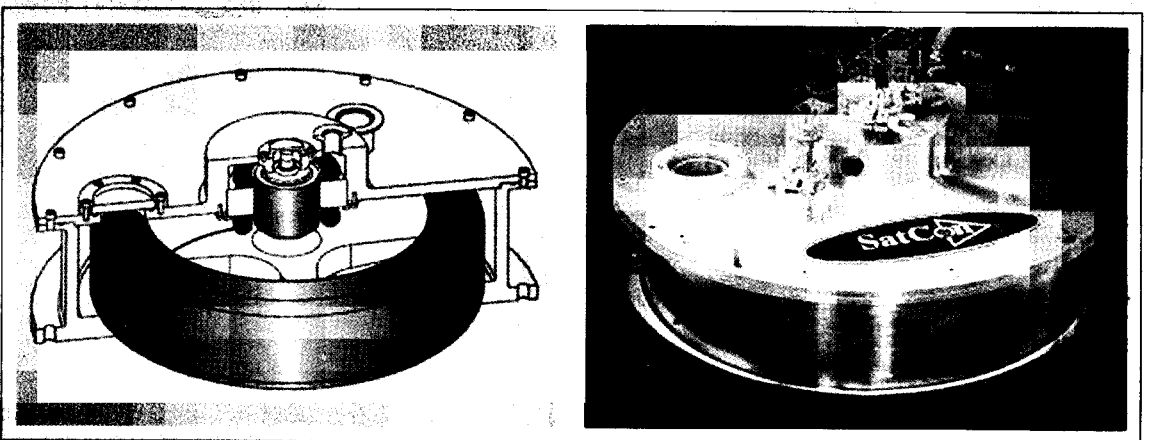


그림 4. Satcon 플라이휠 무정전 전원장치(속도미상, 2Kwh)

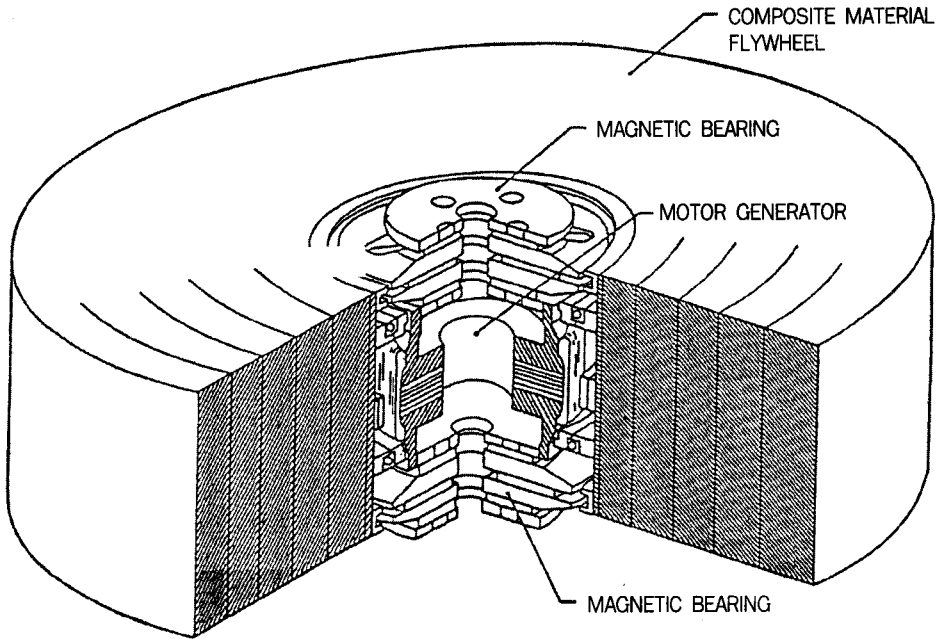


그림 5. 인공위성용 플라이휠 에너지 저장장치

저장시스템을 보여주고 있다.

### 3) 핵융합 발전용 펄스파워 발생기

일본 원자력연구소에서 1985년 가동을 시작한 Tokamak unit JT-60는 10분 동안 자장코일에 12GJ의 에너지가 공급되어야 한다. 이러한 대용량의 에너지를 전량 시스템 전원으로부터 공급하려면 필연적으로 전력전압의 섭동을 유발하게 되어 신뢰성있는 실험을 기대하기가 매우 어렵다.

따라서 JT-60 시스템은 최대출력 215MVA, 출력에너지 4020MJ, 회전속도 600rpm의 플라이휠 에너지 저장장치를 시스템 전력과 혼합하여 사용, 실험을 하고 있다. 플라이휠의 직경은 6.6m, 무게는 650t이며 재질은 Forged Carbon Steel이다(그림 6).

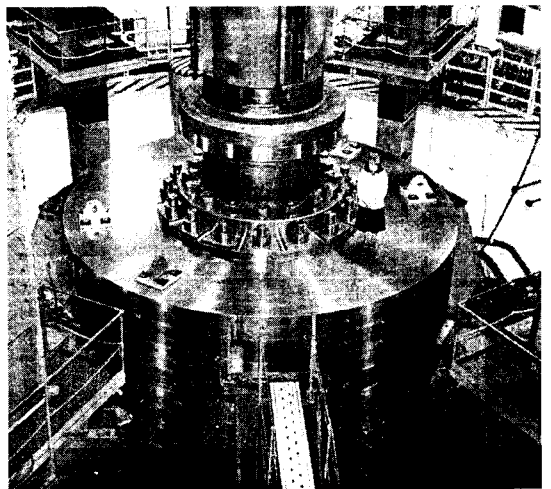


그림 6. 일본 원자력연구소 Tokamak JT-60용 플라이휠 파워 발생장치

독일 스투트가르트의 Neoplan사가 제작한 노면전차(그림 7)는 제동시 소실되는 에너지를 플라이휠 에너지 저장시스템을 채택, 회수하고 있다. 이 노면전차는 브레이크를 걸면 약 400Lb (180Kg)의 플라이휠을 회전시켜 여분의 운동에

## 2.1.2 수송기계용 플라이휠 시스템

### 1) 노면전차의 제동에너지 회수용

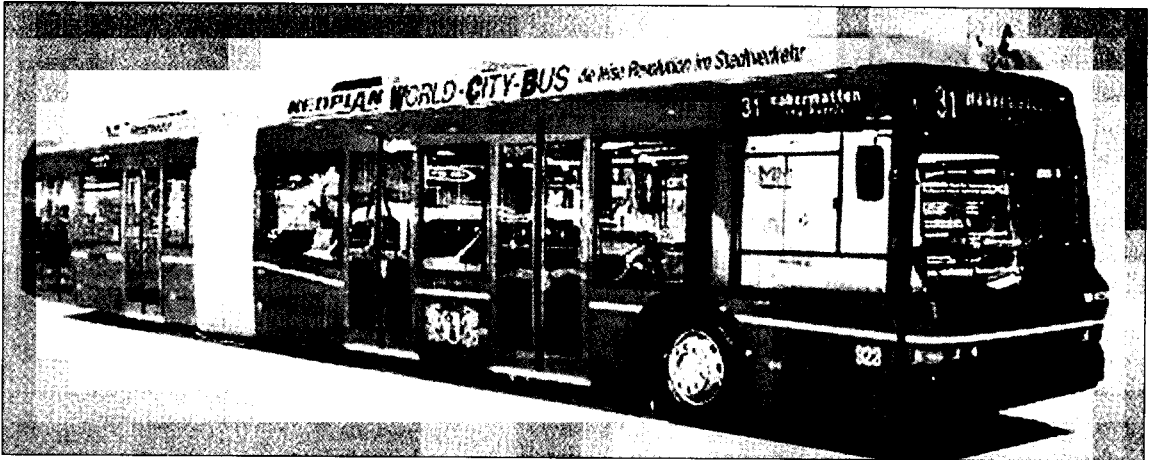


그림 7. 플라이휠 에너지 저장장치를 장착한 노면전차

너지를 저장하였다가 전차가 가속할 때 방출하게 된다. 플라이휠은 그림 7에 있는 전차의 오른쪽 앞바퀴 바로 다음에 위치하고 있으며 제동에너지를 회수하여 사용함으로써 약 25%의 전력을 절약할 수 있었다고 한다.

### 2) 전기자동차의 동력원

American Flywheel System Inc.는 그림 8에 있는 플라이휠 시스템 AFS-20를 개발하였으며 동회사는 약 20여기의 AFS20를 cascade형태로 연결하여 소형전기 승용차의 동력원으로 사용하고자 상용화연구를 수행중에 있다. 동회사는 최초 96년에 200,000mile의 수명과 일회충전으로 350miles(563km)를 주행할 수 있는 시작차 개발을 목표로 하였으나 기술적인 문제로 지연되고 있다. 일회충전시간은 급속충전시 약 20분에서 최대 6시간 정도로 기존화학적전지에 비해 적다.

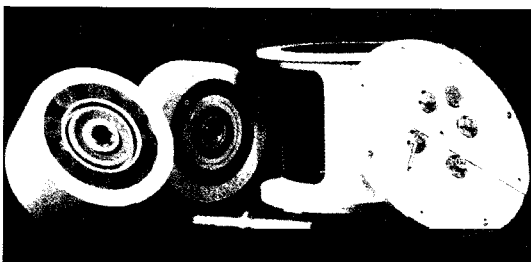


그림 8. AFS20 (American Flywheel Systems Inc.)

### 3) Hybrid 전기자동차의 보조동력원

Hybrid 전기자동차는 현재 개발중인 전기자동차의 주동력원으로 사용되고 있는 화학전지의 기

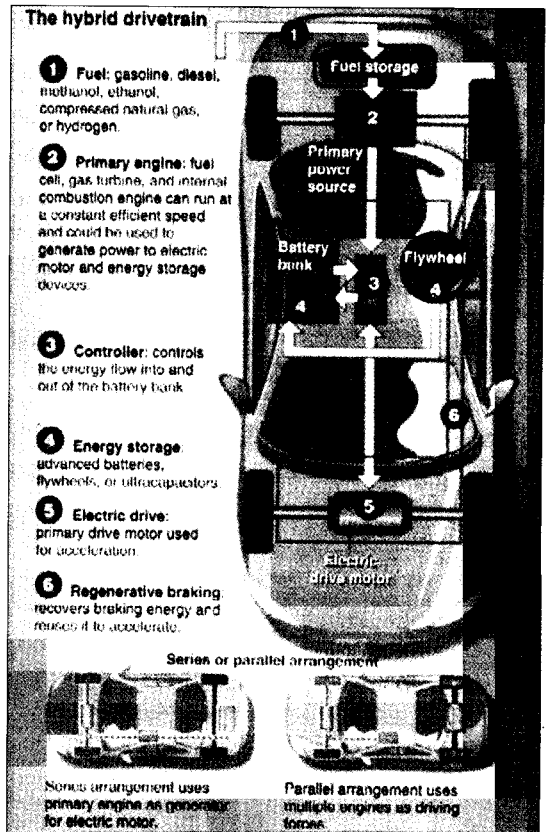


그림 9. PNGV hybrid-vehicle drive train

술적, 경제적 문제들로 인해 국내외 유수의 자동차회사들이 경쟁적으로 개발하고 있는 동력시스템으로 IC(내연기관) 또는 개스터빈으로 발전기를 돌려서 전기를 구동모터에 전달하고 가감속 시, 또는 대기환경 규제조건이 까다로운 시내주행시에는 화학전기 또는 플라이휠 시스템을 보조동력원으로 사용, 전기를 공급하는 시스템이다.

Hybrid 전기자동차의 보조동력원으로는 화학전지가 주로 사용되고 있으나 파워밀도(Power density)가 월등히 우수한 플라이휠 시스템에 대해서도 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 미국에서는 PNGV(Partnership for a New Generation of Vehicles) 프로그램이 수행되고 있는데, 이는 Chrysler, Ford, GM의 자동차 3사와 에너지성이 공동으로 에너지 절약형 차세대 자동차를 개발하는 프로그램으로서 위의 각 회사가 에너지성의 지원으로 Super car를 개발하고 있다. PNGV는 기존의 IC engine 자동차, 전기자동차, Hybrid 자동차, Fuel cell 자동차를 대상으로 하고 있으며 (그림 9. PNGV hybrid-vehicle drive train 참조), 플라이휠 시스템은 전기자동차, Hybrid 자동차, Fuel cell 자동차에 공통적으로 보조동력원으로 사용될 수 있으므로 각 회사에서 경쟁적으로 개발을 하고 있는 핵심요소이다.

그림 10, 11, 12는 Chrysler가 Satcon Tech, NREC 등과 함께 91년부터 개발하고 있는 플라이휠 Hybrid 경주용 자동차로서 현재 Road

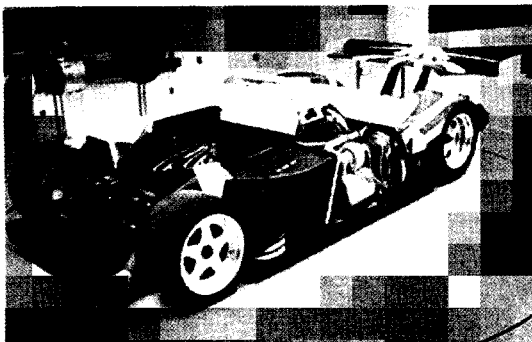
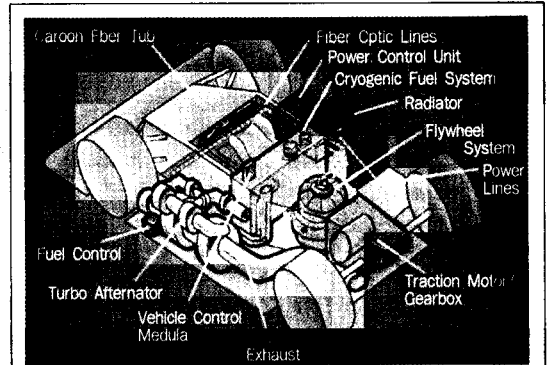
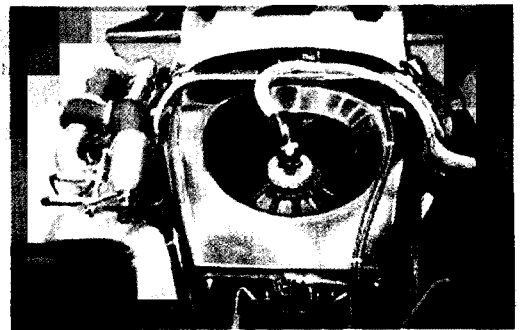


그림 10. Chrysler Hybrid Electric 경주용 자동차 (개스터빈 + 플라이휠)



(a) Chrysler Hybrid 자동차의 구조도



(b) 플라이휠의 장착모습

그림 11. Chrysler Hybrid 경주용자동차의 구조도

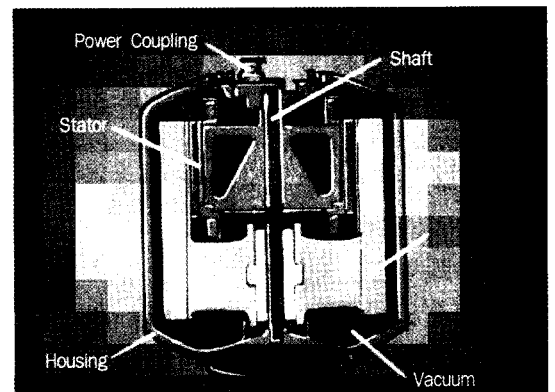


그림 12. Chrysler Hybrid 경주용자동차 플라이휠 장치의 내부구조

testing 중에 있는 것으로 주동력원은 개스터빈을, 보조동력원으로 플라이휠 시스템을 채택하였다. 개발된 플라이휠 시스템은 용량 4.3Kwh, 6000rpm의 운전속도를 갖고 있어 350HP급 경주용 자동차의 성능을 향상시켜주고 있다.



이 외에도 Ford, UTC (개스터빈 제작사), US flywheels가 1992년부터 Hybrid 자동차용 플라이휠 시스템을, 94년부터는 Rosen Power에서 55000rpm의 직경 30cm, 두께 18cm의 플라이휠 시스템을 채택한 Hybrid 자동차를 개발하고 있다. 또한 97년 현재 Texas 대학의 CEM (Center for Electro- Mechanis)도 Houston의 Metro사의 지원으로 버스용 플라이휠 시스템을 개발중에 있으며 LLNL, Trinity Flywheel Batteries, Westinghouse, GM이 수소개스를 연료로하는 5인승 승용차의 보조동력원으로 플라이휠 시스템의 연구를 수행중에 있다.

4) 전기기차용 플라이휠 시스템

Texas 대학의 CEM에서는 94년 이후, 미 연방 철도국의 NGHSR (Next Generation High Speed Rail) 프로그램인 Hybrid train - 개스터빈과 플라이휠 시스템, 그리고 고속 발전기로 구동하는 전기기차 - 의 개발 (ALPS: Advanced Locomotive Propulsion System)에 플라이휠 시스템연구의 주관기관으로 참여, 97년 현재 개념설계를 마친 상태이다. 미 연방철도국은 80년대 말, 90년대 초에 검토한 바 있는 고속전철이 과도한 예산을 필요로 하여 이를 백지화하고 이의 대체 수송수단으로 Hybrid 기차를 차세대 기차

로서 선정, 이의 개발을 위해 적극적인 지원을 아끼지 않고 있다. CEM은 Hybrid 기차용으로 개발하고 있는 플라이휠 시스템에 약 1200만불의 예산을 지원받고 있으며 그 구조도는 그림 13과 같다.

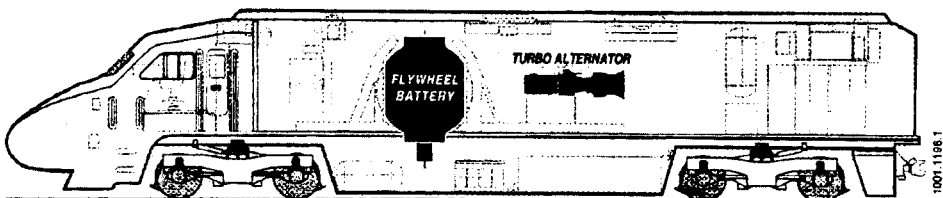
2.1.3 SMES 연구개발 현황

SMES (Superconducting Magnet Energy Storage)은 초전도체에 전류를 흘리면 초전도상태가 파괴되기 전까지 손실없이 흐르는 영구전류를 이용하여 전기에너지를 저장하는 방법으로, 다음과 같이 크게 두가지 형태로 연구가 진행되고 있다.

- 1) 코일형태의 저온 초전도자석을 흐르는 영구전류를 이용한 경우,
- 2) Meissner effect라고 부르는 초전도체가 자장을 밀어내는 특성을 이용 마찰없는 회전력을 이용, 플라이휠에 관성에너지를 저장하는 경우.

코일형태의 전기에너지 저장장치는 저온초전도체를 이용하며 선진국에서는 용량 수백 MWh급의 대형 전기에너지 저장장치가 개발되어 시험하고 있다.

1987년에 발견된 고온 초전도체는 세라믹스의 기계적 단점인 취성과 결정이방성 때문에 발생



	FL YWHEEL BATTERY	TURBO AL TERNATOR	COMBINED
Mass	13,500kg	1,300kg	14,800kg
Power - continuous	3MW	3MW	6MW
- intermittent	4.5MW	3MW	7.5MW
Energy - stored	600MJ	-	600MJ
- delivered	424MJ	-	424MJ
Max. Speed	15,000rpm	15,000rpm	15,000rpm

그림 13. 플라이휠 에너지 저장시스템을 채택한 Hybrid 기차

하는 weak link문제 때문에 높은 전류를 흘릴 수 있는 코일형 자석의 제조가 용이하지 않다. 그러나 고온 초전도체는 액체헬륨을 냉매로 이용할 수 있기 때문에 냉매로 액체헬륨을 이용해야 하는 저온 초전도체에 비해 운용비등이 저렴하고 기술적으로도 간단하다. 고온 초전도체를 이용한 에너지 저장장치는 현재 단기간의 에너지 저장에 사용되는 플라이휠을 이용한 소형시스템에 집중되고 있다. (그림 14).

이와 같은 소형 SMES는 일본 초전도연구센터, 미국 에너지성 산하의 WJSA, ANL, LLNL 등에서 개발되고 있고, 기타 독일, 스위스 등지에서도 연구가 활발히 진행되고 있다.

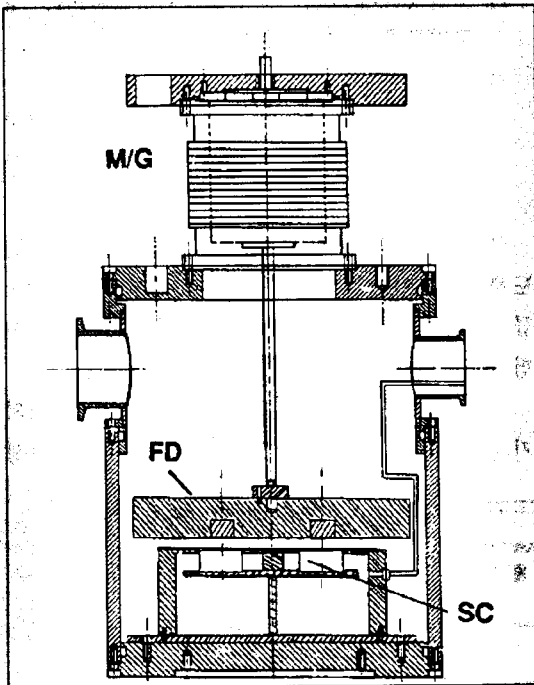


그림 14. 초전도 플라이휠 시스템의 개략도  
(M/G : motor/generator, FD : flywheel disk, SC : superconductor)

## 2.2 국내 연구개발 현황

국내의 플라이휠 시스템의 연구개발역사는 선진국에 비해 그 역사가 매우 짧다. 국내의 플라

이휠 시스템 연구는 1985년 이후 대학과 연구소를 중심으로 저온 초전도 자석을 이용한 기본적인 에너지 저장시스템의 개발이 시도되었으며 1990년대에 이르러 고온 초전도체를 이용한 플라이휠 에너지 저장장치가 원자력연구소, 한국전력연구원을 중심으로 연구가 진행되고 있으나 지금까지는 실용적인 시스템기술의 개발보다는 초전도 자석 베어링의 개발에 주안점을 두고 있다. 일반적으로 연구되고 있는 초전도 자석 베어링은 축방향 베어링이나 현재 한국전력연구원에서 개발중인 소형 SMES는 반경방향 초전도 자석 베어링을 사용하고 있다.

능동형 전자석 베어링을 이용한 플라이휠 시스템은 1994년에 이르러 처음으로 한국기계연구원(이하 KIMM) 주관으로 전기연구소, 한양대, 충남대, 항공대 등이 참여, 500Wh급 에너지 저장시스템을 목표로 개발이 시작되었다.

그림 15, 16, 17은 현재 KIMM에서 무정전 전원장치용으로 개발되고 있는 최대 저장에너지 500Wh급의 최고 설계속도 6만rpm, 최저 설계속도 3만rpm인 고속, 소형 플라이휠 에너지 저장장치로서, 그림 15는 외전형(outer rotor type)을, 그림 17은 내전형(inner rotor type) 플라이휠 에너지 저장시스템을 보여주고 있다. 본 시스템은 정상운전 중에서는 컨버터/인버터에 의한 구성으로 부하측에 정상적인 전원을 공급하며, 입력측 전원(AC 220V)이 정전되는 경우와 같은 이상 사태 발생시에는 플라이휠에 저장된 운동에너지에 의해 고속 전동발전기를 일정시간 동안 효율적으로 구동하여 전체시스템 (출력 6KVA)을 안정화 시키는 역할을 하게 된다.

KIMM 플라이휠 에너지 저장장치를 간단히 기술하면 다음과 같다.

### 2.2.1 외전형 플라이휠 에너지 저장시스템

외전형 플라이휠 시스템은 복합재로터의 자중지지를 위해 중공(hollow) 복합재 로터를 알루미늄축으로 연결, 축의 상부에 영구자석형 축방향 자

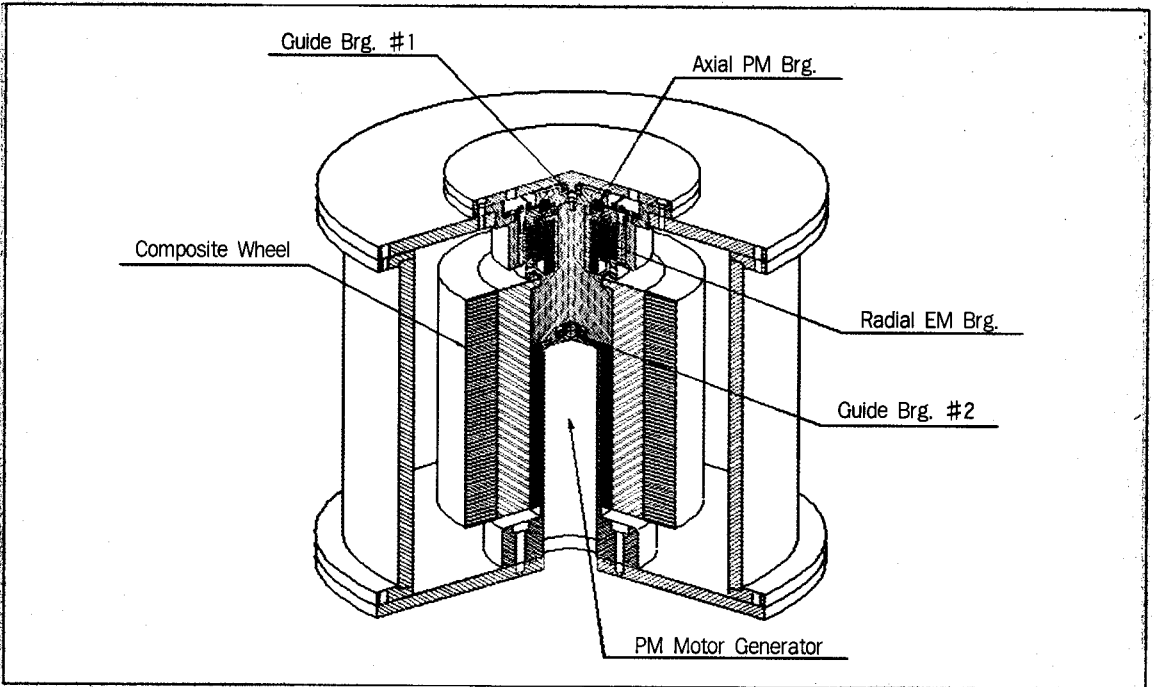


그림 15. 외전형 플라이휠 에너지 저장시스템 개략도

기베어링을 배치하고, 반경방향은 1개의 전자기베어링만을 사용한 수동/능동 혼합형 베어링(hybrid bearing)을 채택하였으며, 전자기 베어링의 미작동 상태를 고려하여 로터의 상단 및 전동발전기 상단에 안내베어링(guide bearing)을 설치하였다. 복합재 플라이휠 로터는 고속에서의 원심응력을 최소화 할수 있도록 서로 다른 2종류의 복합재(E-Glass/ Epoxy, T800/6005 Graphite/Epoxy)를 이용



그림 16. 외전형 플라이휠 시스템 실험장치

한 이층구조로 제작되었다.

플라이휠의 구동을 위해서는 자체설계 및 제작된 외전형(outer rotor type) BLDC 전동기를 플라이휠 내부에 장착하였는데 이 때문에 전체 로터가 종형(bell shape) 및 진자(pendulum) 형태의 구조를 갖게 되었다. 이러한 구조에서는 저속에서의 진동모우드로 인해 하부에 설치된 BLDC의 간극변화 및 rubbing의 위험성이 있으므로 동역학적 해석을 통해 그 위험성을 예측하는 것이 중요하다. 특히 축방향 하중을 지지하기 위한 영구자석형 자기베어링은 근본적으로 시스템의 횡방향 동특성을 불안정하게 하는 힘(negative stiffness)이 발생하므로 이를 정량화시켜 시스템의 동특성 해석에 고려해야 안정한 시스템의 설계가 가능하다. 현재 제작이 완료되어 성능실험중에 있다.

### 2.2.2 내전형 플라이휠 에너지 저장시스템

내전형 플라이휠 에너지 저장시스템은 최고속

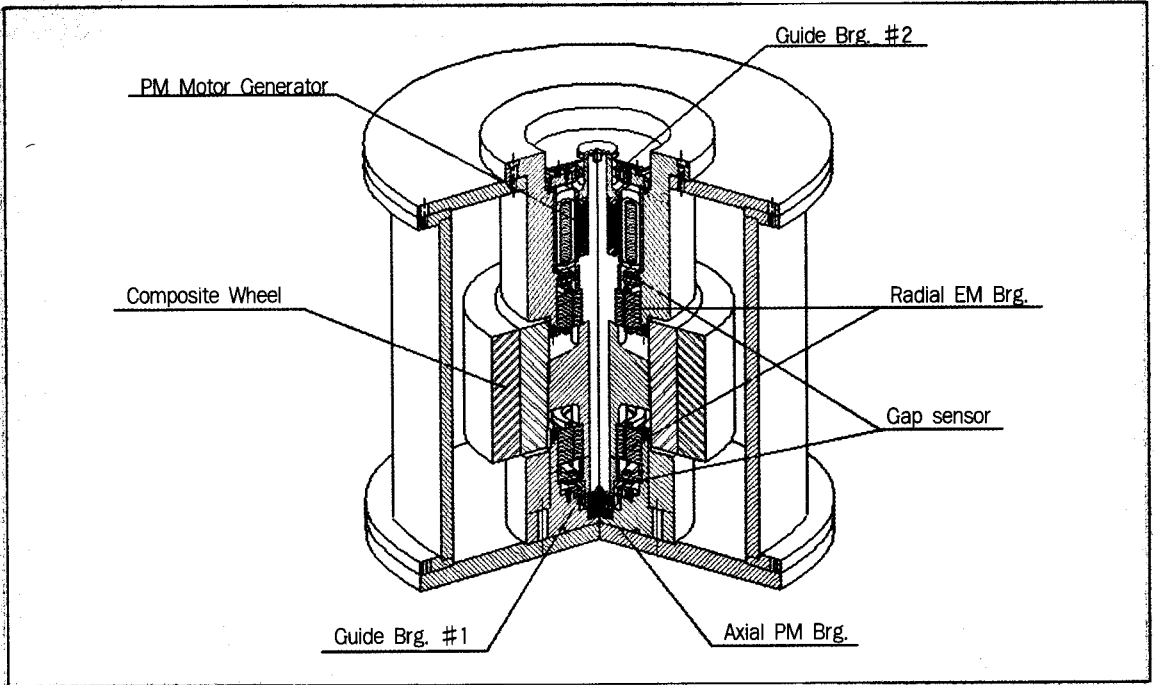


그림 17. 내전형 플라이휠 에너지 저장시스템 개략도

도 58000, 최저속도 29000rpm, 최대저장에너지 550wh, 가용저장에너지 330wh, 6KVA급 UPS용으로 설계되어 제작중에 있다. 1개의 반경방향 능동형 전자석 자기베어링과 1개의 축방향 영구자석 베어링을 사용한 외전형과 달리 내전형 시스템은 2개의 반경방향 전자석 베어링과 1개의 축방향 영구자석 베어링을 사용함으로 시스템의 동적 안정성 향상을 도모하였다.

내전형 플라이휠 에너지 저장시스템의 경우, 복합재휠 및 전력제어 부분, 그리고 자기베어링 부분의 설계기술은 외전형 플라이휠 시스템과 동일하나 전동발전기와 시스템 동역학적 특성에 차이가 있다. 현재 한국기계연구원에서 설계가 완료되어 제작, 조립중에 있다.

### 3. 기술개발의 방향 및 전망

국내의 플라이휠 에너지 저장시스템의 연구는 전술한 바와 같이 선진국에 비해 역사가 짧고 또

한 기술개발의 필요성이 지금까지는 제대로 인식되지 않고 있으나 현재 정부차원에서 진행되고 있는 에너지 절약 및 대체에너지 발굴 시책에 힘입어 점차 연구의 필요성이 부각되고 있다.

그러나 보다 더 실용적이고 상품화가 가능한 제품을 조기에 개발하기 위해서는 다음과 같은 분야에 대한 연구개발이 집중적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

#### ① 고강도, 저가적 복합재 플라이휠 개발 :

에너지 저장장치에서 비에너지밀도 (specific energy density: 에너지 저장총량/중량)는 시스템 소형화(compactness)의 정도를 나타내는 것으로 그 크기가 클수록 저장효율이 높은 시스템을 구현할 수 있다. 플라이휠 시스템에서 비에너지밀도에 가장 큰 영향을 주는 것이 플라이휠의 재료적 특성이다. 회전운동에너지는 관성모멘트에 선형적으로 비례하고 회전속도의 제곱에 비례하므로 플라이휠의 고속화가 비에너지밀도의

증대와 직결되나 플라이휠의 고속화에는 경량, 고강도의 특성을 갖는 재료의 개발 또는 기존 재료를 이용한 최적설계가 필요하다. 또한 시스템의 적용처에 따라서는 잦은 spin-up과 spin-down을 요구하는 경우가 있어 플라이휠에 반복하중을 가하고 되고 이로 인한 피로파괴의 가능성이 존재하므로 이에 대한 해석기술 및 재료적인 대책도 필요하다.

현재까지 상용화된 복합재의 적절한 조합으로 고강도설계가 가능하고 따라서 이러한 플라이휠의 고속화가 가능한 것으로 판명되었으나 고강도 복합재질의 제작가격이 높아 저가격화를 위한 제작공정의 개발이 필요하다. 현재 기계연구원에서 경량, 고강성의 복합재질 최적설계 및 제작방법을 개발, 국내특허를 출원중에 있다.

② 고신뢰성 전자석 자기베어링 시스템의 저가격화 :

저장 에너지의 손실을 최소화하기 위해 사용되는 비접촉식 전자석 자기베어링은 플라이휠의 동적거동을 능동적으로 제어함으로 이에 따른 제어기기 및 위치 검출기(gap sensor)가 필수적으로 수반된다. 그러나 이러한 부속기기들이 차지하는 비용이 매우 높아 플라이휠 시스템의 저가격화에 걸림돌이 되고 있다. 따라서 시스템의 동적거동의 안정성을 해치지 않는 범위에서 위치 검출기 및 제어기기 등의 자기베어링 부속장치의 저가격 설계기술의 개발이 요구된다.

저가형 위치검출기의 개발은 기계연구원에서도 개발이 진행되고 있는 상태이나 자기베어링 전체의 저가격화가 어렵다면 현재 활발히 연구되고 있는 초전도 자석 베어링으로의 대체에 대해서도 적극적인 검토가 필요할 것이다.

③ 자기 구동형 진공유지 시스템 (self vacuuming system)의 개발 :

플라이휠 에너지 저장시스템에서는 에너지 손실을 최소화하고 저장효율을 극대화하기 위해 플

라이휠 용기를 진공으로 유지하고 있다. 그러나 현재까지는 용기내의 진공도 유지를 위해 외부의 진공펌프를 사용하고 있어 시스템의 소형화 및 저가격화에 또 다른 장애가 되고 있다. 향후 연구개발의 최대 난제는 바로 저가격의 자기구동형 진공유지 장치의 개발에 있다고 판단된다. 현재 한국기계연구원에서 개념설계중에 있다.

④ 고효율, 저가격 전력변환 시스템의 개발 :

플라이휠 시스템의 전력변환장치는 크게 AC/DC converter, motor 구동회로, DC/AC converter 등으로 이루어져 있다. 전력변환 회로의 고효율화는 높은 가격의 전력변환 소자를 필요로 하므로 시스템의 가격이 높아지는 것은 피할 수 없는 실정이다. 현재 한국기계연구원과 한국전기연구소 공동으로 고효율, 저가격의 전력변환 시스템의 설계를 완료하고 제작을 시도하고 있다.

⑤ 고강도 진공용기(container)의 개발 :

고속으로 회전하고 있는 플라이휠은 상품화시 제작상의 결함이 있는 불량품의 생산이 예상된다. 제조결함이 있는 플라이휠은 시스템의 정격운전속도에 도달하기 전에 파손되거나 정상운전시 원삼용력을 감당하지 못하고 피로파괴를 일으킬 가능성이 매우 높다. 고속운전시 파손되는 플라이휠은 에너지가 매우 높기 때문에 용기의 강도가 낮을 경우 용기의 폭발로 외부에 심각한 피해를 초래할 수 있다. 따라서 파손에너지를 충분히 흡수할 수 있는 진공용기의 개발은 시스템의 안전성 및 신뢰성 향상을 위해 개발이 필수적이다.

위에 열거한 기술은 플라이휠 에너지 저장시스템이 기존의 화학전지를 이용한 에너지 저장장치와 경쟁을 위해서는 반드시 개발되어야 하며, 궁극적으로 이러한 기술을 이용하여 저가형 시스템(100만원/KVA)의 양산을 목표로 해야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

플라이휠 에너지 저장시스템의 국내외 기술개발현황과 향후 연구방향에 대해 기술하였다. 요약하면 현재까지 플라이휠 시스템의 국내 기술수준은 선진국 대비 약 70%수준에 도달해 있다고 판단되며 향후 정부차원 또는 기업체의 연구가 지속될 경우 3~5년내에 실용화 가능한 저가격, 고효율의 제품 개발이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 최 상규 외, “플라이휠 에너지 저장기술 개발(I)”, 통상산업부 보고서, 1995.
- [2] 최 상규 외, “플라이휠 에너지 저장기술 개발(II)”, 통상산업부 보고서, 1996.
- [3] 최 상규 외, “플라이휠 에너지 저장기술 개발(III)”, 통상산업부 보고서, 1997.
- [4] 최 상규, 김 영철, 경 진호, “플라이휠 에너지 저장장치 회전체계의 동역학적 설계 및 해석”, 한국 소음진동공학회 춘계학술대회 논문집 pp.272-277, 1997.
- [5] 최 상규, 김 영철, 경 진호, “플라이휠 에너지 저장장치 회전체계의 동역학적 설계 및 해석”, 한국 소음진동공학회지 제8권 1호, 1998.
- [6] 경 진호, 김 유일, 최 상규, 김 영철, “하이브리드 베어링지지 저손실 에너지 저장시스템의 축방향 영구자석 베어링 설계기술 연구”, 한국 소음진동공학회 춘계학술대회 논문집 pp.283-289, 1997.
- [7] 최상규, 하성규, “플라이휠 및 그 제조방법”, 특허출원번호 97-261
- [8] 정희문, 최상규, 하성규, “하이브리드 복합재 플라이휠 로터의 최적설계”, 대한기계학회 논문집 Vol 21, no. 7, pp.1665-1674, 1998.
- [9] 최 상규, 이 동환, “개스터빈 회전체계의 동역학적 설계기술”, 기계와 재료, 제7권 3호, pp.98-112, 1995.
- [10] T. J. E. Miller, “Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives”, Oxford, U.K., Oxford Univ. Press, 1989.
- [11] J. A. Kirk, A. Khan, “Maximization of Flywheel Performance”, M. S. Thesis, Univ. of Maryland, 1984.
- [12] G. E. Rodriguez, P. A. Bear at el, “Assessment of Flywheel Energy Storage for Space Craft Power System”, NASA Technical Memorandum 85061