

## 하이브리드 자동차를 위한 플라이 휠 에너지 저장 기술

안 형준<sup>1)</sup>, 박 인황<sup>2)</sup>, 한 동철<sup>3)</sup>

### FES(Flywheel Energy Storage) is ready for HEV(Hybrid Electric Vehicle)

Hyeong-Joon Ahn, In-Hwang Park, Dong-Chul Han

**Key words** : Flywheel Energy Storage(플라이 휠 에너지 저장장치), Hybrid Electric Vehicle(하이브리드 자동차), Specific power(단위 질량당 파워), Specific energy(단위 질량당 에너지)

**Abstract** : 최근 환경 및 에너지 문제가 자동차 산업의 중요한 이슈로 인식되면서 하이브리드 자동차(Hybrid Electric Vehicle) 기술과 연료 전지 자동차(Fuel Cell Vehicle) 등이 주목 받고 있다. 특히 하이브리드 자동차는 요구되는 동력과 생성되는 동력의 차이 때문에, 순시 동력 저장 장치(peak power buffer)가 필요한데, 반복적인 충/방전 사이클에서 용량의 감소 없이 높은 단위 질량당의 동력과 에너지를 가지며 부피, 효율, 수명 면에서도 우수한 플라이 휠 에너지 저장장치가 이러한 동력 저장 장치로 적합하다. 본 논문은 하이브리드 자동차를 위한 플라이 휠 에너지 저장 장치의 현 상태(state of art)를 기술한다. 첫 번째로, 플라이 휠 에너지 저장 장치의 기원과 배경을 설명한다. 두 번째로 하이브리드 자동차를 위한 플라이 휠 에너지 저장 장치의 세부 사항을 요약하고, 플라이 휠 에너지 저장을 이용한 하이브리드 자동차의 예와 플라이 휠 에너지 저장 장치의 설계 쟁점과 자동차에 적용시키기 위한 최근 기술적 진보를 논의한다. 마지막으로, 플라이 휠 에너지 저장 장치의 파급 효과와 다른 적용 예를 소개한다.

### 1. 서론

최근에 환경 문제와 에너지 문제가 자동차 산업의 중요한 이슈로 인식되면서 연료전지 자동차와 전기 자동차 등에 대한 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다. 하지만, 연료전지 자동차와 전기 자동차는 인프라 문제, 축전지(battery) 용량과 수명문제, 그리고 가격 문제가 문제시 되고 가속 능력 면에서도 한계를 가지고 있다.

이에 대한 대안으로 2개의 동력원, 즉 기존 엔진(engine)과 전기 전동기(electric motor)를 이용하는 하이브리드 자동차이다. 특히 하이브리드 자동차는 요구되는 동력과 생성되는 동력의 차이 때문에, 순시 동력 저장 장치(peak power buffer)가 필요하다. 이 순시 동력 저장 장치는 순간적인 동력의 불일치를 해결할 수 있기 때문에 하이브리드 자동차의 성능을 크게 개선시킬 수 있으며 가속과 감속 기간에 일관된 성능을 유지시킬 수 있을 뿐만 아니라, 전지의 수명을 연장 시키고 동력계의 효율을 증가 시킬 수도 있다. 하이브리드 자동차의 동력 저장 장치로 축전지, 플라이 휠, 그리고 대용량 커패시터(ultra capacitor)등이 사용되는데, 특히 에너지 저장에 대한 전기-기계적인 접근으로 수세기 동안 매우 다양한 형태로 사용되었던 플라이 휠 에너지 저장장치가 요소 기술의 발달에 힘입어 다시 각광을 받고 있다.

하이브리드 자동차의 에너지 저장 장치는 다

음과 같은 성능 지수를 가진다. 단위 질량당 에너지(specific energy), 단위 질량당 파워(specific power), 수명(cycle life), 가격(cost). 그림 1과 표1은 축전지, 플라이 휠, 그리고 대용량 커패시터의 성능 지수를 보여준다. 플라이 휠 에너지 저장 장치는 단위 질량당 에너지, 단위 질량당 동력, 빠른 충/방전 시간, 수명 등에서 축전지 보다 우수한 성능을 보인다.

본 논문은 하이브리드 자동차를 위한 플라이 휠 에너지 저장 장치의 현 상태(state of art)를 기술한다. 첫 번째로, 플라이 휠 에너지 저장 장치의 기원과 배경을 설명한다. 두 번째로, 하이브리드 자동차를 위한 플라이 휠 에너지 저장 장치의 세부 사항을 요약하고, 플라이 휠 에너지를 이용한 하이브리드 자동차의 예와 플라이 휠 에너지 저장 장치의 설계 쟁점과 자동차에 적용시키기 위한 최근 기술적 진보를 논의한다. 마지막으로, 플라이 휠 에너지 저장 장치의 파급 효과와 다른 적용 예를 소개한다.

서울대학교 기계항공공학부  
Tel : (02)880-7153 Fax : (02)882-3718

- 1) E-mail : ahj@amed.snu.ac.kr
- 2) E-mail : zeus@amed.snu.ac.kr
- 3) E-mail : dchan@amed.snu.ac.kr

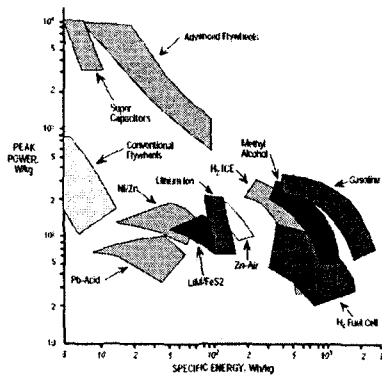


Fig. 1 에너지 저장 장치의 비교<sup>(1)</sup>

Table 1 보조 동력 장치의 비교<sup>(2)</sup>

	Battery	Flywheel	Ultra capacitor
Specific energy	Good	Good	Poor
Specific power	Poor	Good	Very Good
Cost	High	High	Very High
Availability	Good	Medium	Poor
Stability	Good	Not Good	Good
Maintenance	Good	Medium	Very Good
Life	Limited	Large	Very Large

## 2. 플라이 휠 에너지 저장장치

### 2.1 기원과 배경

플라이 휠은 자동차 엔진에 적용된 예와 같이 100여년 전부터 회전을 부드럽게 하기 위해 사용되었다. 플라이 휠의 눈부신 발전은 플라이 휠 로터의 모양과 회전응력에 대한 해석을 수행한 Dr. A. Stodola에 의해 처음으로 이루어 졌다<sup>(3)</sup>. 이러한 플라이 휠은 1970년대의 중동의 석유 파동 문제와 1980년대의 환경 문제에 직면하여 하이브리드 자동차를 위한 에너지 저장장치로 제안되었다. 하지만 1990년에 이르러서야 재료 (Material), 전자기 베어링(magnetic bearing) 기술, 전동기/발전기 (motor/generator) 기술, 전기/전자 (power electronics) 기술, 그리고 제어 (control electronics) 기술의 발달에 기인하여 플라이 휠이 에너지 저장 장치로 사용되기에 이르렀다.

### 2.2 작동 원리

플라이 휠 에너지 저장장치는 에너지를 저장하기 위한 전기-기계적인 접근이다. 전기를 저장하기 위하여 외부 전원으로 부터 공급되는 전기를 플라이 휠의 회전 에너지로 변환하기 위해 전동기가 사용된다. 플라이 휠이 회전함에 따라 에너지가 기계적으로 저장되고, 회전이 증가함에 따라 에너지가 저장된다. 반면에, 동력으로 에너지를 전달함에 따라 플라이 휠의 회전속도는 느려지고,

이러한 기계적 에너지의 감소는 발전기에 의해 전기적인 에너지로 변환된다.



Fig. 2 작동원리<sup>(4)</sup>

플라이 휠 에너지 저장장치의 저장 능력은 플라이 휠의 질량과 회전 속도의 제곱에 비례한다.

$$2KE = mr^2\omega^2 = m\sigma_h/\rho \quad (1)$$

여기서  $m$ 은 질량;  $r$ 은 평균 반경;  $\omega$ 은 회전속도;  $\sigma_h$ 은 후프 응력;  $\rho$ 은 재료의 밀도 그리고  $KE$  운동 에너지이다.

식 (1)과 같이 만약 작고 가벼운 플라이 휠을 사용하여 많은 에너지를 저장하기 위해서는 빠른 회전 속도가 요구된다. 일반적으로 반경방향과 원주 방향의 응력도 회전수의 제곱에 비례한다.

### 2.3 구성 요소

플라이 휠 에너지 저장장치는 크게 로터, 전자석 베어링, 전동기/발전기, 하우징(housing), 그리고 전기/전자 기술로 구성된다.

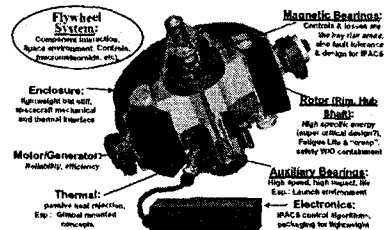


Fig. 3 구성 요소

#### 2.3.1 복합 재료

플라이 휠 에너지 저장장치를 하이브리드 자동차의 보조 동력원으로 사용하기 위해서는 단위 질량당의 에너지와 단위 질량당의 파워가 주요한 요소이다. 단위 질량당의 에너지는 고인장력과 낮은 밀도를 가지고 있는 물질을 사용한 로터로부터 얻을 수 있다. 즉, 금속 보다는 합성 물질 (composite material)을 이용한 로터를 사용하여 성능을 향상시킬 수 있다. 표 1은 여러 가지 로터 물질에 대한 이론적인 비교이다.

표 2에서 알 수 있듯이 복합재료를 사용하여 만든 플라이 휠 로터는 금속을 이용하여 만든 플라이 휠 로터보다 훨씬 큰 잠재력을 가지고 있다. 금속을 로터로 사용하면, 로터의 이론적인 단위 질량당의 에너지는 14Whrs/lb(30.8Whrs/kg)가 되는데, 이는 납축전지(lead-acid battery)의 단위 질량당의 에너지와 거의 같은 수준이다<sup>(5)</sup>.

Table 2 플라이 휠 에너지 비교<sup>(6)</sup>

Rotor material	tensile strength (psi)	Density (lbs/in <sup>3</sup> )	Energy density (W-hrs/lb)
T-1000 Graphite	1,000,000	0.065	241.5
Spectra 1000	435,000	0.035	195
Kevlar 49	525,000	0.052	159
S2-Glass	600,000	0.092	102.4
4340 Steel	260,000	0.283	14.4

### 2.3.2 베어링

높은 에너지를 얻기 위해 작고 가벼운 로터를 빠른 속도로 회전시키므로 베어링의 마찰과 공기 저항 손실을 고려해야만 한다. 베어링 마찰은 능동형 전자기 베어링으로 제거 할수 있으며, 공기 저항 손실은 플라이 휠 시스템을 진공 상태에서 작동시키므로 크게 줄일 수 있다.

### 2.3.3 전동기/발전기

플라이 휠 에너지 저장장치의 단위 질량당의 파워는 전적으로 전동기/발전기에 의존적이다. 따라서 단위 질량당의 파워를 높이기 위해서 여러 형태의 전동기/발전기가 연구 개발되고 있다.

Switched reluctance 전동기/발전기, 유도 전동기/발전기, 그리고 영구자석 전동기/발전기 등에서 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히 영구자석 전동기/발전기는 낮은 로터 손실과 함께 높은 토크 밀도를 가지기 때문에 플라이 휠 에너지 저장장치의 전동기/발전기로 큰 주목을 받고 있다. 또한 쌍극 하박 어레이(Halbach array)는 진공 상태 밖에 위치한 고정자에 대해 회전이 가능하기 때문에 단순한 발전기/전동기의 설계가 가능하며, 이러한 이유로 최근 주목을 받고 있다.

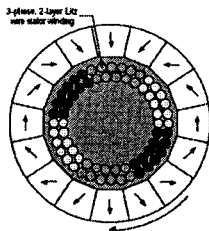


Fig. 4 Halbach array<sup>(1)</sup>

### 2.3.4 마운팅(Mounting)

플라이 휠 에너지 저장장치의 하이브리드 자동차로의 응용에서 간과해서는 안될 요소가 플라이 휠의 운동, 진동, 그리고 충격의 예상과 제어이다. 특히, 플라이 휠의 가/감속에 따라 부가적인 토크(torque) 발생되는데, 이는 같은 회전축에 위치한 서로 반대 방향으로 회전하는 두 개의 플라이 휠을 위치시킴으로써 제어할 수 있다. 그리고 진동과 충격은 플라이 휠의 베어링과 자동차에

장착하기 위한 마운팅(mounting)을 통해 전달되는데 진공 상태에서 제어가 가능한 능동형 전자기 베어링을 사용한다. 그리고 베어링 시스템과 별도로 원심력에 의한 회전 관성력을 감소시키기 위해 짐벌(gimbal) 마운팅을 한다.

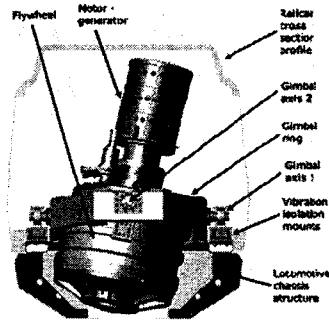


Fig. 5 짐벌 마운팅<sup>(6)</sup>

### 2.3.5 컨테인먼트(Containment)

플라이 휠 에너지 저장 장치는 화학적인 에너지 저장장치에 비해 높은 단위 질량당의 동력과 에너지, 그리고 오랜 수명을 가졌음에도 불구하고 고속 회전에 의한 사고의 불안감이 이의 적용을 방해하고 있다. 또 다른 어려움으로는 고진공의 유지, 진공 손실(호스나 펌프의 파손), 전자기 베어링 고장, 그리고 허용 회전수의 초과 등이 있다. 이에 대한 대책으로는 설계 단계에서 공학적인 설계 원리를 적용하고, 고장 시에 이를 쉽게 발견할 수 있는 모니터링 시스템을 구축하며 플라이 휠의 파열시에 대비하여 가벼운 합성 라이너(liner)를 장착하는 것이다.

## 3. 플라이 휠의 응용

플라이 휠 에너지 저장장치는 축전지의 가격이 일반적으로 높은 하이브리드 전기 버스에 응용되고 있다. 그 예로 텍사스 오스틴 대학에서는 100km/h의 속도, 7.2MJ의 에너지 저장 능력, 150kW 순간 파워 능력을 가진 버스를 실험 하였다. 또한 고속 철에도 순간 동력원으로 사용되고 있다. 디젤 엔진 기차는 너무 무거워 180km/h로 이상으로 달리는 고속 전철에는 적용될 수 없을 것으로 예상된다. 반면 전철은 레일의 전기화에 의한 경제적인 면으로 인하여 쉽게 활용화 할 수 없다. 이러한 문제는 평균 파워로는 가스 터빈을 이용하고 순간 파워로는 플라이 휠 에너지 저장장치를 사용하는 하이브리드 기차로써 해결할 수 있다. 이 외에도 플라이 휠 에너지 저장장치의 장점은 많은 분야에서 사용되고 있다 : 인공위성, 우주 정거장, 우주선 발사, 그리고 하이브리드 전투 차량등

### 3.1 모멘텀 휠

플라이 휠의 하나의 응용 사례는 에너지 저장이 문제시 되는 우주 정거장이다. 주 에너지원은 태양이지만 지구가 태양과 우주 정거장 사이에 위치할 경우에도 우주 정거장은 계속해서 작동을 해야 한다. NASA에 의한 초기 설계는 화학적인 축전지를 이용하였으나, 최근 플라이 휠 에너지 저장장치를 이용한 시스템이 연구 개발 중이다. 우주 정거장에서 플라이 휠 에너지 저장장치의 장점은 다음과 같다: 3-10배 정도의 수명, 2배 정도의 파워, 그리고 회전속도의 측정에 의한 플라이 휠 에너지 저장 장치의 충전상태. 또한 낮은 지구 궤도(lower earth orbit)을 도는 인공위성에서의 플라이 휠도 개발되어 사용 중이다.

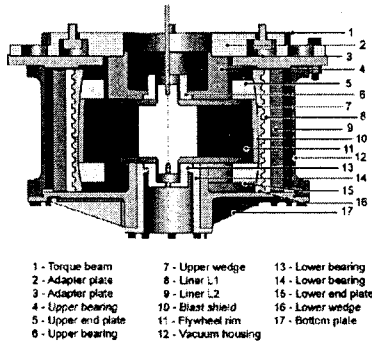


Fig. 6 컨테인먼트 시스템<sup>(7)</sup>

플라이 휠 에너지 저장장치에 대한 또 다른 사례가 운송선으로부터 우주선의 발사이다. 현재 발사 장치는 발사를 위해 충분한 에너지를 저장하는 에너지 저장장치를 가진 증기 시스템에 의해 동작한다. 하지만 순간적인 파워를 낼 수 있는 플라이 휠 에너지 저장 장치를 사용함으로써 크기가 큰 증기 저장장치를 제거 할 수 있다.

### 3.3 전투 차량에서의 플라이 휠

미국 국방성은 현가 장치, 통신, 무기, 그리고 방어 체제와 함께 전기 추진력을 갖는 미래형 전투 차량을 개발할 계획이며 모든 기능들은 전기 파워를 필요로 한다. 하이브리드 전기 파워 시스템은 평균 파워만 낼 수 있도록 설계된 엔진, 은밀한 작전을 수행하기 위한 연료 전지, 전투 차량의 변화에 대한 순간적인 파워를 제공하는 플라이 휠로 구성된다. 이 방법은 거의 일정한 파워 구간에서는 주 동력원, 즉 엔진을 이용함으로써 시스템의 수명을 극대화 시킬 수 있고 전체적인 차량의 중량을 감소시킨다. 또한 순시 동력은 플라이 휠 저장장치를 사용하여 해결할 수 있다.

Table 2 플라이 휠 에너지 저장 장치의 응용<sup>(4)</sup>

	Pulse power	Energy(MJ)	Speed (rpm)
Satellite	2 kW	1.4	53000
Space station	3.6 kW	13	53000
Hybrid combat vehicle	11 MW	25	18000
Electromagnetic launcher	5-10 GW	50-150	10000

## 4. 결론

본 논문은 플라이 휠 에너지 저장장치의 기원과 배경, 전반적인 최근 기술 상황과 플라이 휠의 응용 예를 소개했다. 하이브리드 자동차용 순시 저장 장치로 다른 에너지 저장장치에 비해 높은 단위 질량당의 파워, 높은 단위 질량당의 에너지, 그리고 긴 수명을 가진 플라이 휠 에너지 저장장치가 최근에 재료, 전자석 베어링, 제어, 그리고 전기/전자 기술의 발달에 힘입어 다시 각광을 받고 있다. 플라이 휠 에너지 저장장치는 또한 항공 우주 분야, 하이브리드 자동차, 그리고 하이브리드 전투 차량과 같은 여러 응용 분야에서도 적용 검토되고 있다. 현재 상황으로는 제한된 몇몇의 응용에 사용되지만, 플라이 휠의 타고난 성능 때문에 앞으로 하이브리드 자동차 뿐만 아니라 많은 응용 분야에서 사용될 것이다.

## References

- [1] M. E. Bowler. Flywheel energy systems: current status and future prospects. Magnetic Material Producers Association Joint Users Conference 1997
- [2] B. K. Bose, M. H. Kim, M. D. Kankam. Power and energy storage devices for next generation vehicle. IECEC 96, Proceedings of the 31st Intersociety 1996;3:11-16
- [3] Sodola, A. Steam and Gas Turbines. McGraw-Hill Book Company, Inc. 1927
- [4] R. Hebner, J. Beno, A. Walls. Flywheel Batteries Come Around Again. Spectrum, IEEE 2002;39
- [5] J. G. Bitterly. Flywheel Technology: Past, Present, and 21st Century Projections. Aerospace and Electronic System Magazine, IEEE 1998;13
- [6] B. T. Murphy, H. Ouroua, M. T. Caprio, J. D. Herbst. Permanent Magnet Bias, Homopolar Magnetic Bearings for a 130kW-hr Composite Flywheel. The Ninth International Symposium on Magnetic Bearings 2004
- [7] J. J. Zierer, J. H. Beno, R. J. Hayes, J. L. Strubhar, R. C. Thompson, T. Pak. Design and Proof Testing of a Composite Containment System for Mobile Applications. SAE World Congress 2004