

# 소형 플라이휠 에너지 저장 시스템 제작 및 운영에 관한 연구

## A Study on the Manufacturing and Operation of the Flywheel Energy Storage System

이준호†

Jun-Ho Lee

### 1. 서 론

플라이휠 에너지 저장 시스템은 추진장치의 제동 시 발생하는 회생전기에너지를 기계적 회전에너지로 저장하한 후 추진장치의 추진시 필요로 하는 추진력을 보상 하는 용도로 활용 된다. 특히 철도 시스템의 경우에는 빈번한 정차로 인해서 많은양의 회생에너지가 발생하기 때문에 플라이휠 에너지 저장 시스템은 철도시스템에 적용하기에 매우 적합하다고 말할 수 있다.

플라이휠 에너지 저장 시스템은 회전 로터, 플라이휠, 반경방향으로 축을 지지하기 위한 상부 자기베어링, 하부 자기베어링, 수직방향의 축을 지지하기 위한 축방향 자기베어링, 고정자 역할을 하는 하우징으로 구성된다. 본 논문에서는 각각의 구성품의 제작 및 통합과 시스템의 운영에 대해서 다루고 제안된 플라이휠 에너지 저장 시스템의 효율성을 회전 시험 및 에너지 저장 특성을 통하여 보인다.

### 2. 플라이휠 에너지 저장 시스템 구성

그림 1. 은 플라이휠 에너지 저장 시스템의 구성을 보여준다. 플라이휠 에너지 저장 시스템은 그림에서 보듯이 플라이휠 로터(회전체), 회전체를 지지하기 위한 베어링, 전기적 에너지와 기계적 에너지의 변환과 에너지 저장 및 방전이 가능하도록 하는 전동/발전기와 플라이휠, 이들 구성품을 통합하기 위한 하우징(외함) 등으로 구성된다.



그림 1. 플라이휠 Configuration

### 3. 각 구성품의 제작

플라이휠 에너지 저장 시스템 구축을 위하여 제작된 각 구성품은 다음과 같다.

#### 3.1 플라이휠 회전체 제작

그림 2는 제작된 플라이휠 로터를 나타낸다.



그림 2 플라이휠 회전 로터

플라이휠 로터는 약 20,000rpm 의 회전속도를 만족하기 위해서 극 관성모멘트  $I_p = 0.16 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$  로 했다.

† 교신저자 정희원, 한국철도기술연구원  
E-mail : jhlee77@krii.re.kr  
Tel : 031-460-5040, Fax : 031-460-5034

### 3.2 플라이휠 회전체 지지베어링

#### 1). 반경방향의 자기베어링

반경 방향의 자기베어링은 부하용량에서의 여유를 확보하기 위해서 최고 운전속도 30,000rpm 에서도 운전이 가능하도록 제작했다. 그림 3.은 제작된 반경방향 자기베어링을 보여 준다.



그림 3 반경방향 자기베어링

#### 2). 축방향의 자기베어링

본 논문에서 다루는 플라이휠 에너지 저장 시스템은 회전축이 수직으로 구축되는 시스템이기 때문에, 5자유도 부상을 위해서 자중에 의한 처짐을 극복해야 한다. 이를 만족하기 위해서 32Kg (로터 무게 26Kg) 까지 자중을 버틸 수 있는 축 방향 자기베어링을 제작 했다.



그림 4. 축방향 자기베어링

### 3.3 플라이휠 및 하우징

플라이휠 설계 및 제작시 극관성모멘트 (polarmoment of inertia :  $I_p$ )와 횡관성모멘트 (transversemoment of inertia :  $I_t$ )의 비를 고려해야 한다. 관성모멘트 비 ( $\frac{I_p}{I_t}$ )가 1이하이면 횡관성모멘트가 극관성모멘트에 비해 큰 회전체를 의미한다. 회전체에서 극관성모멘트가 증가하면 플라이휠의 에너지 저장용량은 증가하나 자이로스코픽 효과에 의해 회전축의 동역학 특성이 회전속도에

따라 변하게 되어 부상 제어에 어려움이 있을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 제어의 용이성을 위해 관성모멘트 비를 1이하로 제한한다. 그림 5는 제작된 플라이휠을 보여준다.



그림 5 플라이휠

하우징은 회전 로터, 자기베어링, 전동/발전기의 고정자 역할을 하기 때문에 회전로터, 자기베어링, 전동/발전기와 일체가 될 수 있도록 각 구성품의 설계 프로세스와 함께 하우징의 설계도 진행되어야 한다. 하우징의 설계는 특히 각 구성품의 설계완료 후 시스템 제작을 통한 시스템통합 과정에서 각 구성품과 하우징과의 설계 공차가 일정 범위에서 유지 되어야 만 회전 로터의 운영속도가 유지될 수 있다.



그림 6 플라이휠 하우징

## 4. 시험 운영

### 4.1 회전 시험

그림 7. 과 그림 8은 제작된 플라이휠 에너지 저장 시스템의 회전 시험(10,000rpm) 결과를 보여준다. 시험결과에서 보듯이 10,000rpm에서 회전 로터의 반경방향 변위는 0.01[mm] (변위량의 단위는 [mm]) 이내에서 제어되고 있는 것을 볼 수 있으며 이는 플라이휠 에너지 저장 시스템의 제작 및 조립

과정에서 발생하는 공차를 최소화함으로써 회전로터의 진동을 억제할 수 있음을 의미한다.

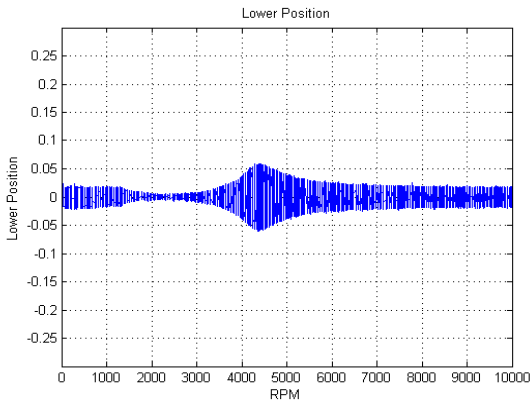


그림 7 회전시험 (10,000rpm)

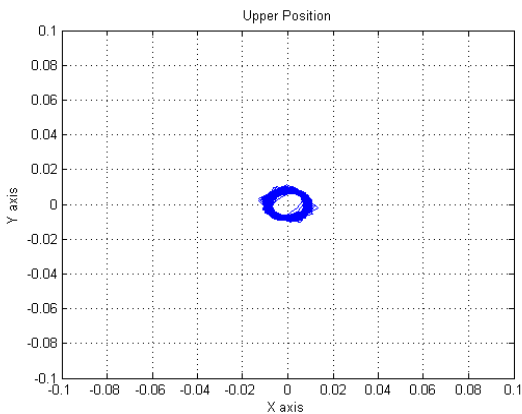


그림 8 회전시험 (10,000rpm)

#### 4.1 에너지 저장 용량 및 회전 속도

그림 9는 10,000에서 각각 다른 부하조건 (1.7 $\Omega$ , 7 $\Omega$ , 10 $\Omega$ ) 으로 100[W]에 도달하는 run-down 시험을 수행한 결과를 보여준다. 1.7 $\Omega$  부하조건인 경우 10,000rpm 에서 약 5[kW]의 에너지가 저장되어 있으며 1,400rpm에서 100[W]에 도달하는 것을 알 수 있다. 반면에 7 $\Omega$ , 10 $\Omega$ 의 경우에는 10,000rpm 에서 1.2[kW], 0.8[kW] 정도의 에너지를 저장하고 2,850rpm, 3440rpm에서 저장에너지는 100[W]로 줄어드는 것을 알 수 있다. 이것은 높은 부하조건에서 더 많은 에너지를 저장하고 저장된 에너지를 소비 하는데 필요한 시간도 더 길다는 것을 의미한다. 또한 10,000rpm에서 에너지 저장요량은 수 [kW]에 이르는 것을 알 수 있으며 20,000rpm 회전 시험에서도 동일한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예

측된다.



그림 9 에너지 저장 용량 및 회전속도

## 5. 결론

본 논문에서는 플라이휠 에너지 저장 시스템의 제작, 조립 및 통합된 시스템의 운영에 대해서 다루었다. 제작 및 조립과정에서 발생하는 공차의 적절한 관리가 진동을 최소화 할 수 있음을 고속회전 시험을 통하여 보였으며, 에너지 저장 용량과 회전 속도의 상관관계를 실험적으로 규명함으로써 에너지 저장 장치로서의 효용성을 입증했다.

앞으로 회전속도의 증가에 따른 에너지 저장 용량 및 회전축의 진동 특성에 대한 추가적인 시험이 진행될 예정이다.

## 참고문헌

- [1] Jun-Ho Lee, *etal.* “A Study on the Design Procedure of the Eight Pole Magnetic Bearings for the Inner-rotor and the Outer-rotor type”, *Journal of Electrical Engineering Technology*, vol. 8-6, pp. 1424-1430, 2013.
- [2] G. Schweitzer and E. H. Maslen, eds., *Magnetic Bearings: Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*, Springer, 2010.
- [3]. G. Schweitzer, H. Bleuler, A. Traxler, “Active Magnetic Bearings: Basics, Properties and Applications of Active Magnetic Bearings”, *vdf Hochschulverlag AG der ETH Zurich*, 1994