

# 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치의 Voice Coil 전동기 설계 Design of Voice Coil Actuator for Micro Flywheel Energy Storage System

이현주<sup>1</sup>, \*# 노명규<sup>2</sup>

Hyunchu Lee (eocjd2@cnu.ac.kr)<sup>1</sup>, \*# M. Noh<sup>2</sup> (mnoh@cnu.ac.kr)

<sup>1</sup>충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단, <sup>2</sup>충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단

Key words : Micro flywheel, Flywheel energy storage system, Voice coil actuator, Passive magnetic bearings, Toroidally-wound BLDC machine

## 1. 서론

모바일 IT 장치와 유비쿼터스 센서/ 구동기의 사용이 많아지면서 소형 전원에 대한 필요성이 증가하고 있다. 이를 위하여 화학전지나 연료전지 등 다양한 기술들이 개발되고 있다.

Fig.1은 연료전지나 화학전지 등 여러 가지 에너지 저장 기술의 단위 무게당 출력과 단위 무게당 저장 에너지 사이의 관계를 보여준다.<sup>(1)</sup> Fig.1에서 볼 수 있는 바와 같이 연료전지나 화학전지는 출력특성이 저장에너지와 밀접하게 관련이 있으며 에너지를 공급받는 센서나 구동기의 전원 요구 조건이 이 출력특성과 맞지 않으면 전원 요구 조건을 충족하도록 2차 전력 변환이 필요하다. 또한 연료전지나 화학전지 등은 환경오염 가능성, 제한적 충방전 수 등의 문제를 가지고 있다. 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치는 무제한의 충방전이 가능하며 환경 친화적이며 출력이 조절이 용이하여 위에서 언급한 2차 전력 변화 장치로 사용하거나 시스템의 주 전원장치로 사용할 수 있다.

플라이휠 에너지 저장 장치는 전기에너지를 회전에너지로 전환하여 전력을 저장하는 장치를 말한다. 전력 저장 시 전기에너지는 전동기를 사용하여 플라이휠을 회전시켜 회전에너지로 변환하고 저장된 전력 사용 시에는 플라이휠의 회전력으로 전동기를 회전시킴으로써 전기에너지를 발생시킨다.

본 논문에서 기술하는 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치는 10Wh이하의 에너지를 저장할 수 있도록 설계된 장치이며 효율을 극대화하기 위해 자기부상을 채택하였다. 플라이휠의 반경방향 부상은 수동형 자기 베어링에 의해 지지되며, 소형시스템에 적합하고, 효율이 높은 환형권선 Brushless 직류전동기를 사용

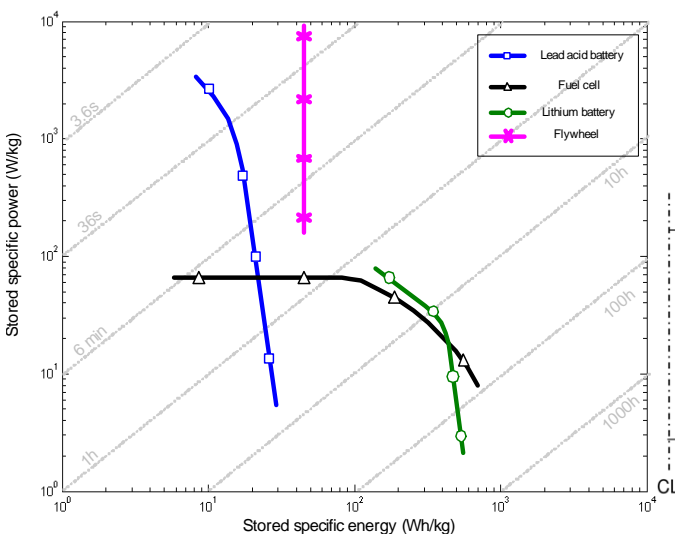


Fig. 1 Ragone plot of existing power systems

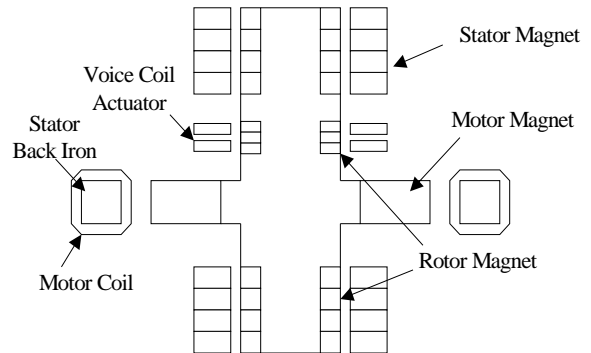


Fig. 2 Schematic diagram of a micro flywheel energy storage system.

하였다.<sup>(2,3)</sup>

본 논문에서는 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치의 축방향 부상을 위해 사용하는 voice coil 구동기의 설계식 도출과 검증에 대해 기술하고자 한다.

## 2. 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치의 구성

Fig. 2 은 플라이휠 에너지 저장 장치 시스템의 개략도이다. 회전자 중심에 위치한 플라이휠에는 모터/발전기를 위한 영구자석이 장착되어 있다. 모터는 환형권선 Brushless 직류 전동기 형태로서 효율이 매우 높고 넓은 공극에서도 작동 할 수 있는 특징을 가지고 있다.

회전자의 상·하부에 위치한 수동형 자기베어링은 여러 개의 층으로 이루어진 고정자 및 회전자 환형 영구자석으로 이루어져 있으며 반경방향으로 반발력을 만들어 내도록 설계되어 있다. 자기부상 시스템의 근본적 문제는 모든 자유도를 수동적으로 부상 할 수 없다는 것이다.

Fig.2 의 초소형 플라이휠 에너지저장 장치의 경우도 수동형 자기베어링을 통해 반경방향 부상이 가능하나 이로 인해 축방향은 불안정하다. 시스템의 완전한 부상을 위해 축방향의 능동제어가 필요하며 이를 위해 voice coil 구동기를 사용하였다.

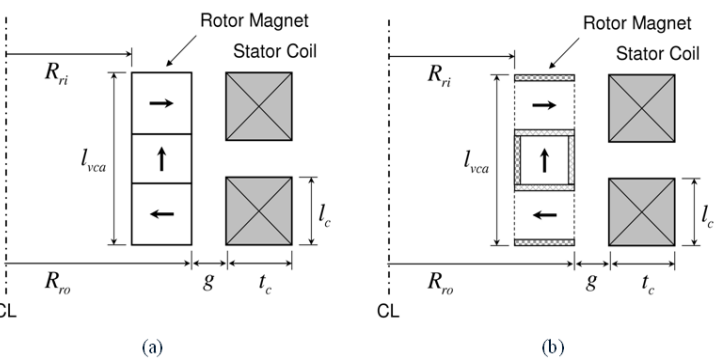


Fig.3 (a) Geometry of voice coil actuator. (b) Permanent magnets replaced with equivalent current sheet

### 3. Voice Coil 구동기의 설계 및 검증

Voice coil 구동기는 회전자 영구자석과 고정자 코일로 구성되어 있다. 회전자 영구자석은 Halbach 자화 패턴을 가지고 있으며 세 개의 층으로 이루어져 있다. 한 쌍의 고정자 코일은 동일한 크기의 전류가 서로 반대로 흐르도록 직렬로 연결되어 있다.(Fig.2a 참조)

Voice coil 구동기의 설계 목표는 최소한의 크기와 전력을 이용하여 플라이휠의 축방향 안정성을 제공하는 것이다. 설계를 위해 구동기의 파라미터와 구동기 출력의 상관관계를 규정하는 설계식이 필요한데 이는 등가 전류판 방법을 이용하여 해석적으로 구할 수 있다.<sup>(4)</sup>

Fig.2b 는 Fig.2 a 의 영구자석을 등가전류판으로 치환한 모양이며 각 전류판에 의한 자속밀도는 Maxwell 방정식을 해석적으로 풀어 구할 수 있다. 임의의 점  $(x, y)$ 에서의 자속밀도를  $B(x, y)$ 라 하면 코일에 작용하는 로렌츠 힘은

$$F = \int_{x_c}^{x_c+t_c} \int_{y_c}^{y_c+l_c} \left( \frac{NI}{t_c l_c} \right) B(x, y) dy dx \quad (1)$$

와 같이 구할 수 있다. 식(1)에서  $N$  은 권선수,  $I$  는 코일 전류,  $l_c$  는 코일의 축방향 길이,  $t_c$  는 코일의 반경방향 길이이다. 주어진 전력 대비 구동기의 출력은

$$K_{vca} = \frac{F}{\sqrt{I^2 R}} \quad (2)$$

로 정의할 수 있으며 voice coil 구동기의 최적설계는  $K_{vca}$  의 최대값을 구하는 것으로 요약할 수 있다.

Voice coil 구동기의 설계에 앞서 설계식(2)의 신빙성을 유한 요소법을 이용하여 검증하였다. Table 1에 정리된 voice coil 구동기에서 코일간의 간격을 변화시킬 때 식(2)로부터 구한  $K_{vca}$  를 유한요소법<sup>(5)</sup>에 의한 결과와 비교하였다. Fig.3에서 볼 수 있는 바와 같이 해석적 방법에 의한 구동기 상수  $K_{vca}$  의 변화는 유한요소해석 결과와 매우 유사한 양상을 보이며 절대값의 오차는 7% 이내로 유지된다.

이러한 결과를 볼때 voice coil 의 설계에 있어 식(2)를 이용하는 것이 적합하며 순차적인 2차 계획법<sup>(6)</sup>과 같은 최적화 방법을 통해 voice coil 의 최적 설계도 가능 할 것이다.

### 4. 결론

본 논문에서는 자기 부상 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치의 축방향 능동제어를 위한 voice coil 구동기의 설계식 도출과 검증에 대해 기술 하였다. 등가 전류판을 이용하여 해석적으로 구한 설계식을 유한 요소 해석 결과와 7% 이내의 오차로 일치하며 코일 간격 변화에 따른 구동기 상수의 변화 양상도 일치 하였다.

본 연구의 추후 과제도 도출한 설계식을 이용하여 voice coil 구동기를 최적 설계하고 이를 구현하여 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치를 실현하는 것이다.

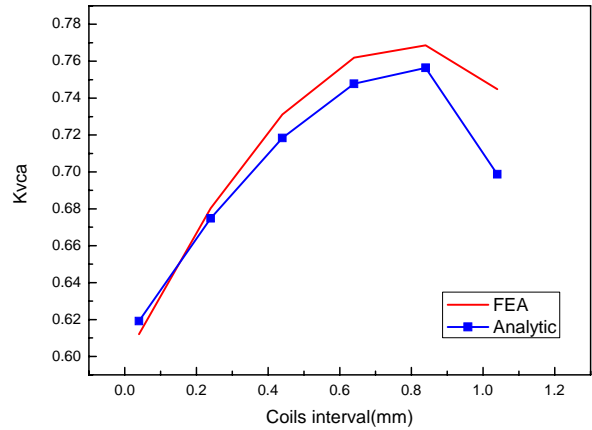


Fig. 4 Comparison of analytical results with FEA for the case of  $K_{vca}$  between coils and a total current sheet.

Table 1 Voice coil 구동기의 설계 파라미터

매개변수	설계값(mm)
Voice coil 구동기 영구자석 내경(Rri)	1 mm
Voice coil 구동기 영구자석 외경(Rro)	2 mm
Voice coil 구동기 영구자석과 코일 공극(g)	0.01 mm
코일 축방향 높이(lc)	1 mm
코일 반경방향 길이(tc)	1 mm
영구자석 축방향 전체 길이(lvca)	3 mm
영구자석길이(lm)	1 mm
코일간의 간격(lco)	0.02~1.02 mm
전류	1 A

### 참고문헌

1. D. Dunn-Rankin et al., 2005, "Personal Power Systems," Progress in Energy and Combustion Science 31, pp. 422-465.
2. L. W. Langley and R. L. Fisher, 1985, "Toroidally Wound Brushless DC Motor", US Patent 4,547.
3. F. Caricchi, F. Crescimbeni, and O. Honorati, 1998, "Low-Cost Compact Permanent Magnet Machine for Adjustable-Speed Pump Application," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 1, pp.109-116, 1998.
4. 이지은, 유승열, 노명규, "Optimal design of passive magnetic bearings", 윤희학회지, 23(6), pp283-287, 2007.12.01
5. D. Meeker, Finite Element Method for Magnetics, available at <http://femm.foster-miller.net>
6. The Mathworks, Inc., Optimization Toolbox User Manual.