

# 대용량 에너지 저장장치의 플라이휠 자중 지지를 위한 영구자석형 베어링의 최적 설계

## Optimal Design of Permanent Magnetic Bearing to support weight of Large Flywheel Energy Storage Systems

유승열\* · 김우연\*\* · 김승종\*\* · 배용채\*\*\* · 노명규†

Seung-yeol Yoo, Woo-yeon Kim, Seung-jong Kim, Yong-chaе Bae and Myounggyu Noh

### 1. 서론

대용량 플라이휠 에너지 저장장치에는 일반적으로 수직형 회전축이 사용된다. 그렇기 때문에 축 방향 베어링은 회전축의 지지를 위해 반드시 필요한 요소이다. 능동형 자기베어링이 축 방향 베어링으로 사용될 경우, 플라이휠의 자중을 담당하기 위해 많은 양의 권선 전류가 필요할 것이고, 이는 시스템의 효율 측면에서 부정적인 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 일반적으로 능동형 자기베어링(Active electromagnetic bearing)과 수동형 영구자석 베어링(Passive permanent magnetic bearing)을 함께 사용한다. 능동형 자기베어링이 회전체 진동제어를 위한 동적 제어력을 발생시키는 동안 영구자석 베어링은 회전체의 자중 지지를 위한 정상상태 부상력을 발생시킨다.

환형 영구자석 베어링은 일반적으로 반경방향 수동형 베어링으로 사용된다[1]. 그러나 고정자의 환형 베어링과 회전자의 환형베어링 사이에 축 방향 변위가 존재하면 축 방향 힘이 발생한다.

본 논문에서는 등가전류판 방법(Equivalent current sheet method)[2]을 이용하여 축 방향 배열과 Halbach 배열 두 종류의 환형 영구자석 베어링의 영구자석 구조에 대하여 최적화 설계를 수행하였다. 등가전류판 방법은 환형 영구자석을 동일한 자기장이 발생하는 전류판으로 대체하고 전류판 사이에 발생하는 힘을 해석적으로 구하여 3D 유한요소해석 결과와 비교 검증하였다.

### 2. 환형 영구자석 베어링 구조

본 논문에서 다룰 수동형 자기베어링은 외륜형대용량 플라이휠 에너지 저장장치의 자중을 지지하

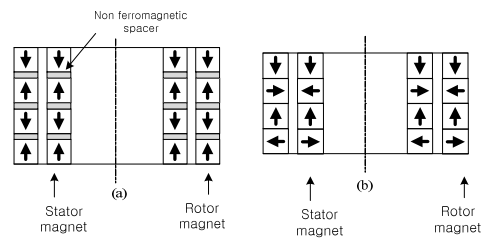


Fig. 1. Structure and magnetization patterns of PMB (a) Axial array type, (b) Halbach array type

기 위한 축 방향 영구자석형 베어링으로서 중공축 회전체의 내부에 베어링의 회전자 외경이 부착되고, 고정자 내경은 시스템 지지축에 고정된다. Fig. 1 은 수동형 자기베어링의 개략적인 단면구조를 보여주는 그림으로서, 회전자 자석과 고정자 자석으로 이루어져 있으며, 각각의 자석은 환형의 영구자석이 몇 개의 층으로 쌓여서 구성되어 있다. 쌓여진 환형의 자석은 어느 한 방향으로 자화가 되어 있는데, 회전자와 고정자 사이에 축 방향 변위가 존재하지 않으면 축 방향 힘은 발생하지 않는다. Fig.1(a)는 수동형 자기베어링의 축 방향 배열의 구조로서 환형 영구자석의 자화는 축 방향으로 180°씩 교대로 되어있다. 환형 영구자석 사이에는 비자성 물질로 간극을 만들어 자석 사이를 띄게 된다. Fig.1(b)는 수동형 자기베어링의 Halbach 배열 구조로서 영구자석 단면의 자화방향이 90° 씩 돌아가며 이루어져 있으며 영구자석 층간 간극은 없다. 일반적으로 Halbach 배열구조는 축 방향 배열구조보다 강한 힘을 생성하지만, 제작 상의 어려움과 고비용의 단점을 가진다. Fig. 2 는 축 방향 베어링의 개념을 Fig.1(a)구조에 대하여 나타낸 그림이다.  $Z_{off}$  는 회전자와 고정자간의 축 방향 변위를 나타내며  $L_{sep}$  는 자석층간의 공극의 크기를 의미한다. 자석층간의 공극은 축 방향 배열구조에서 발생하는 축 방향 힘의 크기를 증가시키는 효과를 준다.

† 교신저자; 충남대학교 메카트로닉스공학과  
E-mail : mnoh@cnu.ac.kr

Tel : (042) 821-6877, Fax : (042) 823-4919

\* 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

\*\* 한국과학기술연구원

\*\*\* 전력연구원

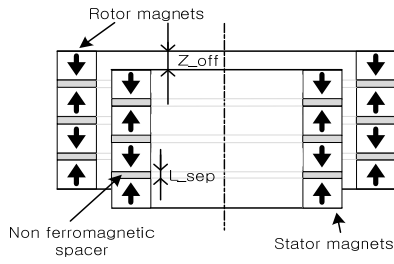


Fig. 2. Thrust bearing concept with axial permanent magnet array

### 3. Optimization

본 논문의 영구자석 베어링은 플라이휠 에너지 저장장치에 적용되는 축 방향 베어링으로서 요구부하용량을 만족하면서 플라이휠이 회전하는 동안 베어링의 회전자에 받는 원심응력이 최소화 되도록 영구자석 구조를 최대한 작게 설계하는 것이 중요하다. 이를 위해 2700N의 요구부하용량을 만족하면서 영구자석의 부피는 최소화하는 식을 목적함수로 사용하여 최적설계를 수행하였다. 이 때, 베어링의 고정자와 회전자의 지름과 반경방향 공극의 크기는 고정하고 영구자석 한층의 높이  $L_{sep}$ ,  $Z_{off}$ , 층의 개수 등을 최적화 과정을 통하여 구하였다. 베어링에서 발생하는 축 방향 힘은 등가전류판 방법에 의해 다음과 같은 식[2]으로 표현된다.

$$f_z = \frac{\mu_0 H_c^2}{4\pi} \int_{s_1} \int_{s_2} \frac{s_2 - s_1}{|s_2 - s_1|^3} ds_2 ds_1 \quad (1)$$

Fig.3 은 최적화된 축 방향 배열구조의 설계변수를 이용하여 축 방향 변위에 대한 베어링의 축 방향 힘의 관계를 나타낸다. 일정 수준의 변위까지 발생하는 힘은 증가하나 변위가 계속 커지면 힘은 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 4 는 Halbach 배열구조의 힘과 축 방향 변위에 대한 그래프이다. 베어링의 설계 변수 최적화 결과는 Table 1 에 명시되어 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 대용량 플라이휠 에너지 저장장치의 자중을 지지하기 위한 영구자석형 축 방향 베어링의 최적설계를 수행하였다. 축 방향 힘을 계산하기 위하여 등가전류판 방법을 이용하였고, 요구부하용량인 2700N 을 만족시키면서 영구자석의 부피를

Table 1. Optimization results

Array pattern	No. Layers	PM height [mm]	$L_{sep}$ [mm]	$Z_{off}$ [mm]	PM volume [cm <sup>3</sup> ]	Force [N]
Axial array	3	10.5	6.3	8.3	2541	2700
Halbach array	3	7.8	-	7.4	1882	2700

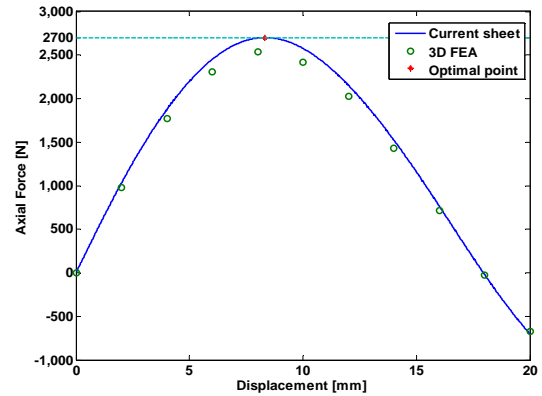


Fig. 3. Variation of axial force with respect to axial displacement of axial array type

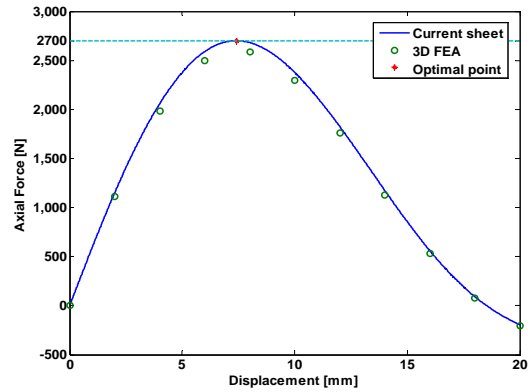


Fig. 4. Variation of axial force with respect to axial displacement of Halbach array type

최소화하는 베어링의 설계변수를 최적화 과정을 통해 구하였다. 최적화 결과는 3D FEA 결과와 비교 검증하여 축방향 배열의 경우 약 5%, Halbach 배열의 경우 약 3%의 오차를 보이는 것으로 나타났다.

### 5. 참고 문헌

- (1) O.J.Fiske, M.R. Ricci, "Third Generation Flywheels For High Power Electricity Storage," Proc. of MAGLEV' 2006.
- (2) C. Chen, B. Paden, J. Antaki, J. Ludlow, D. Paden, R. Crowson and G. Bearnson, "A Magnetic Suspension Theory and Its Application to the HeartQuest Ventricular Assist Device," Artificial Organs, Vol. 26, No. 11, pp. 647-951, 2002.