초소형 플라이휠 에너지 저장장치의 설계

이지은[†] · 유승열[*] · **노명규**[**]

Design of Micro Flywheel Energy Storage System

Ji-eun Yi, Seong-yeol Yoo and Myounggyu Noh

Key Words : Flywheel energy storage system(플라이휠 에너지 저장장치), Passive magnetic bearing(수동형 자기베어링)

Abstract

Flywheel energy storage systems have advantages over other types of energy storage devices in such aspects as unlimited charge/discharge cycles and environmental friendliness. In this paper we propose a millimeter scale flywheel energy storage device. The flywheel is supported by a pair of passive magnetic bearings and rotated by a toroidally wound electric motor/generator. The geometry of the bearings is optimized for the maximum dynamic performance.

기호설명

μ_0 : 공기의 투자율 (H/m)
H_c : 포화 보자력 (A/m)
K_r : 반경 방향으로의 강성(N/m)
K_z : 축 방향 강성 (N/m)
K_φ : 편주 강성 (N/m)
L_b : 수동형 자기 베어링의 축 방향 길이 (m)
D_b : 수동형 자기 베어링의 공극 지름 (m)
$\mathbf{M}$: 자화 벡터 (A/m)
ψ : 포텐셜 함수
$\mathbf{H}$: 보자력 벡터 (A/m)
M_r : 반경 방향의 자성 (A/m)
M_θ : 각 방향의 자성 (A/m)
B_r : 반경 방향 자속 밀도 (T)
H_θ : 각방향 보자력 (A/m)
T_a : 모터의 a-상에서의 토크 (Nm)
θ_a : 모터의 a-상 코일이 위치한 각도 (rad)
θ_c : 모터의 a-상 코일이 분포된 각도 (rad)

† 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단
* 충남대학교 BK21 메카트로닉스 사업단
* 충남대학교 메카트로닉스 전공
E-mail : mnoh@cnu.ac.kr
TEL : (042)821-6877 FAX : (042)823-4919

N_a : 모터의 a-상 코일이 감긴 수
I_a : 모터의 a-상에 흐르는 전류 (A)
I_0 : 전류의 크기 (A)
V_0 : 전압의 크기 (V)
N : 모터에서의 각 코일이 감긴 수
f : 모터에서의 전기적 주파수 (Hz)
m : 회전체 질량 (kg)
x : x-축으로의 변위 (m)
y : y-축으로의 변위 (m)
F_x : x 방향으로 작용하는 힘 (N)
F_y : y 방향으로 작용하는 힘 (N)
z_i : 회전체의 무게 중심과 수동형 자기베어링의 무게중심 사이의 거리 (m)
δ_x : 회전체 무게중심에서의 x-축으로의 회전각 (rad)
δ_y : 회전체 무게중심에서의 y-축으로의 회전각 (rad)
N_s : 수동형 자기베어링의 수
T_x : x 방향으로 작용하는 토크 (Nm)
T_y : y 방향으로 작용하는 토크 (Nm)
I_p : 축 방향으로의 관성 모멘트 (kgm^2)
I_r : 반경 방향으로의 관성 모멘트 (kgm^2)

1. 서 론

플라이휠 에너지 저장장치란 입력되는 전기적인 에너지를 회전하는 운동에너지로 변환시켜 저장하고, 필요 시 다시 전기적인 에너지로 변환하여 내보내는 장치이다. 이것은 매우 높은 효율과 반영구적인 수명을 가지고 있으며 친환경적인 시스템으로서 기존의 화학적인 에너지 저장장치를 대체하기 위해 최근 이 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다.

이러한 플라이휠 에너지 저장장치를 설계할 때 중요한 요소 중 하나가 마찰력이다. 플라이휠 에너지 저장장치는 회전 운동의 형태로 에너지를 저장하기 때문에 회전할 때의 마찰력이 효율을 결정할 때 많은 영향을 끼칠 수 있기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 마찰력을 최소로 줄이기 위해 영구자석을 이용한 수동형 자기베어링을 채택하여 비접촉식으로 플라이휠이 회전할 수 있도록 하였다. 이런 수동형 자기베어링을 설계할 때는 적절한 강성을 내기 위하여 자석의 종류와 크기, 배열 등을 고려해야 하는데, 일반적으로는 자기베어링의 강성을 계산하기 위한 방법으로 유한 요소 해석법(finite element method, FEM)[1]이나 맥스웰 방정식을 기초로 한 해석적 방법[2]이 사용되었다. 하지만 유한요소해석 방법은 정확도가 높은 반면 계산 시간이 오래 걸려 설계변수에 따른 최적 설계에 어려움이 있으며, 해석적인 방법은 유도 과정에서 사용한 여러 가정들로 인해 정확도가 떨어져 설계의 신뢰도를 확보하기 어렵다는 단점을 가지고 있다. 따라서 여기서는 등가 전류판(current sheet)를 이용한 방법[3]을 사용하여 빠른 시간 안에 비교적 높은 정확도로 수동형 자기베어링이 가질 수 있는 최적의 강성을 찾도록 하였다.

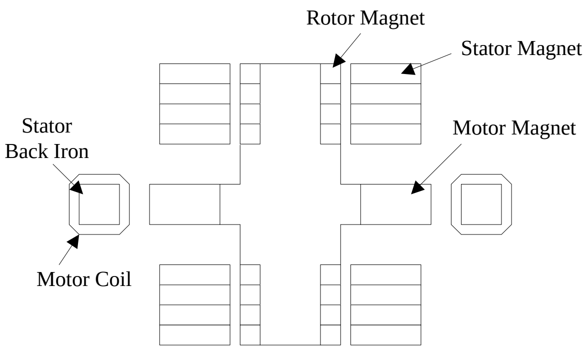

Fig. 1. The concept of micro flywheel energy storage system.

그리고 이러한 플라이휠을 돌리는 toroidally-wound BLDC 모터는 반경 방향으로의 공극을 비교적 넓게 유지하며 작동할 수 있고 크기가 소형 시스템에 알맞으며 효율이 높다.

위의 내용을 바탕으로 본 논문에서는 플라이휠 에너지 저장장치의 형상을 설계할 것이며, 회전체의 동역학적인 모델링을 통하여 제약된 공간 안에서 플라이휠이 최대의 회전속도를 낼 수 있도록 하는 최적의 설계변수를 찾을 것이다.

2. 시스템의 구성

본 장치는 toroidally-wound BLDC 모터와 수동형 자기베어링으로 구성되어 있다. 회전자를 돌리는 역할은 모터가 수행 하고, 다층 구조의 영구자석은 비접촉식으로 회전자의 중심축을 고정 시키는 역할을 한다.

Fig.1 은 시스템의 단면을 그린 그림이다. 회전체의 위와 아래에 각각 4 층 씩 환형의 영구자석으로 된 수동형 자기베어링이 위치해 있고, 그 사이에 모터 역할을 하는 자석과 그 주위에 코일이 감기는 철심이 위치한다.

여기에서 중요한 것이 이 저장장치가 얼마만큼의 에너지를 저장할 수 있는가에 대한 것이다. Fig.2 는 에너지의 저장 용량에 대한 회전 속도와 관성 모멘트 사이의 관계에 대한 그래프이다. 굵은 실선은 15mWh, 가는 실선은 10mWh, 점선은 5mWh 를 저장하게 될 때의 회전 속도와 관성 모멘트에 대한 그래프이다. 본 연구에서는 이러한 형상의 초소형 플라이휠

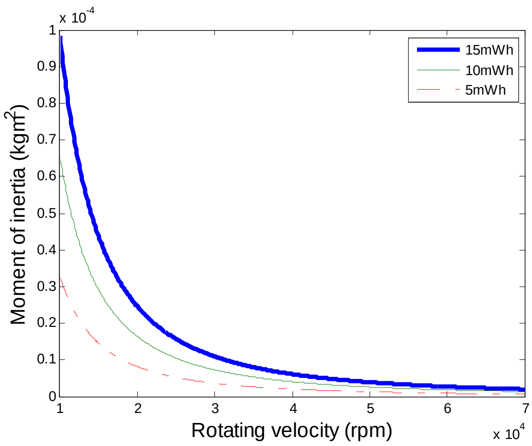

Fig. 2. The relationship between rotating velocity and moment of inertia to capacity.

에너지 저장장치가 가는 실선으로 그려진 10mWh 의 저장 용량을 가지는 것을 목표로 하고 있다.

3. 영구자석을 이용한 수동형 자기베어링

3.1 수동형 자기베어링의 구성

수동형 자기베어링의 단면을 보면 환형의 자석은 어느 한 방향으로 자화가 되어있다. 이러한 수동형 자기베어링은 단층으로 구성될 수도 있지만 여러 층으로 구성될 수도 있다. 자석을 여러 층으로 쌓을 경우, 단층에 비해 높은 강성을 낼 수 있다[4]. 이렇게 여러 층으로 쌓이는 구조를 가지는 자석은 Fig.3 처럼 두 종류로 나눌 수 있는데, 단면에서 보면 (a)는 axial array 로 자화방향이 위, 아래를 반복하여 쌓여있는 구조이고, (b)는 Halbach array 로 자화방향이 90°씩 회전하면서 쌓이는 구조이다. Axial array 보다 Halbach array 가 더 높은 강성을 낼 수 있지만[4], 제작 상에 어려움이 있으므로 여기에서는 axial array 에 대해서 다루기로 한다.

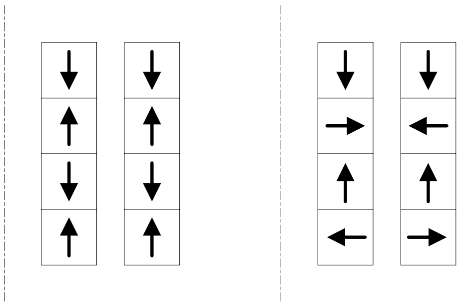

Fig. 3. Permanent magnet radial bearings. (a)Axial array, (b)Halbach array.

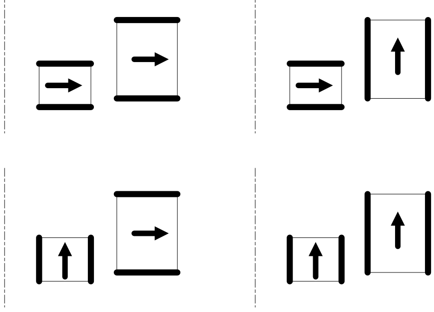

Fig. 4. Four types of the sections of magnet rings.

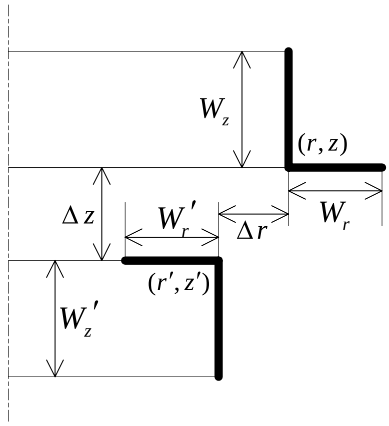

Fig. 5. Simplification of current sheets.

3.2 등가 전류판을 이용한 수학적 계산방법

자석의 재료가 균일하다고 가정을 하면 여기에서의 모델은 선형성을 띄게 되며, 따라서 회전자와 고정자 사이의 힘은 각각의 자석 사이의 힘을 더함으로써 구할 수 있게 된다. 그 방법은 회전자의 등가 전류판과 고정자의 등가 전류판 사이의 강성을 계산하여 그 값들을 더하는 것이다. Fig.4 를 보면 하나의 자석에 한 쌍의 등가 전류판이 있는데, 이 등가 전류판을 수치적으로 표현하기 위해 좀 더 단순화 시킨 것이 Fig.5 이다. 원래의 시스템은 r-z 좌표계를 써야 하지만 여기에서는 2-D 로 해석하기 위해 x-y 좌표계를 썼고, 환형의 영구자석의 등가 전류판을 z 축 방향으로 길게 폈다고 가정하였다. 이것을 이용하여 설계에 필요한 축 방향 강성을 구할 수 있는데 그 식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} K_z = \mu_0 H_C^2 R_{aver} \{ & S_1(W_z', W_z, \Delta r, \Delta z) \\ & - S_1(W_r', W_r, \Delta z, \Delta r) - S_2(W_r, W_z', \Delta z, \Delta r) \\ & - S_2(W_r', W_z, \Delta z, \Delta r) \end{aligned} \quad (1)$$

그리고 위 (1) 식에서의 S_1과 S_2는 아래와 같이 정의 된다.

$$\begin{aligned} S_1(w_1, w_2, \Delta_1, \Delta_2) = & \frac{1}{2}\ln\{(\Delta_1^2 + \Delta_2^2)[\Delta_1^2 \\ & + (w_1 + w_2 + \Delta_2)^2]\} \\ & - \frac{1}{2}\ln\{[\Delta_1^2 + (w_2 + \Delta_2)^2][\Delta_1^2 \\ & + (w_1 + \Delta_2)^2]\} \end{aligned} \quad (2)$$

$$S_2(w_1,w_2,\Delta_1,\Delta_2)=\tan^{-1}\frac{\Delta_2}{w_2+\Delta_1}+\tan^{-1}\frac{w_1+\Delta_2}{\Delta_1}$$
$$-\tan^{-1}\frac{w_1+\Delta_2}{w_2+\Delta_1}-\tan^{-1}\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \quad (3)$$

반경 방향의 강성은 Earnshaw 정리를 이용하여 축 방향의 강성으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_r=-\frac{K_z}{2} \quad (4)$$

그리고 축방향의 편주 강성은 이를 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$K_\varphi=\frac{1}{12}(L_b^2-3D_b^2)K_r \quad (5)$$

이렇게 다층 구조로 되어 있는 수동형 자기베어링의 경우, 회전자 자석 각각의 등가 전류판과 고정자 자석 각각의 등가 전류판에 작용하는 강성을 구하고 이의 총합을 통해 베어링 전체의 강성을 구할 수 있다. 이 방법은 여러 변수에 대한 계산을 비교적 높은 정확도를 가지고 빠르게 이루어질 수 있도록 하여 제한된 값 안에서 최적의 설계 변수를 찾을 수 있게 해준다.

3.3 수동형 자기베어링의 최적화를 위한 계산

여기에서 쓰일 영구자석의 재질은 NdFeB로 축 방향의 높이는 4mm이다. 이 자석의 층을 베어링 하나에 4 층으로 하고 고정자의 외경과 회전자의 내경은 각각 35mm, 16mm이고 그 사이의 공극이 0.2mm라고 가정하고 회전자의 외경과 고정자의 내경을 정해야 한다고 할 때, 위에서 언급한 식을 사용하여 그 치수를 구할 수 있다. Fig.6 는 이런

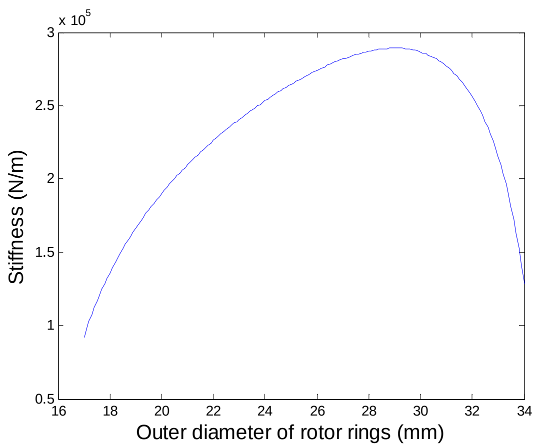

Fig. 6. Radial stiffness versus outer radius of rotor rings.

과정을 통하여 구한 회전자의 외경에 따른 반경 방향 강성을 구한 것이다. 여기에서 강성은 증가하다가 회전자 외경이 29mm일 때 2.8924×10^5N/m로 가장 높은 강성을 보이다가 그 이후로는 강성이 감소한다. 하지만 강성만이 최대 회전 속도에 절대적인 영향을 주는 것이 아니라 회전체 전체의 질량이나 그 형상 또한 영향을 줄 수 있기 때문에 회전자 외경의 최적 치수는 그 관계에 따라 결정될 것이다. 그 내용은 다음에 설명할 동역학 모델링에서 언급한다.

4. 동역학 모델링

진동하는 물체는 고유진동수를 가지며 진동하는 주파수가 이러한 고유진동수와 일치될 때 공진 현상이 나타난다. 공진 현상이 일어나게 되면 시스템이 불안정해지게 되는데, 회전하는 물체도 진동의 범주에 속하므로 공진현상이 일어나는 주파수에 상응하는 회전수를 찾아 그 범위 내에서 회전 시키도록 해야 한다. 이러한 고유진동수는 동역학 모델링을 통하여 구할 수 있다.

모델링을 위해 움직임이 거의 없고 감쇠는 무시할 수 있다고 가정하면 회전 동역학 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x}=F_x-x\sum_{i=1}^{N_s}K_r-\delta_{y_0}\sum_{i=1}^{N_s}K_r z_i \quad (6)$$

$$m\ddot{y}=F_y-y\sum_{i=1}^{N_s}K_r+\delta_{yx}\sum_{i=1}^{N_s}K_r z_i \quad (7)$$

$$I_r\ddot{\delta}_x+I_p\Omega\dot{\delta}_y=T_x-\delta_x\sum_i^{N_s}\left(K_\varphi+K_r z_i^2\right)+y\sum_i^{N_s}K_r z_i \quad (8)$$

$$I_r\ddot{\delta}_y-I_p\Omega\dot{\delta}_x=T_y-\delta_y\sum_i^{N_s}\left(K_\varphi+K_r z_i^2\right)-x\sum_i^{N_s}K_r z_i \quad (9)$$

이것을 정리하면 다음과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\ddot{x}=-\frac{\sum K_r}{m}x-\frac{\sum K_r z_i}{m}\delta_y \quad (10)$$

$$\ddot{y}=-\frac{\sum K_r}{m}y+\frac{\sum K_r z_i}{m}\delta_x \quad (11)$$

$$\ddot{\delta}_x=\frac{\sum K_r z_i}{I_r}y-\frac{\sum\left(K_\varphi+K_r z_i^2\right)}{I_r}\delta_x-\frac{I_p}{I_r}\Omega\dot{\delta}_y \quad (12)$$

$$\ddot{\delta}_y=-\frac{\sum K_r z_i}{I_r}x-\frac{\sum\left(K_\varphi+K_r z_i^2\right)}{I_r}\delta_y+\frac{I_p}{I_r}\Omega\dot{\delta}_x \quad (13)$$

이것을 $\dot{x} = \mathbf{A}x$ 꼴의 행렬로 표현하게 되면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \delta_x \\ \dot{\delta}_x \\ \delta_y \\ \dot{\delta}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\sum K_r}{m} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{\sum K_r z_i}{m} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{\sum K_r}{m} & 0 & \frac{\sum K_r z_i}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sum K_r z_i}{I_r} & 0 & -\frac{\sum\left(K_\varphi + K_r z_i^2\right)}{I_r} & 0 & 0 & -\frac{I_p}{I_r}\Omega \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\sum K_r z_i}{I_r} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{I_p}{I_r}\Omega & -\frac{\sum\left(K_\varphi + K_r z_i^2\right)}{I_r} & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \delta_x \\ \dot{\delta}_x \\ \delta_y \\ \dot{\delta}_y \end{bmatrix}$$

본 시스템의 임계속도는 **A** 행렬의 고유값 중 허수부분을 확인하여 구할 수 있다. 이것이 회전체의 고유진동수 이므로 이로써 설계된 시스템의 최대 회전 속도를 알 수 있다.

5. 모터의 설계

여기서 사용될 모터는 반경 방향으로의 공극을 가지는 toroidally-wound BLDC 모터이다. 이 모터는 효율이 높고 넓은 공극을 가지고도 작동이 되기 때문에 본 시스템과 같은 소형 시스템에 적합하다. 그 형상은 Fig.7 에 나타낸 것과 같다. 가운데의 환형 자석이 회전자 부분에 장착되고 주변에 고정자 부분에는 철심에 코일을 감아 회전자가 돌도록 설계된다.

여기에서 쓰이는 자화 벡터는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{M} = H_c \cos\theta\ \hat{\mathbf{r}} \tag{14}$$

이것을 정자기 해석에서의 Maxwell 법칙을 이용하여 포텐셜 함수로 나타내면 아래의 식과 같다.

$$\nabla^2\psi = \nabla\cdot\mathbf{M} \tag{15}$$

여기에서 포텐셜 함수 ψ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{H} = -\nabla\psi \tag{16}$$

그리고 모터에 구역을 나눈 후, 각 구역마다의 포텐셜 함수를 일반적인 해법으로 나타내었다.

$$\psi = (C_1 r + D_1 r^{-1})\cos\theta,\quad 0 < r < R_1 \tag{17a}$$

$$\psi = (C_2 r + D_2 r^{-1})\cos\theta,\quad R_1 < r < R_2 \tag{17b}$$

$$\psi = (C_3 r + D_3 r^{-1})\cos\theta,\quad R_2 < r < R_3 \tag{17c}$$

여기에서 C_1 , C_2 , D_1 , D_2 를 구하기 위한 경계값 조건이 다음과 같이 주어진다.

① $r = 0$ 일 때, ψ 는 유한하다.
② $r = R_1$ 일 때, B_r 과 H_θ 는 일정하다.
③ $r = R_2$ 일 때, B_r 과 H_θ 는 일정하다.
④ $r = R_3$ 일 때, $H_\theta = 0$ 이다.

이 조건들을 이용하여 공극에서의 포텐셜 함수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\psi = -\frac{H_c}{2}\left\{\left[\left(\frac{R_2}{R_3}\right)^2 - \left(\frac{R_1}{R_3}\right)^2\right] r + \left(R_1^2 - R_2^2\right) r^{-1}\right\}\cos\theta \tag{18}$$

이것을 이용하여 공극에서의 반경 방향 자속 밀도를 구하는 식을 얻을 수 있다.

$$B_r = \frac{\mu_0 H_c}{2}\left[\left(\frac{R_2}{R_3}\right)^2 - \left(\frac{R_1}{R_3}\right)^2\right]\left[1 + \left(\frac{R_3}{r}\right)^2\right]\cos\theta \tag{19}$$

여기에서 한 상에서의 회전 토크는 다음과 같다.

$$T_a = k_b k_r (\mu_0 H_c) N_a I_a \cos\theta_a \tag{20}$$

여기에서 k_b 와 k_r 는 아래와 같이 정의 된다.

$$k_b = \frac{\sin(\theta_c/2)}{\theta_c/2} \tag{21}$$

$$k_r = \frac{4R_3^2 + R_3 R_c + R_c^2}{3(R_3^2 - R_1^2)(R_3 - R_c)} \times \left[\frac{1}{2}(R_2^2 - R_1^2) + R_1^2 \log\left(\frac{R_2}{R_1}\right)\right] \tag{22}$$

앞서 제시한 모터는 세 개의 상을 가지는 BLDC 모터이므로 위에 정리된 회전 토크를 이용하여 전체 모터의 토크를 구할 수 있다.

$$T = 3k_b k_r (\mu_0 H_c) N I_0 \cos\theta_0 \tag{23}$$

이렇게 구한 토크와 동력과의 관계식을 세워 입력되는 전압을 구하는 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{V_0}{N} = 4\pi k_b k_r \mu_0 H_c f \tag{24}$$

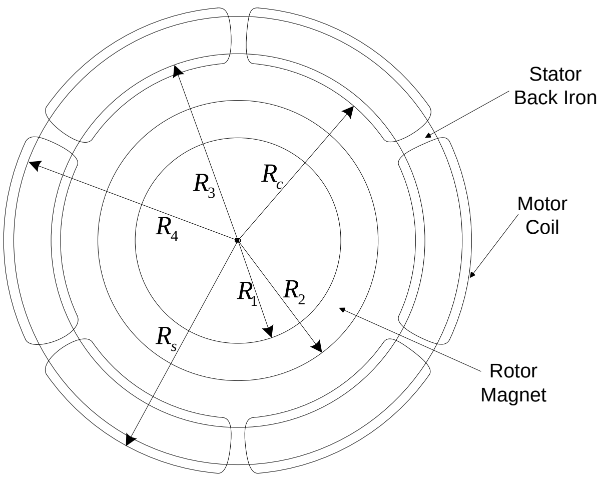

Fig. 7. The geometry of toroidally-wound BLDC motor.

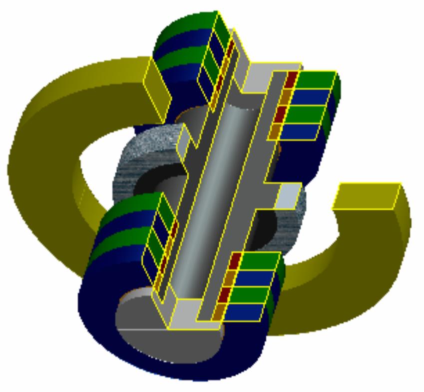

Fig. 8. The configuration of system.

6. 설계 결과

Fig.8 처럼 구성된 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치가 얼마만큼의 용량을 저장할 수 있는지를 알기 위해 위의 동역학 모델링 부분에서 나열한 수식을 이용하여 최적의 베어링 치수를 계산하고 그 결과에 대한 최고 속도를 얻어야 한다.

Fig.9 는 그 결과 그래프이다. 최고의 회전 속도를 낼 수 있는 회전자 외경은 20.0mm 이다. 이것은 수동형 자기베어링의 최적화에서 구한 값과는 다른 수치이며, 그 이유는 최대 회전 속도를 제한하는 공진 주파수가 강성뿐 아니라 회전체의 형상과 질량, 관성모멘트, 회전체 전체의 무게중심과 베어링의 무게중심 사이의 거리 등에 영향을 미치기 때문이다.

이렇게 구한 회전자 외경에서의 회전속도는 19170rpm 이며, 이것을 이용하여 저장 용량을 계산하면 1.967mWh 가 나온다. 이는 원래 목표로 하였던 10mWh 의 1/5 정도 되는 수치이며 용량을

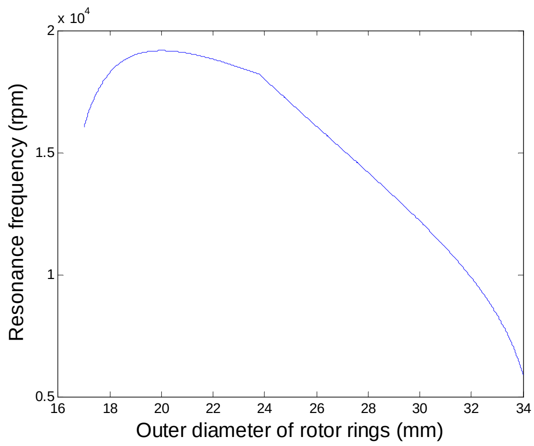

Fig.9. Optimal outer diameter of rotor rings.

늘리기 위해서는 회전 속도를 높이거나 회전체의 치수를 조정하는 방법을 사용할 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 소형 시스템에 적합한 초소형 플라이휠 에너지 저장장치의 설계에 대해서 언급하였다. 이것을 작동 시키기 위해서 toroidally-wound BLDC 모터를 채택하였고 영구자석을 이용한 수동형 자기베어링을 회전체의 위와 아래에 장착하여 반경 방향의 안정성을 얻도록 하였다. 여기에서의 논점은 이들의 동역학적인 상관 관계를 이용하여 식을 세우고 모델링 하여 한정된 공간 안에서 최대의 효과를 걷을 수 있도록 하는 최적화 설계이고, 이를 이용하여 본 연구에서 목표로 하는 10mWh 급 초소형 플라이휠 에너지 저장 장치를 설계하는 것이 추후 연구 과제이다.

참고문헌

[1] Roland Moser, Jan Sandtner, and Hannes Beleuler, 2006, "Optimization of repulsive passive magnetic beařigns," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 42, No. 8, pp. 2038~2042

[2] Brad Paden, Nelson Groom, James F. Antaki, 2003, "Design formulas for permanent-magnet bearings," *Transactions of the ASME*, Vol. 125, pp. 734~738

[3] Chen Chen, Brad Paden, James Antaki, Jed Ludlow, Dave Paden, Randolph Crowson, and Gill Bearnson, 2002, " A magnetic suspension theory and its application to the HeartQuest ventricular assist device," *Artif Organs,* Vol. 26, No. 11, pp. 947~951

[4] Jean-Paul Yonnet, Guy Lemarquand, Sophie Hemmerlin and Elisabeth Olivier-Rulliere, 1991, "Stacked structures of passive magnetic bearings," *American Institute of Physics,* Vol. 70, No. 10, pp. 6633~6635