

하이브리드 스러스트 마그네틱 베어링의 설계 파라미터 도출 및 특성 해석

장석명*, 이운호*, 고경진*, 최지환*, 성소영* 이용복*
 충남대학교* 한국 과학 기술원*

Characteristics and design parameter deduction of hybrid thrust magnetic bearing

Seok-Myeong Jang*, Un-Ho Lee*, Kyoung-Jin Ko*, Ji-Hwan Choi*, So-Young Sung* Yong-Bok Lee**
 Chungnam National University*, Korea Institute of Science and Technology**

Abstract - This paper deals with design parameters deduction and analysis of hybrid magnetic bearing. Using the solutions obtained from equivalent magnetic circuit, we predict the electromagnetic characteristics from permanent magnet and electromagnet and obtain the initial parameters. And then, using non-linear finite element analysis, a detailed design is performed considering saturation and asymmetry of flux density at the surface in order to meet requirements.

1. 서 론

현재 산업계에서 많이 쓰이는 기존의 회전기계 시스템에서 사용하는 접촉식 베어링은 회전체를 지지할 때 마찰, 마모, 소음 및 진동이 매우 클 뿐 아니라 윤활 장치에 의한 환경오염등 여러 가지 문제를 발생시키고있다. 이러한 문제 때문에 회전체를 고속으로 운전하기 어려울 뿐 아니라 고정정 크린룸과 같은 곳에서 사용하기 어렵다. 따라서 모터와 같은 회전체를 초고속으로 운전하기 위한 방법은 비 접촉으로 회전체를 지지하는 것이다. 이와 같은 비접촉 베어링은 마찰, 마모등의 문제가 없을 뿐 아니라 환경문제도 없다는 장점이 있으며, 공기 베어링과 자기 베어링을 예로 들 수 있다. 공기 베어링은 회전체와 고정자 사이의 수 미트론의 공극에 공기를 넣어 그 압력으로 회전체를 지지하는 시스템이고 자기 베어링은 전자석의 흡입력, 반발력을 이용하여 회전체를 공중에 부상함으로써 마찰을 없애고, 고속 회전을 가능하게 하며, 회전축을 정 위치에 지지하게 하는 방식의 베어링이다.[1][2]

자기 베어링은 크게 두 종류로 분류할 수 있다. 하나는 영구 자석에 의해 축이 지지되는 수동형 자기 베어링 (Passive Magnetic Bearing, PMB)이고, 다른 하나는 전자석에 의해 지지되는 능동형 자기 베어링 (Active Magnetic Bearing, AMB)이다. 본 논문에서는 베어링의 부피를 최소화 하고 전류에 의한 제어를 용이하게 하기 위하여 영구자석과 전자석을 모두 이용하는 하이브리드 타입의 스러스트 마그네틱 베어링의 설계 파라미터 도출 및 특성 해석에 관하여 다루기로 한다.

2. 하이브리드 마그네틱 베어링의 특성 해석

2.1 하이브리드 마그네틱 베어링의 수직력 특성

능동형 자기 베어링의 수직력은 등가 자기 회로법을 통해 예측된 인덕턴스로부터 구해질 수 있지만, 본 논문에서 제시하는 하이브리드 타입 자기 베어링은 전자석과 함께 영구자석에 의한 자계로부터 수직력이 발생하기 때문에 영구자석에 의한 공극 자속밀도 예측이 필수적이다. 이와 같은 시스템에서 공극의 자속밀도는 영구 자석에 의한 자속밀도(B_{pm})와 전자석에 의한 자속밀도(B_{em})의 합으로 나타나고 수직력은 자속밀도의 제곱에 비례한다.

2.1.1 전자석에 의한 수직력 특성

그림 1은 본 논문에 제시된 하이브리드 자기 베어링의 간략화 된 해석 모델과 등가 자기회로를 보여준다. 등가 자기회로의 자기저항은 식(1)과 같다.

$$R_g = \frac{g-x}{\mu_0 S} \quad R_c = \frac{2l_1 + l_2}{\mu_0 \mu_r S} \quad R_i = \frac{l_3}{\mu_0 \mu_r S} \quad (1)$$

여기서, R_x 는 자기저항, l_x 는 자속경로의 길이, $g-x$ 는 공극의 길이, μ_0 는 공기의 투자율($4\pi \times 10^{-7}$), μ_r 은 고정자 철심의 비 투자율을 나타낸다.

코일에 여자 전류를 인가하였을 때 고정자와 가동자 사이에 작용하는 자기력을 구하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 1) 하우징, 가동자의 투자율은 공기의 투자율에 비해 충분히 크다. 따라서 고정자와 가동자에서의 자기저항은 무시한다.
- 2) 하우징 슬롯 및 주변에서 발생하는 누설 자속은 무시한다.

코일에 인가되는 전류 i 와 턴수 N , 공극 $g-x$ 에 따른 인덕턴스를 L 이라 하면 이는 식(2)와 같이 정리된다.

$$L(g-x) = \frac{1}{2} N^2 \frac{\mu_0 S}{g-x} [H] \quad (2)$$

이때 가동자와 고정자 사이에 작용하는 자기력을 구하기 위한 magnetic co-energy는 식(3)로 표현된다.

$$W'_m = \int_0^i Lidi = \frac{1}{2} Li^2 \quad (3)$$

종속변수 i, x 를 갖은 co-energy의 변화량은 시스템의 한 일과 같기 때문에 힘은 식(4)로 계산된다.[3]

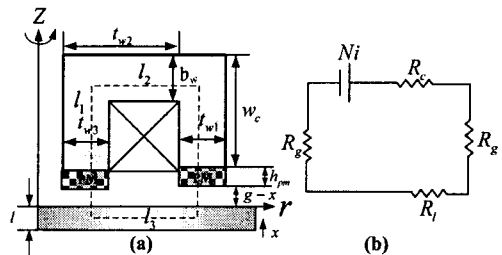


그림 1. 하이브리드 스러스트 마그네틱 베어링 : (a) 해석 모델, (b) 등가 자기회로

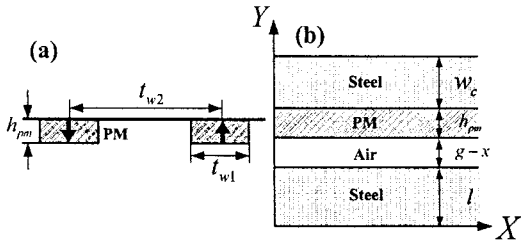


그림 2. 자속밀도 해석모델: (a) 영구자석 모델링 (b) 다중층 해석영역

$$F_{em}(i, x) = \frac{\partial W'_m}{\partial x} = \frac{\partial L}{\partial x} \frac{i^2}{2} = \frac{N^2 i^2 \mu_0 S}{4g^2} [N] \quad (4)$$

2.1.2 영구자석에 의한 수직력 특성

영구 자석에 의한 수직력을 도출하기 위해 식(4)는 maxwell stress equation로부터 식(5)와 같이 표현 된다.

$$F = \frac{B_0^2}{2\mu_0} S [N] \quad (5)$$

여기서, B_0 는 공극 자속밀도이다. 본 논문에서는 공극에서의 자속밀도를 영구자석의 자화 모델링을 통하여 다중층 해석법에 의하여 도출하였다. 그림2(a)는 자화 모델링을 위한 간략화 된 해석모델을 제시하고 식(6)과 식(7)로 표현된다.

$$M = \sum_{n=-\infty}^{\infty} Re(M_y e^{-jk_n x} i_y) \quad (6)$$

$$M_y = \frac{M_0}{2\pi n j} (e^{-jk_n t_{w1}/2} - e^{jk_n t_{w1}/2}) (e^{-jk_n t_{w1}/2} - e^{jk_n t_{w1}/2}) \quad (7)$$

여기서, M_0 는 영구자석의 자화량, n 은 공간고조파 차수, $k_n = n\pi/T$ 이다. (단, T 는 주기) $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}_n$ 의 관계 및 Coulomb gauge를 적용하면 식(8)과 같은 포아송 방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla^2 \vec{A}_n = -\mu_0 (\nabla \times \vec{M}) \quad (8)$$

식(8)로부터 식(9)와 같은 지배 방정식을 도출해 낼 수 있다.

$$A_{zn}''(y) e^{-jk_n x} - k_n^2 A_{zn}(y) e^{-jk_n x} = j\mu_0 k_n M_{yn} e^{-jk_n x} \quad (9)$$

자속밀도 특성식은 도출된 지배 방정식에 자속밀도와 자기벡터 퍼텐셜과의 관계($\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$)로부터 식(10)과 같이 나타낼 수 있고, 그림 2(b)에 제시된 영역에서의 경계 조건을 대입하여 얻어질 수 있다.

$$\vec{B}_{yn} = \frac{\partial}{\partial y} A_{zn} \quad (10)$$

2.2 하이브리드 마그네틱 베어링의 파라미터도출

본 논문에서 사용된 하이브리드 마그네틱 베어링은 그림 3(a)에서처럼 가동자의 축 방향 힘에 대한 제어를 목적으로 하고 있으며, 하우징의 부피와 구동 수직력에 부합하기 위한 슬롯의 전류밀도를 최소화하기 위하여 영구자석에 의한 수직력을 바탕으로 전자석에 의한 가변 위치 제어가 이루어진다. 가동자와 영구자석사이의 공극이 0

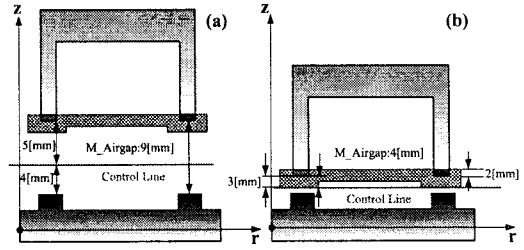


그림 3. 마그네틱 베어링의 위치: (a) 초기위치 (b) 영구자석에 의한 수직력 예측을 위한 고정자 위치

이면, 이상적으로는 무한대의 힘이 두 물체 사이에 작용하게 되므로 이를 방지하기 위하여 영구자석 주위에 3[mm]두께의 비자성체 캡을 설치하였다. 본 논문에서 사용되는 가동자의 질량은 1[kg]이기 때문에 가동자의 수직력을 제어하기 위해서는 최소 10[N]의 힘이 요구된다. 제어선상에서 가동자의 질량과 영구자석에 의한 수직력이 부합되도록 하기 위해서 그림 3(b)와 같이 제어선상에서 영구자석에 의한 수직력이 가동자의 중력에 약 1.5배에서 2배를 만족하도록 영구자석의 체적은 결정된다. 영구자석에 의한 수직력은 식(5)로부터 얻어질 수 있고, 이때 공극 자속밀도 예측에 사용된 다중층 해석법의 타당성 검증을 위해, 유한요소해석이 도입되었다. 그림 4는 xy좌표계에서 다중층 해석법에 의한 공극자속밀도의 예측이 유한요소해석에 의한 결과와 일치함을 보여주고 있다. 하지만 본 논문에서 적용되는 rz좌표계에서는 회전축에서 두 개의 영구자석에 이르는 반경의 차이로 인하여 면적의 비대칭이 발생하고, 자속밀도의 불균형이 발생한다. 따라서 해석적 방법으로부터 초기 설계 파라미터를 도출하고, 공극자속밀도의 불균형과 자계에 대한 고정자의 비선형적 특성을 고려한 유한 요소해석에 의한 상세 설계가 요구된다.

해석적 방법으로부터 영구자석에 의한 수직력(15[N])을 만족하는 설계 파라미터는 표 1에 제시되었다. 제시된 초기 설계 결과에 따른 유한요소해석으로부터 12[N]의 수직력을 얻을 수 있었다. 고정자 철심의 자속밀도가 0.7[T]인 것을 감안했을 때, 원통형 구조에서 발생하는 자극 면적의 비대칭으로부터 자속밀도의 불균형이 발생하고, 수직력에 상대적으로 더 큰 영향을 미치는 원주방향 자극의 자속밀도가 감소되어 전체 수직력을 감소시키는 효과를 낳았다. 그러므로 요구 수직력에

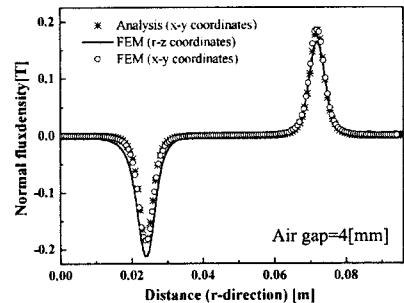


그림 4. 해석적 방법에 의한 공극 자속밀도와 FEM 결과

표 1. 마그네틱 베어링의 설계 파라미터 도출

	해석적 방법 (초기 설계)	유한요소 해석 (상세 설계)
t_{w1}	2.5[mm]	3[mm]
b_w	2.5[mm]	3[mm]
w_c	20[mm]	20[mm]
l	5[mm]	5[mm]
h_{pm}	2[mm]	2[mm]

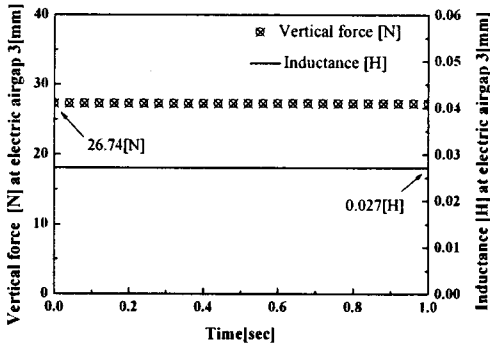


그림 5. 영구 자석에 의한 수직력(기계적 공극=0)

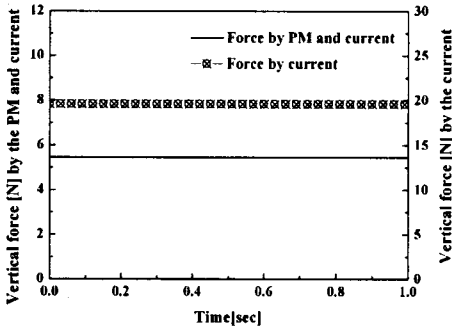


그림 6. 전자석에 의한 수직력과 영구자석과 전자석에 의한 수직력

부합하기 위해 영구자석의 너비 조정에 따른 자석의 면적을 표 1과 같이 수정하였다. 따라서 영구 자석의 너비는 0.5[mm]씩 증가하였고 수직력은 16.2[N]을 만족하였다. 전자석은 가동자의 초기구동과 운전영역 내에서의 변위를 제어하는 역할을 한다. 전자석에 요구되는 최대 수직력의 크기에 따라 권선영역의 넓이와 전류 밀도가 결정된다. 본 논문에 적용되는 전자석의 최대 수직력은 기계적 공극이 0일 때, 영구자석에 의한 수직력을 감소시키는 방향으로 작용하여 영구자석에 의한 수직력을 가동자에 작용하는 중력보다 작도록 설계되어야 한다. 따라서 비자성체로 인한 자기적 공극 3[mm](기계적 공극 0[mm])에서 작용하는 힘을 도출하고, 권선에 전류를 인가하여 영구자석에 의한 수직력을 가동자의 중력(10[N]) 이하로 가져갈 수 있도록 설계하였다. 그림 5는 자기적 공극 3[mm]에서의 유한 요소해석 결과에 의한 수직력을 나타낸다. 수직력이 27.25[N]이므로 전자석에 의한 수직력은 최소 17.25[N] 이상이 되어야 한다.

회전자와 고정자 사이의 기계적 공극이 0일 때, 전자석에 의한 수직력은 식(4)로부터 도출 될 수 있다. 이때 기계적 공극인 0[mm]이지만 전자기적 입장에서 비자성체의 두께(3[mm])와 영구자석의 두께(2[mm])를 고려한 자기적 공극은 5[mm]이다. 단 영구자석의 투자율은 공기와 같다고 가정하였다. 그림 6은 전자석에 의한 최대 수직력과 이때 감소된 영구자석에 의한 수직력을 보여준다. 영구자석과 반대 방향으로 전자석에 의한 수직력이 작용하여 전체 수직력은 5.6[N]이 되었고, 이는 가동자를 영구자석으로부터 분리시키기에 충분하다. 단, 최대 수직력에 부합하는 기자력을 위한 전자석의 턴 수는 250이고 최대 상전류 5[A]에서 3.1[A/mm²]의 전류밀도를 갖는다.

2.3 Open loop 특성 해석

그림 7은 공극에 따른 자기 인덕턴스의 변화를 나타낸다. 공극에 따른 인덕턴스 변화와 저항 값으로부터 하이브리드 스터스트 마그네틱 베어링의 DC link 전압의 크기와 시스템의 응답성을 고려한 PWM 스위칭 주파수를

결정할 수 있다. 가동자가 고속 회전기의 축으로써 사용되어진다면, 기계적 응답성은 최소 10[Hz] 이상이 되어야 하고, 전기적 응답성은 최소 10배 이상이 되어야 한다. 따라서 시스템의 저항값과 인덕턴스 변화에 대한 시뮬레이션 결과 DC link 전압은 최소 50[V] 이상이 되어야 한다. 또 시스템의 전류 리플을 고려하여, PWM 스위칭 주파수는 최소 10[kHz]를 만족해야 한다, 그림 8은 기계적 공극 5[mm]에서 10[kHz]의 PWM 주파수를 갖는 시스템의 개회로 특성을 보여준다.

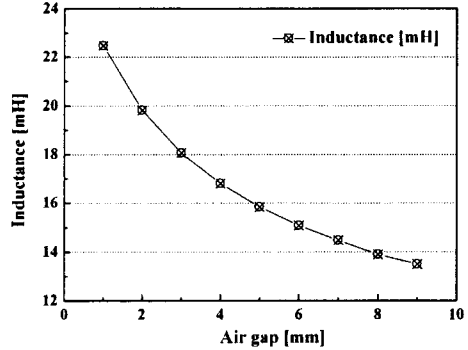


그림 7. 변위에 따른 자기 인덕턴스

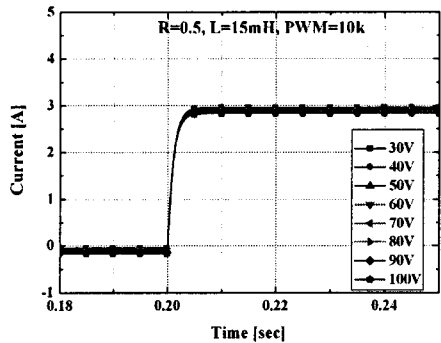


그림 8. 회로정수 시뮬레이션

3 결론

본 논문은 하이브리드 스터스트 마그네틱 베어링의 설계 파라미터 도출 및 전자기 특성에 대해 다루고 있다. 영구자석에 의한 수직력을 예측하기 위한 공극 자속밀도는 영구자석의 자화 모델링에 따른 다중층 해석법으로부터 얻어지고 해석적 방법에 의해 초기설계 파라미터를 도출하였다. 원통형 구조에서 발행하는 자속밀도의 불균형을 고려하기 위하여 유한요소 해석법이 도입되었고, 해석 결과에 입각한 상세설계와 더불어 영구자석과 전자석의 상호작용에 대한 검토도 이루어졌다. 향후, 래디얼 베어링에 대한 추가 설계와 더불어 동특성 시뮬레이션을 통한 검증과 제작 모델에 대한 구동 실험을 통하여 시뮬레이션의 적합성에 관한 연구를 진행 할 예정이다.

[참고 문헌]

- [1] 김종문, 최영규 “능동형 자기 베어링 시스템의 설계 및 제어”, 전기학회 논문지, v.53 no.2, 2004, pp.82-89
- [2] 강규홍, “50,000rpm급 초고속 소형 정밀모터용 능동 자기 베어링시스템 제어 및 설계” 전기학회 논문지, v.55 no.8, 2006, p.408-415)
- [3] 김승중 “능동 자기 베어링 지지 정밀 회전축계 해석” 한국과학기술원 석사학위 논문