

자기부상용 Halbach 자석 배열을 이용한 선형 능동자기 베어링의 최적설계

이학준¹, 안다훈^{2*}

¹한국생산기술연구원 지능형생산시스템연구부, ²공주대학교 기계자동차공학부

Optimal design of a Linear Active Magnetic Bearing using Halbach magnet array for Magnetic levitation

Hakjun Lee¹, Dahoon Ahn^{2*}

¹Intelligent manufacturing R&D group, Korea Institute of Industrial Technology

²Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University

요약 본 논문은 Halbach 자석 배열을 사용하여 새로운 구조의 선형 능동자기 베어링 개발을 제시하고자 하였다. 선형 능동자기 베어링은 자석 간 발생하는 자중 보상 능력과 코일에 전류를 인가함으로써 발생하는 동적 힘을 이용하여 반도체 장비, 가공 장비 등 다양한 산업분야에서 적용되고 있다. 기존의 선형 능동자기 베어링은 크기에 비해 동적 힘이 낮은 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 기존 보다 높은 동적 힘을 발휘하는 선형 능동자기 베어링을 개발하기 위해 시뮬레이션을 통해 기존 구조를 분석하고 새로운 구조를 제안하였다. 제안된 새로운 구조의 선형 능동 자기베어링을 최적화하기 위해서 모델링 및 최적 설계를 수행하였다. Sequential Quadratic Programming을 사용하여 제안된 선형 능동자기 베어링의 기하학적 설계 변수에 대해 최적의 설계가 수행되었으며, 최적설계 된 선형 능동자기 베어링의 설계 성능은 정적 힘 45.063 N, 로렌츠 힘 상수 19.543 N/A 로 기존보다 높은 동적 힘을 발휘하는 것이 확인되었다.

Abstract This paper presents a new structure for a linear active magnetic bearing using a Halbach magnet array. The proposed magnetic bearing consisted of a Halbach magnet array, center magnet, and single coil. The proposed linear active magnetic bearing has a high dynamic force compared to the previous study. The high dynamic force could be obtained by varying the thickness of a horizontally magnetized magnet. The new structure of Halbach linear active magnetic bearing has a high dynamic force. Therefore, the proposed linear active magnetic bearing increased the bandwidth of the system. Magnetic modeling and optimal design of the new structure of the Halbach linear active magnetic bearing were performed. The optimal design was executed on the geometric parameters of the proposed linear active magnetic bearing using Sequential Quadratic Programming. The proposed linear active magnetic bearing had a static force of 45.06 N and a Lorentz force constant of 19.54 N/A, which is higher than previous research.

Keywords : Linear Active Magnetic Bearing, Magnetic Levitation, Gravity Compensation, Halbach Magnet Array, Lorentz Force.

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20CTAP-C157468-01).

*Corresponding Author : Dahoon Ahn(Kongju Univ.)

email: dhahn@kongju.ac.kr

Received October 5, 2020

Accepted January 8, 2021

Revised January 4, 2021

Published January 31, 2021

1. 서론

자기부상 기술은 반도체 제조 장비, 디스플레이 제조 장비, 물류 이송 장비, 자기부상열차와 같은 다양한 정밀 제조 장비의 핵심 기술이다. 왜냐하면 자기부상 기술은 비접촉, 무윤활의 특성을 지니기 때문에 낮은 오염, 고속 운행, 낮은 고장률 등의 몇 가지 장점을 가지며 진공 속에서도 움직일 수 있는 이점을 가지고 있다. 이런 이점들로 인해 자기부상은 많은 산업분야에서 응용된다. 특히 자기부상 기술은 웨이퍼 스테이지, 제조 공정 스테이지 같은 고정밀도 제조 장비에 사용된다.

기존에는 자기부상 기술을 구현하기 위해 로렌츠 힘을 이용한 보이스코일 모터가 사용되었다. 보이스코일 모터는 긴 거리 운동에도 높은 대역폭을 얻을 수 있다. 그러나 보이스코일모터는 이동 플랫폼의 무게를 지탱하기 위하여 지속적으로 힘을 소모해야 하는 문제점이 있다. 이 경우에 코일 전류에 의해 발생하는 열이 기계적 구조를 변형시키고 시스템 정확도를 악화시키는 결과를 초래한다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 능동자기 베어링이 제안되었다.

Nijssse는 영구자석을 사용하는 무강성 자기 베어링[1]을 제안하였다. 무강성은 좋은 진동성능을 제공하나 작업 지점에서만 얻어지며 무강성 자기 베어링의 강성은 위치에 따라 달라지기 때문에 비선형의 컨트롤러가 요구된다. 또한 Nijssse가 제안한 베어링은 y방향으로 약 7000 N/m의 큰 parasitic 강성을 가진다. 큰 parasitic 강성은 정밀제어에 악영향을 미치게 된다. 이 문제를 극복하기 위하여 많은 연구들이 연구되었다[2-5]. 그러나 자석을 사용하는 것만으로 안정된 평형상태에서 영구자석을 유지하는 것은 불가능하였다. 그래서 자석을 이용한 중력 보상 메커니즘과 선형 전자기 액추에이터로 구성된 선형 능동자기 베어링(LAMB: Linear Active Magnetic Bearing)이 개발되었다. Hol은 영구자석과 로렌츠 코일 [6]를 사용하는 새로운 능동자기 베어링을 제안하였다. Hol이 제안한 LAMB는 긴 고정자 자석에 의해 생긴 자기장 때문에 이동자 자석은 일정한 부상력을 가지게 된다. 그러나 LAMB는 크기에 비해 작은 중력보상력(정적 힘)을 가진다. LAMB의 높은 힘 밀도를 얻기 위하여 Choi는 Halbach 자석 배열[7]을 이용한 새로운 능동자기 베어링을 제안하였다. Halbach 자석 배열은 자속을 목표 자석에 한정하기 때문에 큰 정적 힘을 가질 수 있다. 또한 두 개의 Halbach 자석 배열 사이에 내장된 두 개의 대칭 코일이 정적 힘 방향으로 동적 힘을 생성한다.

그러나 대칭 코일 구조로 인해 동적 힘이 다소 낮은 문제가 있다.

본 논문에서는 더 높은 동적 힘을 갖는 새로운 구조의 Halbach 선형 능동자기 베어링(HLAMB: Halbach Linear Active Magnetic Bearing)를 제안하였다. 자기부상 시스템에 적합한 HLAMB를 설계하기 위하여 설계 필요조건을 설명하고, 기존의 능동자기 베어링과 차이점을 확인하기 위해 시뮬레이션을 통한 구조의 당위성에 대해 설명하였다. 그리고 HLAMB를 제한된 크기 내에서 최적의 성능을 구현하고자 자석 모델링과 힘 모델링을 수행하였으며, 모델링을 이용하여 최적설계를 수행하였다.

2. 시스템 설계

2.1 설계 요건

높은 동적 성능 자기부상을 달성하기 위해서는 몇 가지 설계 요구사항이 필요하다. 다음은 HLAMB의 설계 요건을 나타낸다.

자기부상 스테이지를 6자유도로 이동하기 위해서는 HLAMB가 모든 방향으로 이동할 수 있어야 한다. 따라서 HLAMB는 모든 방향에서 충분한 이송 여유 공간을 갖도록 설계되어야 한다. 제안된 HLAMB는 z방향으로 ± 1 mm의 이송거리, x, y방향으로 ± 1 mm의 여유공간을 갖게 설계되었다.

또한 자기부상 스테이지는 이동자의 무게가 영구자석에 의해 보상되어야 한다. 본 논문의 HLAMB는 20 kg의 자기부상 이동자를 4개의 HLAMB를 사용하여 보상하는 것을 목표로 무게보상 목표를 설정하였다.

더 높은 대역폭의 HLAMB를 구현하기 위하여 코일에 의해 발생하는 동적 힘은 커야 한다. 큰 동적 힘은 이송자의 가속도에 영향을 주기 때문이다. 그리고 큰 가속은 고강성 시스템을 구현할 수 있다. 따라서 고강성 시스템을 달성하기 위해 HLAMB는 큰 동적 힘을 가져야 한다.

HLAMB는 무강성을 가져야 한다. 무강성은 좋은 진동성능을 제공하기 때문이다[8]. HLAMB의 정적 강성은 이송공간 위치 근처에서 선형적으로 변화하게 된다. 높은 대역폭을 구현하기 위해서는 정적 강성에 의해 유도된 공명 모드는 서보 대역폭에서 멀리 떨어져 있어야 한다. 따라서 이송 공간의 최대 강성을 낮게 유지해야 한다. 편의상 최대 정적 강성은 이송범위의 끝에서 발생하기 때문에 Eq. (1)과 같이 정의할 수 있다.

$$k_{z,max} = \left(-\frac{\partial F}{\partial z} \right)_{x=0, y=0, z=1mm} \quad (1)$$

HLAMB는 부상 방향을 제외한 5개 방향으로 parasitic 힘을 가지고 있다. Parasitic 힘은 스테이지의 동적 성능을 악화시키는 방해요인으로 작용한다.

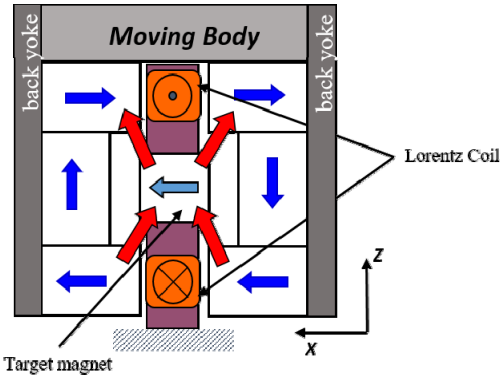


Fig. 1. Conceptual desing of proposed Halbach linear active magnetic bearing(HLAMB)

게다가 parasitic 힘이 크면 조립이나 공칭위치를 찾을 때 어려움을 줄 수 있다.

제안하는 HLAMB는 위에 열거한 설계 요구사항들을 만족하면서 설계되어야 한다. 위 요구사항들은 최적설계 시 구속조건으로 설정되어 반영될 예정이다.

2.2 Halbach 선형 능동자기베어링(HLAMB) 설계

위에 언급한대로, 이전 HLAMB는 시스템의 대역폭의 감소로 인해 작은 동적 힘을 갖는다. 따라서 동적 힘을 증가시키기 위해 Fig .1 에 나타난 새로운 구조의 HLAMB의 제안하고자 한다. 새로운 HLAMB 구조는 기존 HLAMB의 장점인 무게보상 힘을 그대로 유지하면서 상·하 자석의 자석 크기를 바꿔 코일에 작용하는 자속을 증가시킨다.

Fig. 1 과 같이 상·하 자석은 수평으로 자화 된다. 위쪽 자석은 중앙 자석을 끌어당기게 된다. 마찬가지로, 아래쪽 자석은 중앙 자석을 밀어내게 된다. 그리고 수직 위치를 능동적으로 제어하기 위해 자석 사이에 코일이 위치하게 된다. 또한 제안된 HLAMB는 백 요크를 가지고 있어 기존보다 자속을 강화시킬 수 있다. 코일과 중앙 자석은 고정자로서 지면에 함께 고정되어 있고, 두 개의 Halbach 자석 배열은 이송자에 고정되어 있다. 제안하는 새로운 구조의 HLAMB는 자석의 두께를 측면자석의 두께를 조절함에 따라 무게보상 힘을 증가시킬 수 있

며 코일에 작용하는 자속을 증가시켜 동적 힘을 증가시킬 수 있다.

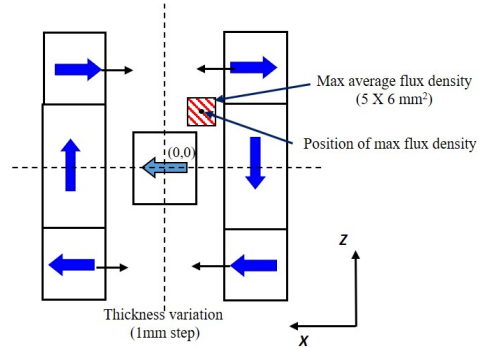


Fig. 2. Simulation condition of HLAMB

2.3 제안한 Halbach 선형 능동자기베어링(HLAMB)

구조의 동적 힘 증가 검증

새로 제안된 HLAMB의 장점을 설명하기 위해 상·하 자석 크기를 1 mm씩 늘려가면서 HLAMB의 자기장 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 2는 HLAMB의 시뮬레이션 조건을 보여주고 있다.

측면 자석의 크기는 10 × 40 × 42 mm³, 중심 자석의 크기는 10 × 10 × 10 mm³ 로 설정하였고, 측면 자석과 중앙 자석 사이의 간격은 7.2 mm 로 초기 시뮬레이션 조건을 설정하였다. 이 조건에서 우리는 자석의 두께가 x방향으로 1 mm 만큼씩 수평으로 자화된 자석의 두께를 증가시키면서 자속 밀도가 최대가 되는 지점에서 5 × 6 mm² 영역의 평균자속밀도와 그 위치를 관찰하였다.

Fig. 3은 HLAMB의 두께 변화 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Fig. 3(a)는 5 × 6 mm² 영역의 평균 자속 밀도를 보여주며, Fig. 3(b)는 최대 자속 밀도의 위치를 보여준다. 좌표의 원점은 중심 자석의 중심점이다. Fig. 3(b)에서 확인 가능하듯이 두께가 증가할수록 자속이 최대가 되는 지점이 중앙 자석과 측면 자석 사이의 대각선 지점이 아닌 중앙 자석의 위쪽으로 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 코일은 동적 힘을 최대화하기 위해 중앙 자석의 위와 아래에 배치되어야 한다. 또한 Fig. 3(a)에서 확인 가능하듯이 두께가 증가할수록 평균자속 밀도가 증가하였다. 그 이유는 측면 자석 사이의 거리가 감소함에 따라 측면 자석 사이에 자속이 더 집중되기 때문이다.

따라서 우리는 HLAMB의 새로운 구조를 통해 자속을 코일에 더 집중시키고, 동적 힘을 증가 시킬 수 있었다.

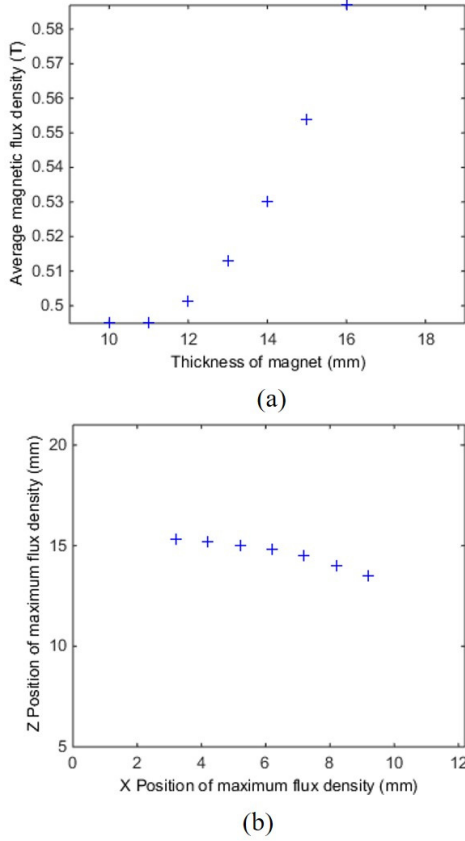


Fig. 3. Simulation results of thickness variation of HLAMB (a) average magnetic flux density, (b) position of maximum flux density

3. 이론적 모델링

제한된 크기에서 최적의 성능을 얻으려면 시스템 최적화가 필요하다. 최적화를 수행하기 위해서는 시스템 모델링이 선행되어야 한다. 정적 힘과 로렌츠 힘을 계산하려면 먼저 자석 배열의 자속을 얻어야 한다. 이전 연구에서 몇 가지 자기 모델링이 제시되었다. 집중 모델이라 불리는 자기 회로 모델[9], 유한 요소 모델이라 불리는 정자기 모델 [10], 자기 노드[11], 에너지 방법[12], 표면 전류 모델[10] 그리고 전하 모델[8]. 본 논문에서는 언급한 해석 모델링 방법 중 표면 전류 모델을 사용하였다.

Fig. 4는 간단한 수직 자화 자석 블록을 나타내 준 것으로 두께 dz_0 인 자석 A'B'C'D'에서 생성되는 P점의 자속은 Eq. (2)와 같이 비오사바르트식에 의해 얻어질 수 있다.

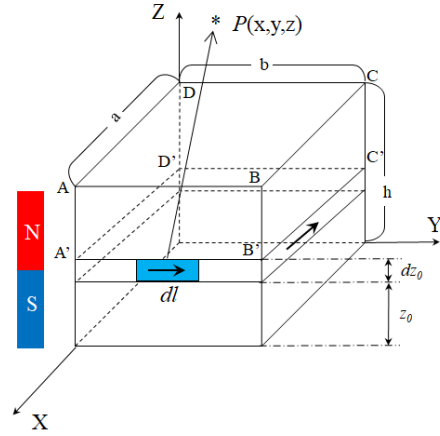


Fig. 4. Vertically magnetized magnet

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times r}{r^2} \quad (2)$$

Eq. (2)에서 μ_0 는 공기의 투자율을 나타내며, r 은 전류의 단위벡터, I 는 코일 sheet 에 흐르는 전류, dl 은 코일 sheet내 미소변위를 나타낸다. 전체 ABCD 사각형에 대해 적분하게 되면 P점의 자속을 구할 수 있게 된다. Eq. (3)~(5)는 x, y, z방향에 대한 자속밀도를 나타낸다. 또한 Eqs. (6)과 (7)은 Eqs. (3)~(5) 내의 symbol을 나타낸다[10]. Eq. (3)~(7) 를 통해 임의의 P점에 대한 자속을 구할 수 있다.

$$B_x = \int_0^h dB_x = -\frac{\mu_0 J}{8\pi} [G(a-x, y, z) + G(a-x, b-y, z) - G(x, y, z) - G(x, b-y, z)] \Big|_0^h \quad (3)$$

$$B_y = \int_0^h dB_y = -\frac{\mu_0 J}{8\pi} [G(b-y, x, z) + G(b-y, a-x, z) - G(x, y, z) - G(y, a-x, z)] \Big|_0^h \quad (4)$$

$$B_z = \int_0^h dB_z = -\frac{\mu_0 J}{8\pi} [H(y, a-x, z) + H(b-y, a-x, z) + H(x, b-y, z) + H(a-x, b-y, z) + H(b-y, x, z) + H(y, x, z) + H(a-x, y, z) + H(x, y, z)] \Big|_0^h \quad (5)$$

$$G(g_1, g_2, g_3) = \ln \frac{\sqrt{g_1^2 + g_2^2 + (g_3 - z_0)^2} - g_2}{\sqrt{g_1^2 + g_2^2 + (g_3 - z_0)^2} + g_2} \quad (6)$$

$$H(h_1 + h_2 + h_3) = \begin{cases} \arctan \left[\frac{h_1}{h_2} \frac{h_3 - z_0}{\sqrt{h_1^2 + h_2^2 + (h_3 - z_0)^2}} \right], & \text{if } y \neq 0 \\ 0, & \text{if } y = 0 \end{cases} \quad (7)$$

높은 동적 힘을 얻기 위해서는 제한된 자석 크기 내에서 자속을 최대화하는 것이 중요하다. 제안한 HLAMB는 자속을 강화하기 위해 Halbach 자석 배열과 Back steel yoke가 설치되었다. Back steel yoke의 효과를 설명하기 위해 Image method가 사용된다[11]. Image method는 자속소스가 철 요크와 같이 투과성이 높은 재료 근처에 배치 될 때 자속 필드를 계산하기 위한 방법이다. 이 방법에서 백 요크는 같은 크기의 자석으로 대체된다. Fig. 5는 수직 자화 자석 블록에 적용된 Image method의 개략도를 보여준다.

자기장에서 영구 자석에 가해지는 힘과 모멘트는 각각 Eq. (8)과 (9)로 표현된다. Eq. (8)과 (9)의 Maxwell 응력 텐서는 Eq. (10)으로 표현된다[10].

$$F_s = \int \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} da \quad (8)$$

$$M_s = \int \mathbf{r} \times (\mathbf{T} \cdot \mathbf{n}) da \quad (9)$$

$$\mathbf{T} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B}\mathbf{B} - \frac{1}{2} B^2 \boldsymbol{\delta}) \quad (10)$$

$$= \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{1}{2} B^2 & B_x B_y & B_x B_z \\ B_x B_y & B_y^2 - \frac{1}{2} B^2 & B_y B_z \\ B_x B_z & B_y B_z & B_z^2 - \frac{1}{2} B^2 \end{bmatrix}$$

위 식을 통해 동적 힘과 모멘트는 Eq. (11), Eq. (12)와 같이 계산할 수 있다[8].

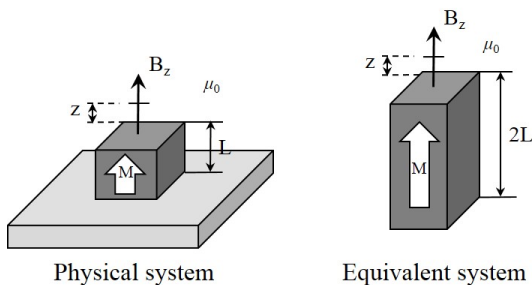


Fig. 5. Schematic of image method.

Table 1. Force verification of HLAMB

	Analytical modeling	FEM Simulation	Error (%)
Static force (N)	29.783	31.954	6.8
Dynamic force (N/A)	5.577	5.819	4.2

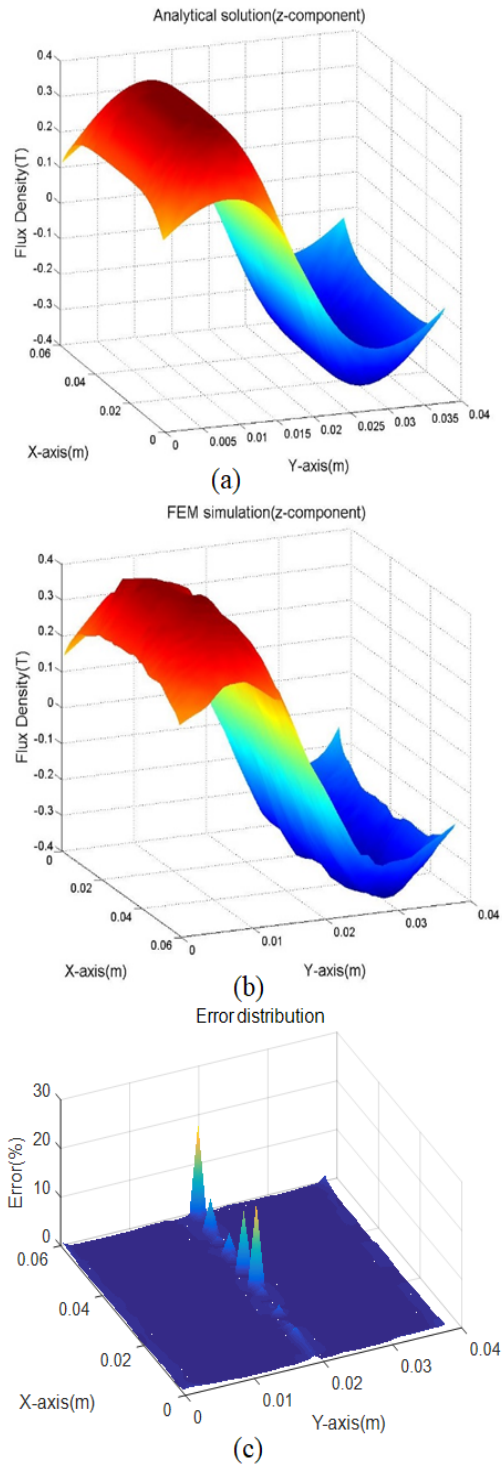


Fig. 6. Comparison of magnetic flux of the HLAMB (a) The analytical modeling (b) FEM simulation (c) Error distribution

$$F_L = - \iiint_V \mathbf{J} \times \mathbf{B}_M dv \quad (11)$$

$$= \iint_A \left(\frac{I}{A} \int_0^l d\mathbf{y} \times \mathbf{B}_M \right) dA$$

$$M_D = - \iiint_V (\mathbf{r} - \mathbf{p}) \times \mathbf{J} \times \mathbf{B}_M dv \quad (12)$$

$$= \iint_A \left(\frac{I}{A} \int_0^l (\mathbf{r} - \mathbf{p}) \times d\mathbf{y} \times \mathbf{B}_M \right) dA$$

수치적으로 계산된 HLAMB의 정적 힘과 동적 힘(로렌츠 힘)을 확인하기 위해 ANSYS MAXWELL을 사용해 3D FEM을 수행하였다. Fig. 6은 모델링을 통한 자속과 FEM 시뮬레이션을 통한 자속을 비교한 그래프이다. Fig. 6(a)는 모델링을 통한 자속을 구한 그래프이며, Fig. 6(b)는 FEM 시뮬레이션을 통한 자속 그래프이다. Fig. 6(c)는 모델링과 시뮬레이션의 각 포인트간 자속 값을 비교하여 오차의 값을 확인한 그래프이다. 두 자속을 비교해 본 결과 자석 중앙부분의 오차가 높게 나타나지만 자석 중앙부분은 실제 코일이 작용하지 않는 부분으로 로렌츠 힘 모델링에 영향을 미치지 않는다. 따라서 중앙부분을 제외한 오차를 계산한 결과 0.51% 오차 값을 확인할 수 있었다. 따라서 이론적 모델링이 정확하게 세위짐을 확인할 수 있었다.

그리고 동적 힘과 정적 힘도 검증을 수행하였다. Table 1은 HLAMB의 동적 힘과 정적 힘의 검증을 보여 주고 있다. Table 1에 제시된 바와 같이, 이론적 모델링으로 인한 동적 힘은 7% 차이 내에서 FEM 시뮬레이션과 거의 일치한다. 따라서 모델링이 10% 이내의 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인하였고 수학적 모델링을 사용하여 최적 설계를 수행하였다.

4. 최적설계

설계 고려 사항을 충족하고 성능을 최적화하기 위해 최적화를 수행했다. 설계 파라미터와 시스템 성능 간의 관계는 매우 복잡하기 때문에 최적화를 위해 SQP(Sequential Quadratic Programming)방법과 MATLAB 최적화 툴 박스가 사용되었다. Fig. 7은 제안한 HLAMB의 설계 파라미터를 보여준다. HLAMB 너비 (w_h), 자석 너비 (w), 자석 두께 (t), Halbach 자석 두께 (t_h), 코일 두께 (t_c), 코일 너비 (w_c) 및 코일 직경 (d)을 설계 파라미터로 설정하였다. 중앙 자석의 치수는 $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ 로 고정된 상태로 설계를 수행하였다.

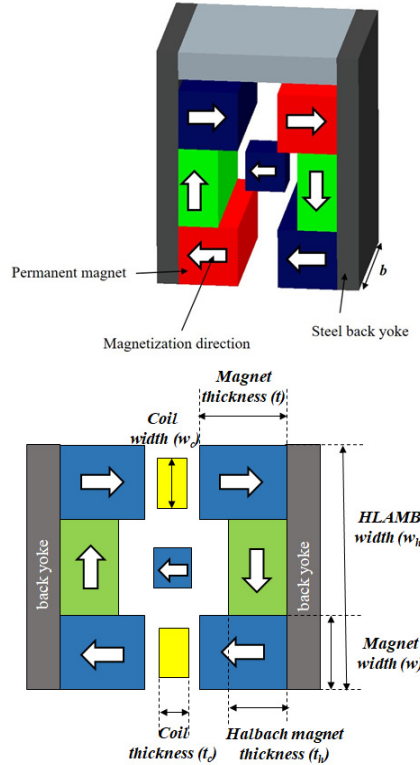


Fig. 7. Design variables of HLAMB.

고 대역폭의 자기부상 시스템을 구현하기 위해 HLAMB를 제안했기 때문에 가속도를 극대화 할 수 있도록 목적 함수를 설정했다. Eq. (13)은 최적화 목적 함수를 나타낸다. m 은 자기부상 시스템에서 부상시키는 이송자의 전체 질량을 나타내고 Force는 HLAMB의 동적 힘을 나타낸다.

$$\text{Minimize } f(w_h, t, w, t_h, w_c, t_c, d) = \left(\frac{m}{\text{Force}} \right)^2 \quad (13)$$

실제 시스템을 제작하는데 있어 여러 가지 구속조건이 있으며, Table 2는 본 시스템을 제작하는데 있어 6 가지 구속조건에 대해 설명하고 있다.

Table 2. Constraints

Constraints	
Geometrical constraint	Air gap : 1.5mm Size constraint
Maximum current	< 4 A
Maximum temperature	< 60 °C
Parasitic force	Fx, Fy < 0.5 N Mx < 0.05 Nm
Zero stiffness	Kz < 1 N/m
Gravity compensation	< 49 N

첫째, HLAMB 길이와 코일과 자석 간의 air gap 등 기하학적 구속 조건이다. 코일과 자석 배열 사이의 air gap을 1.5 mm 로 설정하여 1 mm 이송범위를 확보하고 자석과 코일의 누적 제조 공차를 고려하였다. 두 번째 구속조건은 전류 증폭기의 사양으로 인한 것으로 최대 전류조건을 4 A로 제한하였다. 세 번째 조건은 HLAMB의 열 조건으로 코일에 전류가 인가되면 코일 피복을 녹일 수 있는 열을 생성한다. 이러한 이유로 최대 허용 온도를 구속 조건으로 설정 하였다. 네 번째 구속조건은 parasitic 힘 이다. 큰 parasitic 힘은 시스템 대역폭에 악영향을 미치기 때문에 x 및 y 방향의 parasitic force는 0.5 N 보다 작아야 하고 x 방향의 parasitic 모멘트도 0.05 Nm 보다 낮아야 한다. 다섯 번째 구속조건은 강성이다. 무강성을 구현하기 위해 Z 방향 강성은 1 N/m 보다 작아야 한다. Z 방향 강성이 1 N/m 보다 작을 때 HLAMB의 고유 주파수가 0.1 Hz 로 나타난다. 여섯 번째 구속조건은 정적 힘 제약이다. 자기부상 이송체의 무게 196 N 을 고려하여 구속조건을 추가하였다.

Table 3은 최적의 결과와 최종 제작 수치를 보여준다. Table 3 위의 7 개 파라미터는 설계 파라미터이며, 코일 turn수, air gap, Halbach 자석 너비, 요크 두께 및 자석 길이는 종속 파라미터이다. 최종설계 결과가 목표한 최종 목표 및 구속조건을 만족하는지 검증하기 위하여 FEM 시뮬레이션을 통하여 정적 힘과 동적힘을 확인해보았다. Table 4는 최종 설계 결과의 이론적 모델링 결과와 FEM 시뮬레이션 결과 간의 생성 된 힘 비교를 보여준다. FEM 시뮬레이션을 통해 검증한 결과 최적화 프로세스가 적절했음을 확인할 수 있다.

Table 3. Optimization results and final design results

Parameter	Optimal value	Design value
HLAMB width (mm)	59.294	60
Magnet thickness (mm)	10.420	10
Magnet width (mm)	23.768	23.5
Halbach magnet thickness (mm)	5.912	6
Coil width (mm)	9.208	9
Coil thickness (mm)	13.509	13.5
Coil diameter (mm)	0.589	0.6
Coil turn (#)	326.362	308
Air gap	16.509	16.5
Halbach magnet width (mm)	11.758	13
Yoke thickness (mm)	5.210	5
Magnet length (mm)	60	60

Table 4. Comparison between optimization results and FEM simulation

	Analytical modeling	FEM Simulation	Error (%)
Static force (N)	42.349	45.063	6.02
Dynamic force (N/A)	19.831	19.543	1.47

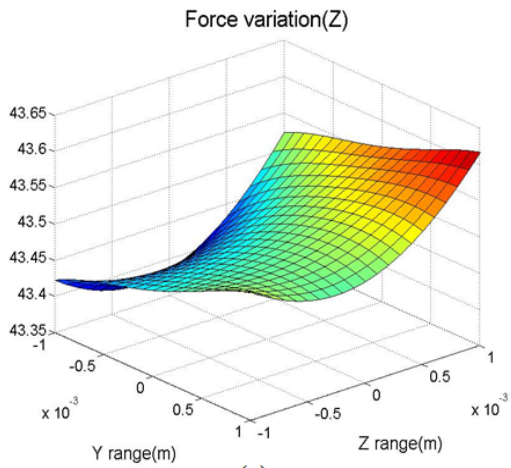
6 자유도 운동에 대한 적합성을 확인하기 위해 XZ 이송 범위 및 YZ 이송 범위에서 힘 분포를 확인하였다. Fig. 8은 XZ 이송 범위의 (a) z 방향, (b) y 방향 및 (c) θ_x 방향의 정적 힘 분포를 보여주고, Fig. 9는 YZ 이송 범위의 (a) z 방향, (b) y 방향 및 (c) θ_x 방향의 정적 힘 분포를 보여준다. Fig. 8과 9에서 확인할 수 있듯이 이송체가 움직임에 따라 최대 0.2 N의 Z방향 정적 힘 변화가 발생하며, 0.3 N의 y방향 parasitic 힘 변화가 발생한다. θ_x 방향으로는 0.1 Nm의 parasitic 모멘트 변화가 발생한다. 자기부상 시스템의 경우 in-plane 방향을 보이스코일 모터로 out-of-plane 방향을 능동자기 베어링으로 제어하게 되는데, 코일에서 발생하는 로렌츠 힘에 비해 parasitic 힘이 매우 작아 시스템의 제어성에 영향을 미치지 않는다. 따라서 제안한 HLAMB는 높은 동적 힘과 높은 제어 능력을 가질 것으로 예상된다.

5. 결론

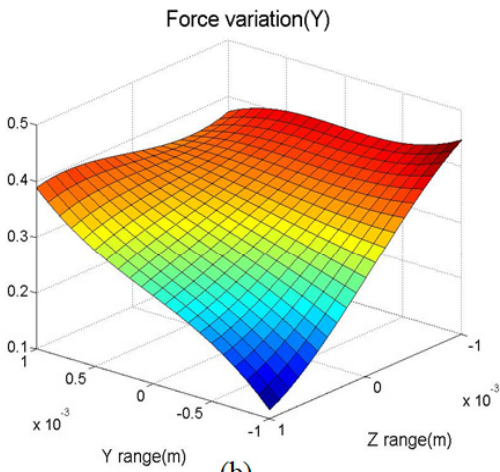
본 논문은 자기 부상 시스템을 위한 새로운 구조의 HLAMB를 제안하였다. 제안한 HLAMB는 단일 코일, 중앙 자석 및 Halbach 자석 배열로 구성되며, 시뮬레이션을 통해 수평으로 자화된 자석의 두께가 증가함에 따라 자속밀도가 강해지면서 동적 힘을 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 제안한 HLAMB의 성능을 최적화하기 위해 표면 전류 모델을 사용하여 자석 모델링을 수행하였으며, 모델링을 이용하여 최적화 설계를 수행하였다.

제안된 구조의 HLAMB는 최적설계를 통해 정적 힘 45.063 N, 동적 힘 상수 19.543 N/A의 성능을 획득하였으며, 기존에 개발된 HLAMB보다 정적 힘은 91 %, 동적 힘 상수는 169 % 증가되었다. 설계된 HLAMB의 이송범위에 따른 정적 힘 분석을 수행하였다.

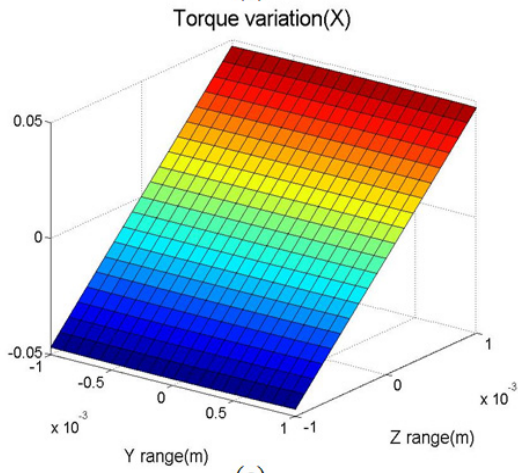
추후 최적설계 수치를 이용하여 HLAMB를 제작 후 성능평가를 수행할 예정이며, 자기부상 스테이지에 적용하여 기존보다 좋은 동적 성능을 확인할 예정이다.



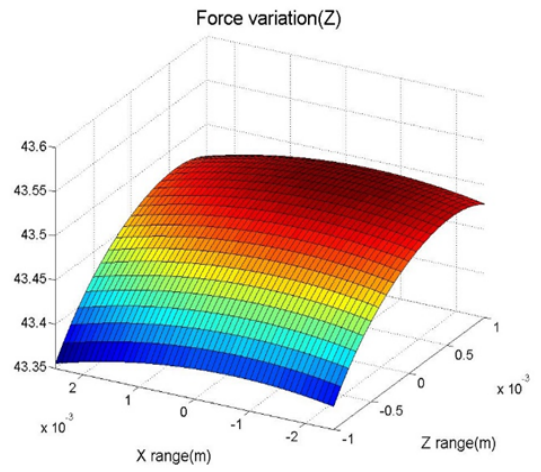
(a)



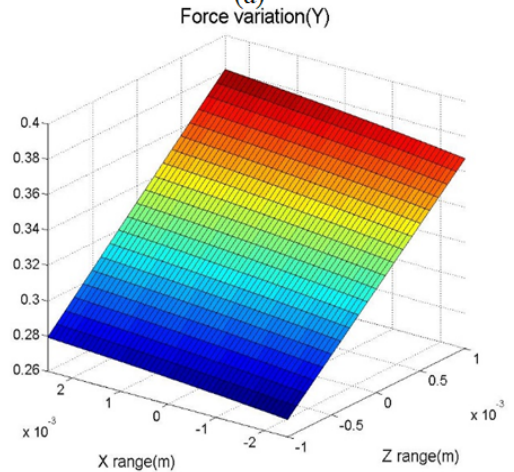
(b)



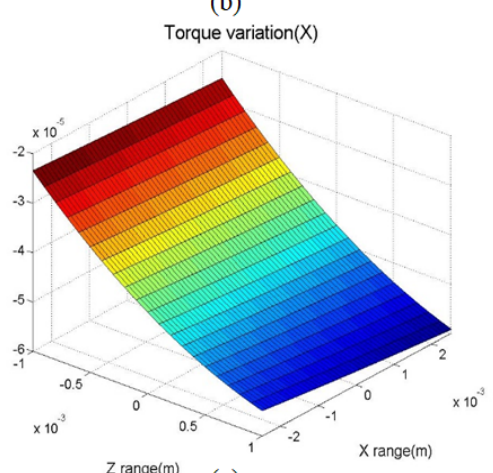
(c)



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Static force distribution of XZ working range of HLAMB (a) Z force (b) Y force (c) torque about x-axis

Fig. 9 Static force distribution of YZ working range of HLAMB (a) Z force (b) Y force (c) torque about x-axis

References

- [1] G. J. P. Nijse, *Linear Motion Systems. A Modular Approach for Improved Straightness Performance*, Ph.D dissertation TU Delft, Delft University of Technology, 2001, pp.59-211
- [2] K.-B. Choi, Y. G. Cho, T. Shinshi, and A. Shimokohbe, "Stabilization of one degree-of-freedom control type levitation table with permanent magnet repulsive forces," *Mechatronics*, Vol. 13, No 6, pp. 587-603, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0957-4158\(02\)00032-6](https://doi.org/10.1016/S0957-4158(02)00032-6)
- [3] W. Robertson, B. Cazzolato, and A. Zander, "A multipole array magnetic spring", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 41, No 10, pp. 3826-3828, 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2005.854981>
- [4] Samanta, Pranab, Phani Kumar, and N. C. Murmu. "Design and Analysis of an Electrodynamical Bearing with Magnets Arranged in Halbach Array." Proceedings of TRIBOINDIA-2018 An International Conference on Tribology. February, 2018.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3328433>
- [5] Wang, Nianxian, et al. "Research on analytical model and design formulas of permanent magnetic bearings based on Halbach array with arbitrary segmented magnetized angle." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 410, pp. 257-264, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.03.040>
- [6] S. Hol, E. Lomonova, and A. Vandenput, "Design of a magnetic gravity compensation system," *Precision engineering*, Vol. 30, pp. 265-273, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2005.09.005>
- [7] Y.-M. Choi, M. G. Lee, D.-G. Gweon, and J. Jeong, "A new magnetic bearing using Halbach magnet arrays for a magnetic levitation stage," *Review of scientific instruments*, Vol. 80, p. 045106, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3116482>
- [8] A. Molenaar, "A novel planar magnetic bearing and motor configuration applied in a positioning stage," Ph.D dissertation TU Delft, Delft University of Technology, 2000, pp.185-198.
- [9] D. C. Hanselman, Brushless permanent magnet motor design: The Writers' Collective, 2003, pp.1-191.
- [10] E. P. Furlani, Permanent magnet and electromechanical devices: materials, analysis, and applications: Academic press, 2001, pp.1-513.
- [11] F. Bancel, "Magnetic nodes," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 32, No. 17, pp. 2155, 1999.
DOI: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/32/17/304>
- [12] G. Akoun, and J.-P. Yonnet, "3D analytical calculation of the forces exerted between two cuboidal magnets," *IEEE Transactions on magnetics*, Vol. 20, No. 5, pp. 1962-1964, 1984.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063554>

이 학 준(Hakjun Lee)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 2017년 3월 ~ 2019년 7월: 삼성 전자 생산기술연구소 책임연구원
- 2019년 8월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 지능형생산시스템연구부 문 선임연구원

<관심분야>

정밀시스템 설계, 제어, 반도체 본딩 장비

안 다 훈(Dahoon Ahn)

[정회원]



- 2013년 8월 : 한국과학기술원 기계항공시스템학부 (공학박사)
- 2014년 4월 ~ 2019년 2월: 한국 철도기술연구원 선임연구원
- 2019년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차공학부 조교수

<관심분야>

초정밀시스템 설계, 에너지 하베스팅, 철도차량 부품