

초정밀 자기부상 스테이지의 위치제어를 위한 영구자석형 선형 자기베어링의 개발

이상호* · 장지욱* · 김의석** · 한동철***

Permanent Magnet Biased Linear Magnetic Bearing for High-Precision Maglev Stage

Sang-Ho Lee, Jee-Uk Chang, Oui-Serg Kim and Dong-Chul Han

Key Words : Active magnetic bearing (자기베어링), Permanent magnet (영구자석), Magnetic levitation(자기부상), Linear positioning stage (위치결정 스테이지)

Abstract

The active magnetic bearing has many advantages – an active positioning, no contact and lubrication free motion – and is widely used in high precision motion stages. But, the conventional magnetic bearings composed of electromagnets only are power consuming due to their bias current and have the excessive heat generation, which can make the repeatability of the positioning system worse. To overcome this drawback, we developed a novel permanent magnet (PM) biased linear magnetic bearing for a high precision magnetically levitated stage. The permanent magnets provide a bias flux and generate a bias force, and the electromagnet increases or reduces a flux of the permanent magnets and gives a levitation force. This paper presents a theoretical magnetic circuit analysis, FEM analysis and experimental data from the 1-DOF tests, and compares the theoretical power consumption of the electromagnetic bearings and the PM biased linear magnetic bearings. The PM biased linear magnetic bearing presented in this paper gives better load capacity but lower power consumption than a conventional electromagnetic bearing and will be adopted in our 6-DOF high precision linear positioning maglev stage.

기호설명

N : coil turns
 I : current
 B_r : remnant magnetic flux density of PM
 μ_m : relative permeability of PM
 μ_0 : permeability of air
 l_m : thickness of PM
 g_0 : nominal gap size between core and guide
 x : displacement of magnetic bearing
 ϕ_1, ϕ_2 : magnetic flux
 A_g : area of pole

A_m : area of permanent magnet
 B_1, B_2 : magnetic flux density in upper and lower gap
 F : force of magnetic bearing
 K_x : displacement stiffness
 K_I : current stiffness
 m : magnetic bearing unit mass
 Δm : additional mass to magnetic bearing unit
 B_{nom} : nominal magnetic flux density in $x=0, I=0$

1. 서론

반도체 및 초정밀 산업의 발달에 따라 고정도, 고품질의 제품에 대한 수요가 증가하여 초정밀 이송 스테이지의 필요성이 증대되고 있다. 이에 따라, 공작기계 및 각종 측정장비의 이송 스테이지

* 서울대학교 대학원 기계항공공학부
 ** 서울대학교 정밀기계설계공동연구소
 *** 서울대학교 기계항공공학부

가 능동화 되는 추세이며 압전 소자, 보이스 코일 모터 등 여러 가지의 작동기를 이용하여 스테이지의 자세를 능동적으로 보정함으로써 고정밀도의 이송 정밀도 및 반복 정밀도를 얻고자 하는 노력이 계속되어 왔다.

자기베어링 시스템은 물리적인 접촉 없이 전자기력으로 대상체를 지지하므로 윤활 시스템이 필요하지 않고 고속 운전이 가능한 동시에 스틱-슬립 현상이 없어 고정밀의 위치 제어가 가능하며 진공에서도 사용이 가능한 등의 다양한 장점을 가지고 있다. 또한 위치를 보정할 수 있는 능동형 작동기로 사용하면 부가적인 위치 결정 스테이지가 필요하지 않게 되어 위치 결정 스테이지 시스템 전체의 구성이 간단하게 이루어 질 수 있다. 이러한 장점에 따라 정⁽¹⁾⁽²⁾은 자기베어링을 이용하여 6 자유도 스테이지의 제어에 성공한 바 있으며, Popp⁽⁴⁾등은 고정밀 공작기계용 이송 스테이지에 자기베어링을 응용하고 있다.

그러나, 자기베어링은 전자기력을 이용하여 시스템을 지지하는 요소로서 자체의 강성이 여타의 스테이지에 비하여 작으며⁽¹⁾⁽³⁾, 변위에 대한 비선형적 특성에 기인하여 다양한 보정 및 제어 방법이 필요하며⁽⁴⁾, 동적 강성을 증가시키기 위해서 필요한 편향 전류(bias current)에 의하여 발생하는 저항열에 의한 시스템의 변형 등이 정밀도를 저하시키게 된다. 회전축 시스템에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 영구자석을 적용하여 에너지 소모량 및 비선형 특성을 줄인 영구자석형 자기베어링에 관한 연구가 진행되고 있다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 고정밀 6 자유도 위치 결정 스테이지에 적용할 수 있는 영구자석형 선형 자기베어링을 제안하였으며, 자기저항 해석 및 유한요소해석을 통하여 해석하였다. 또한, 1 자유도 실험을 통하여 주요 인자인 전류강성과 변위강성을 실험적으로 구하였으며, 미소 스텝 응답을 통하여 고정밀 위치 제어 특성을 관찰하고, 기존의 전자석형 자기베어링과 상사하였을 때의 전력 소모량에 대하여 비교하였다.

2. 영구자석형 선형 자기베어링

2.1 작동 원리

Fig.1 에 본 논문에서 제안된 영구자석형 선형 자기베어링의 구조를 나타내었다. 두 개의 고정된 가이드 사이에 가이드에 설치된 코어와 수직방향으로 3 개의 코어가 배치되고 각 코어 사이에는 영구자석을 서로 같은 극이 마주보도록 설치하며,

코일은 영구자석의 위 아래에 동일한 방향으로 권선한다. 수직방향의 3 개의 코어와 영구자석, 코일은 한 몸체로 영구자석형 베어링의 부상체가 된다.

Fig.1 에 있는 검은색의 화살표는 영구자석의 자속의 방향으로서 상하부에 대하여 대칭으로 형성되며, 코일에 전류를 인가하여 생성되는 전자석에 의한 자속인 회색의 화살표는 상부에서는 영구자석의 자속과 동일한 방향으로 하부에서는 반대의 방향으로 생성된다. 따라서, 식(1)에서 보는 바와 같이 상부에서는 영구자석의 자속밀도 $B_{u,pm}$ 과 전자석의 자속밀도 B_{em} 이 합산되며, 하부에서는 영구자석의 자속밀도 $B_{l,pm}$ 과 전자석의 자속밀도가 서로 반대방향으로 작용하여 감산됨으로써 식(2)와 같이 수직방향의 부상력을 생성하게 된다. Fig.2 에 유한요소해석을 통한 자속선도를 나타내었다. 왼쪽부터 각각 영구자석의 자속선도, 전자석의 자속선도, 영구자석의 자속과 전자석의 자속이 중첩되었을 때의 자속선도를 나타내며, 상부의 자속이 상호 중첩되어 상부 방향의 부상력을 작용할 때의 자속선도를 나타내고 있다. 영구자석의 두께가 공극에 비하여 크므로 전자석의 자속은 영구자석 방향으로의 흐름이 거의 없으며(1~3%) 영구자석의 감자(demagnetization)에 의한 성능 저하는 무시할 수 있다.

$$B_u = B_{u,pm} + B_{em} \quad (1)$$

$$B_l = B_{l,pm} - B_{em}$$

$$F = \frac{1}{2\mu_0} (B_u^2 - B_l^2) (4A_g) \quad (2)$$

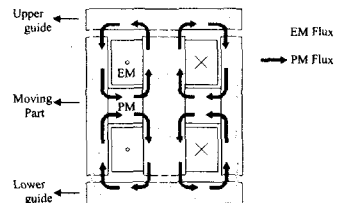


Fig. 1 Permanent magnet biased linear magnetic bearing

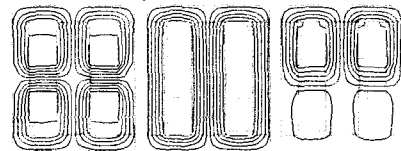


Fig. 2 Flux lines of permanent magnet biased linear magnetic bearing

Left: PM, Middle: EM, Right: superposed

2.2 자기회로식의 해석

Fig.1 에 제시된 영구자석형 선형 자기베어링은 좌우 대칭인 형상이므로 Fig.3 에 나타난 반쪽의 자

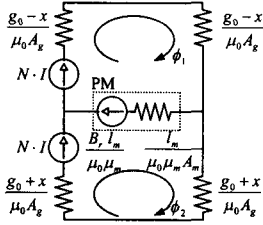


Fig. 3 Equivalent magnetic circuit

기저항 모델에 대한 자기회로 해석을 수행한다. 코어의 상대 투자율이 공극에 비하여 크므로 코어에 의한 자기저항의 항은 무시하며, 누설 및 비선형 특성은 무시한다. Fig.3 에 도시된 자기회로의 자기장 루프에 대하여 Maxwell 방정식을 적용하여 식(3)의 루프 자속에 관한 행렬 방정식을 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \mu_0 NI + \frac{B_r \cdot l_m}{\mu_m} \\ \mu_0 NI - \frac{B_r \cdot l_m}{\mu_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \frac{g_0 - x}{\mu_m A_m} + \frac{l_m}{\mu_m A_m} & -\frac{l_m}{\mu_m A_m} \\ -\frac{l_m}{\mu_m A_m} & 2 \frac{g_0 + x}{\mu_m A_m} + \frac{l_m}{\mu_m A_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 2(g_0 - x) + \frac{l_m}{\mu_m} \frac{A_g}{A_m} & -\frac{l_m}{\mu_m} \frac{A_g}{A_m} \\ -\frac{l_m}{\mu_m} \frac{A_g}{A_m} & 2(g_0 + x) + \frac{l_m}{\mu_m} \frac{A_g}{A_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

식(3)으로부터 루프 자속밀도 B_1, B_2 를 식(4)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2 \left(g_0^2 - x^2 + \frac{l_m}{\mu_m} \frac{A_g}{A_m} g_0 \right)} \begin{bmatrix} \left(g_0 + x + \frac{l_m}{\mu_m} \frac{A_g}{A_m} \right) \mu_0 NI + (g_0 + x) \frac{B_r \cdot l_m}{\mu_m} \\ \left(g_0 - x + \frac{l_m}{\mu_m} \frac{A_g}{A_m} \right) \mu_0 NI - (g_0 - x) \frac{B_r \cdot l_m}{\mu_m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

자기베어링에 의하여 작용하는 부상력인 자기력은 식(4)를 식(5)에 대입함으로써 구할 수 있다.

$$F = \frac{1}{2\mu_0} (B_1^2 \cdot (4A_g) - B_2^2 \cdot (4A_g)) = \frac{2}{\mu_0} (B_1^2 - B_2^2) \cdot A_g \quad (5)$$

$$= \frac{2}{\mu_0} [B_1 \ B_2] \cdot \begin{bmatrix} A_g & 0 \\ 0 & -A_g \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

자기력은 Fig.4 와 Fig.5 에서 보는 바와 같이 전류와 부상체의 변위에 대하여 선형적인 특성을 가지며, $\pm 2A, \pm 100\mu m$ 의 작동영역에 대하여 1% 이내의 비선형 특성을 가지므로, 기존의 전자석형 자기베어링의 비선형적 특성⁽¹⁾⁽⁴⁾에 비하여 제어 및 보정이 용이하다⁽⁵⁾. 해석 및 3 장의 실험장치 구성에 사용한 제원은 Table1 에 제시하였다.

Table1 Specification of the PM biased linear magnetic bearing

Magnet dimension	NdFeB	
remnant flux density	20×10×10	(mm ³)
	1.05	(T)
Core dimension	41×6×0.35	(mm ³)
Total pole area	480	(mm ²)
Coil turns	105×2	
Nominal gap	0.325	(mm)

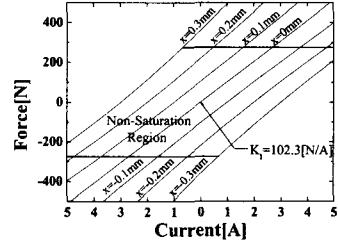


Fig. 4 Calculated magnetic force vs. current

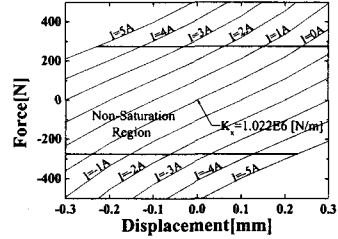


Fig. 5 Calculated magnetic force vs. displacement

본 논문에서 제안한 영구자석형 선형 자기베어링은 기존의 전자석형 자기베어링에 비하여 선형성이 우수하므로 넓은 작동영역을 가지며, 식(6)으로부터 작동영역 내의 전류강성과 변위 강성을 구할 수 있다.

$$F = K_x \cdot x + K_i \cdot I$$

$$K_x = \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=0, I=0} = \frac{2A_g B_r^2}{\mu_0 g_0 \left(\mu_m \cdot \frac{g_0}{l_m} + \frac{A_g}{A_m} \right)^2}$$

$$K_i = \frac{\partial F}{\partial I} \Big|_{x=0, I=0} = \frac{2NA_g B_r}{g_0 \left(\mu_m \cdot \frac{g_0}{l_m} + \frac{A_g}{A_m} \right)} \quad (6)$$

2.3 ANSYS를 이용한 FEM 해석

2.2 절의 자기회로 식은 자속의 누설, 영구자석의 이력 곡선, 코어 재질의 포화 자속 밀도 등의 비선형 효과를 고려하지 않은 해석 방법이다. 비선형 효과와 자속의 누설 효과를 고려한 자기장 자기력의 해석을 위하여 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 영구자석형 선형 자기베어링의 변위와 전류의 변화에 따른 자기력의 변화를 계산하였다.

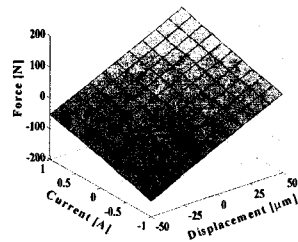


Fig. 6 Calculated force by Finite Element Method

영구자석형 자기베어링은 2 차원 형상을 기본으로 만들어졌으므로 해석의 편의를 위해 2 차원으로 가정하여 해석하였으며, Fig.6 에 일반적인 작동 영역인 $\pm 50\mu\text{m}$ 의 변위와 $\pm 1\text{A}$ 의 전류량에서 구한 자기력의 결과를 3 차원으로 도시하였다.

3. 자기베어링의 실험

3.1 실험 장치의 구성

자기회로 해석과 유한요소 해석을 통하여 해석된 결과를 기초로 하여 Fig.7 에 있는 1 자유도 테스트 실험장치를 구성하였다. Fig.8 에 개략도를 도시하였으며, 1 자유도 실험을 통해 영구자석형 자기베어링의 특성을 분석하기 위하여 수직방향으로의 직선운동만이 가능하도록 직선운동 가이드를 사용하였고, 두 개의 와전류형 변위 센서를 사용하여 평균값을 변위 신호로 사용하였으며 부상체에는 부가 질량을 추가하게 하였다. TMS320C40 의 DSP 와 8 채널, 16bit 의 AD/DA 보드를 사용하여 10kHz 로 측정 및 제어하였으며, Fig.9 에 실험장치의 전체 구성도를 나타내었다.

3.2 전류강성과 변위강성의 측정 실험

견인식의 자기베어링은 불안정한 시스템이므로 변위 측정을 통한 되먹임 제어가 필수적이다. 제어를 위해 시스템의 특성을 나타내는 주요한 인자를 정확히 모델링 해야 하며, 영구자석형 자기베어링의 경우 센서와 전류 증폭기의 대역폭이 충분히 넓다고 하면 식(7)의 시스템 개루프 전달함수에서 볼 수 있듯이 전류 강성 K_I , 변위 강성 K_x 이 가장 중요한 인자가 된다.

$$G(s) = \frac{K_I}{ms^2 - K_x} \quad (7)$$

3.2.1 정하중 실험

부상체의 하중은 자기베어링에서 작용하는 전자기력에 의해 지지되고 자기력은 전류와 변위에 대한 함수이므로 식(8)과 같은 일반적인 관계식이 존재한다. 따라서 되먹임 제어를 통한 서보 제어를 수행할 때 정상상태에서의 하중과 변위, 전류를 측정하여 자기력의 변위와 전류에 대한 관계식을 유도해낼 수 있다.

$$F = mg = F(x, I) \quad (8)$$

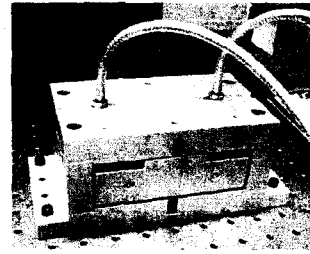


Fig. 7 1DOF test rig

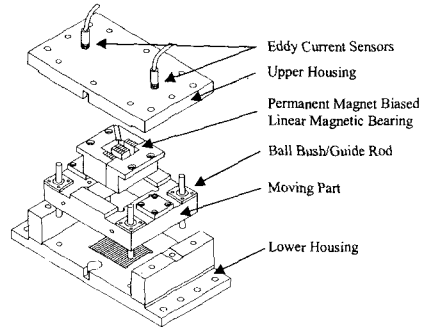


Fig. 8 Schematics of the 1 DOF test rig

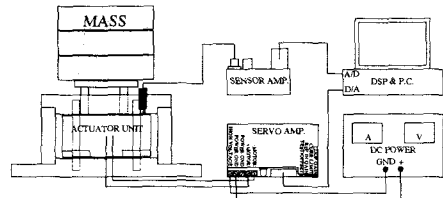


Fig. 9 System configuration of the 1 DOF test rig

디지털 비례미분적분 제어기를 사용하여 서보 제어를 수행하는 상태에서 $-50\mu\text{m}$ 에서 $50\mu\text{m}$ 까지 $5\mu\text{m}$ 씩 변위를 변화시키면서 총 41 개의 하중 조건에서 전류를 측정하였다. 신뢰도를 높이기 위해서 각 실험은 10 번씩 반복하여 실험하였다. 정하중 실험을 통해서 얻어진 하중변화에 따른 전류량의 변화 그래프가 Fig.10 에, 변위 변화에 따른 전류 변화의 그래프가 Fig.11 에 도시되어 있으며 측정 영역 내에서 선형 관계임을 확인할 수 있다.

Fig.12 는 정하중 실험 결과를 하중과 변위에 대한 전류의 3 차원 그래프로 나타낸 것이다. 이론 해석식과 같이 작동영역 내에서는 (9)와 같이 선형적인 관계식을 가진다고 가정할 수 있으므로 실험 데이터로부터 최소사승법(Least Square Method) 과 최소영역법(Minimum Zone Method)을 사용하여 변위 강성과 전류 강성을 구할 수 있고 이때의 선형화 오차는 Fig.12 에 함께 도시되어 있다.

$$F(x, I) = K_x x + K_I I + \Delta F \quad (9)$$

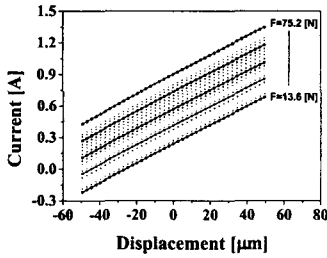


Fig. 10 Experimental result for static load test - current vs. force

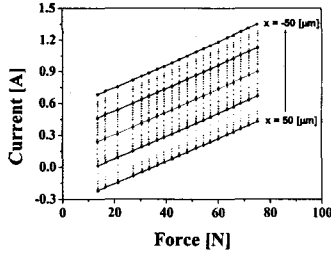


Fig. 11 Experimental results for static load test - displacement vs. force

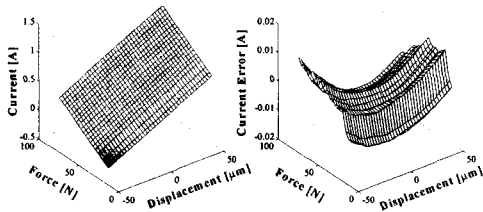


Fig. 12 Experimental result of static load test - force vs. displacement vs. current and linearity error

3.2.2 주파수 응답함수를 이용한 인자 추정

본 절에서는 자기베어링의 주요한 인자인 전류 강성과 변위강성을 주파수 영역에서의 데이터 보간에 의한 방법으로 추정하였다.

식(7)에 있는 자기베어링 시스템의 전류입력 부분에 정현파 가진을 가한 후, 자기베어링의 입력 전류 I 와 변위 x 의 데이터를 FFT 처리하여 가진 주파수 ω (1~500Hz)에서의 시스템 주파수응답 함수(FRF) $G_{exp}(j\omega)$ 를 얻는 방식으로 실험을 수행하였으며, 보다 정확한 인자 추정을 위하여 5가지의 질량에 대해 각각 5 번씩 반복 실험하였다. 전류 강성과 변위 강성은 주파수에 대하여 상수로 가정하였으며 이에 따라 (10)에 있는 바와 같이 질량변화에 따른 FRF 실험결과와 자기베어링의 이론적 모델의 주파수응답함수를 비교하여 주파수 영역에서의 오차의 2-놈(norm)을 최소화하는 변위 강성과 전류 강성을 추정하였다.

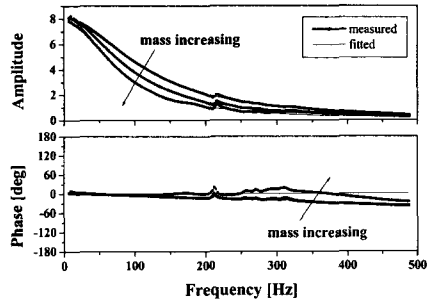


Fig. 13 Frequency response function by mass variation

$$G_i(j\omega) = -\frac{K_f}{(m + \Delta m_i)\omega^2 + K_x} \quad (i = 0 \sim N) \quad (10)$$

$$\arg \min_{K_x, K_f} \sum_{i=0}^N \sum_{\omega} \|G_i(j\omega) - G_{i,exp}(j\omega)\|_2^2$$

3.3 이론값과 실험 결과의 비교

앞절에서 수행한 이론적 해석 및 정하중 실험 및 주파수 응답함수를 통한 인자 추정을 통하여 구해진 전류 강성과 변위 강성의 값을 Table 2에 나타내었으며, 자기저항 해석의 결과를 100%로 할 때의 상대적인 값을 함께 나타내었다.

Table 2 Displacement stiffness and current stiffness

	Displacement Stiffness [N/μm]	Current Stiffness [N/A]
Magnetic Circuit Analysis	-1.022 (100%)	102.3 (100%)
Finite Element Method	-0.9818 (96.8%)	101.6 (98.8%)
Static Load Test	-0.8503 (83.3%)	92.7 (90.8%)
Parameter Estimation (FRF)	-0.7681 (75.2%)	88.0 (86.2%)

3.4 시간역에서의 응답실험

영구자석형 자기베어링은 고정밀 자세제어를 위한 작동기이므로 미소 이송이 가능하여야 한다. 본 논문에서는 미소 스텝 지령을 일반적인 디지털 비례미분적분 제어기에 부과하여 시스템의 응답을 보았다. Fig.14에 50nm의 스텝응답 결과를 도시하였으며, 300Hz의 저역통과 디지털 필터를 사용하여 필터링한 결과를 함께 도시하였다. 정착시간은 30ms 이며 오버슈트는 30%로 측정되었다.

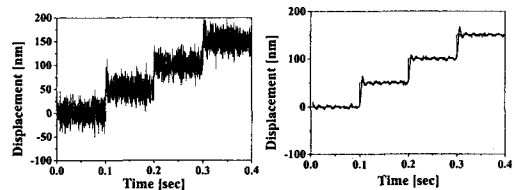


Fig. 14 50nm Step response (Raw data and 300Hz filtered data)

4. 전력소모량 비교

4.1 동일한 성능을 가지는 전자석형 자기베어링
영구자석형 자기베어링과 전자석형 자기베어링
의 전력 소모량을 비교하기 위하여 같은 수의 코
일 턴수, 극 면적, 공극을 가지는 일반적인 E 자
형태의 전자석형 자기베어링을 가정한다. 전자석
형 자기베어링의 자기장과 선형화 된 자기력은 식
(11)과 같다.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \frac{\mu_0 N}{2} \begin{bmatrix} I_b + I_c \\ g_0 - x \\ I_b - I_c \\ g_0 + x \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F = K_i \cdot I_c + K_x \cdot x$$

$$K_x = \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{2\mu_0 N^2 I_b^2 A_g}{g_0^3}, \quad K_i = \frac{\partial f}{\partial I_c} = \frac{2\mu_0 N^2 I_b A_g}{g_0^2}$$

전자석형 자기베어링은 영구자석 대신 바이어
스 전류를 이용하여 기준 자속밀도(nominal flux
density)를 형성하므로, 상사하여 비교하기 위해
는 식(12)와 같이 동일한 기준 자속밀도를 형성하
는 편향전류 I_b 를 구할 수 있다.

$$(B_{nom})_{PM} = \frac{I_m B_r}{2 \left(g_0 + \frac{l_m A_m}{\mu_m} \right)} = \frac{\mu_0 N I_b}{2 g_0} = (B_{nom})_{EM} \quad (12)$$

식(12)에서 구해진 편향전류를 이용하여 전자석
형 자기베어링의 전류 강성, 변위 강성을 구하면
식(13)과 같으며, 이는 영구자석형 자기베어링의
강성값과 동일하므로 완전히 동일한 성능을 갖는
베어링으로 상사할 수 있다.

$$(K_i)_{EM} = \frac{2\mu_0 N^2 I_b^2 A_g}{g_0^3} = \frac{2A_g B_r^2}{\mu_0 g_0 \left(\mu_m \frac{g_0}{l_m} + \frac{A_m}{A_g} \right)^2} = (K_i)_{PM} \quad (13)$$

$$(K_x)_{EM} = \frac{2\mu_0 N^2 I_b A_g}{g_0^2} = \frac{2N A_g B_r}{g_0 \left(\mu_m \frac{g_0}{l_m} + \frac{A_m}{A_g} \right)} = (K_x)_{PM}$$

4.2 전력소모량의 비교

자기베어링에서의 에너지 손실은 코일의 저항
열에 의한 동손과 자기장 이력 곡선 및 와전류로
인한 철손으로 나눌 수 있다. 선형 자기베어링의
경우 정상 상태에서의 움직임이 없고 자속 경로가
겹판으로 이루어지면, 철손은 동손에 비해 무시할
수 있으므로 동손에 의한 손실이 주요한 손실 요
인이며, 두 자기베어링에서 발생하는 동손은 제어
전류 I_c 를 고려할 때, 식(14)와 같다.

$$(E)_{PM} = R \cdot I_c^2 + R \cdot I_c^2 = 2R I_c^2 \quad (14)$$

$$(E)_{EM} = R \cdot (I_b + I_c)^2 + R \cdot (I_b - I_c)^2 = 2R(I_b^2 + I_c^2)$$

자중 혹은 외란에 의해 작용하는 자기력에 따

른 동손과 손실비를 Fig.15 에 도시하였다. 일반적
인 동작 영역에서 영구자석형 자기베어링은 전자
석형 자기베어링에 비하여 동손이 10%이하로서
전력소모가 적어 코일의 발열 문제와 효율에서 월
등히 우수하므로 초정밀 구동기로서 적합하다.

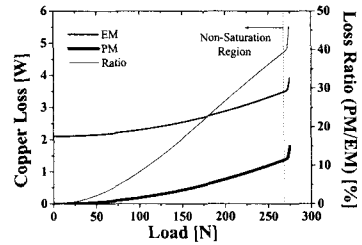


Fig. 15 Comparison of copper loss

5. 결론

본 논문에서는 고정밀 능동형 자기부상 스테이
지에 적용할 수 있는 영구자석형 선형 자기베어링
을 설계 및 해석하였으며, 이의 성능을 실험을 통
해 검증하였다. 영구자석형 선형 자기베어링은 기
존의 전자석 자기베어링에 비하여 선형적인 특성
이 우수하고 전력소모량 및 발열량에 있어서도 유
리하여 초정밀 스테이지에의 적용에 적합하다.

후 기

본 연구는 삼성전자 생산기술센터와 서울대학
교 정밀기계설계 공동연구소의 지원으로 수행되었
다.

참고문헌

- (1) 정운, 1997, "자기베어링으로 지지되는 초정밀 직선운동 테이블에 관한 연구", 서울대학교 박사학위 논문
- (2) S.C.Joung, Y.Joung, I.B.Chang, D.C.Han, 1995, "An experimental study on the high precision linear motion table with magnetic bearing suspension", ASPE, USA, pp328-331
- (3) F.Auer, H.F. van Beek, 1994, "Practical Application of a magnetic bearing and linear propulsion unit for six degrees of freedom positioning", 4th Int. Symposium on Magnetic Bearings, August, ETH Zurich, pp183-188
- (4) M.Ruskowski, K.Popp, 2000, "Nonlinear modeling of a magnetically guided machine tool axis", 7th Int. Symposium on Magnetic Bearings, August 23-25, ETH Zurich, pp413-418
- (5) A.C.Lee, F.Z.Hsiao, D.Ko, 1994, "Analysis and testing of magnetic bearing with permanent magnets for bias", JSME Int. Journal, Vol.37, No.4