

초정밀 직선 이송계용 능동 자기예압 공기베어링에 관한 연구

노승국[#], 김수현^{*}, 곽윤근^{*}, 박천홍^{**}

Study on the Air Bearings with Actively Controllable Magnetic Preloads for an Ultra-precision Linear Stage

Seung-Kook Ro[#], Soohyun Kim^{*}, Yoonkeun Kwak^{*} and Chun Hong Park^{**}

ABSTRACT

In this paper, we propose a precise linear motion stage supported by magnetically preloaded air bearings. The eight aerostatic bearings with rectangular carbon porous pads were located only one side of vertical direction under the platen where four bearings are in both sides of horizontal direction as wrap-around-design, and this gives simpler configuration than which constrained by air bearings for all direction. Each of the magnetic actuators has a permanent magnet generating static magnetic flux for required preload and a coil to perturb the magnetic force resulting adjustment of air-bearing clearance. The characteristics of porous aerostatic bearing are analyzed by numerical analysis, and analytic magnetic circuit model is driven for magnetic actuator to calculate preload and variation of force due to current. A 1-axis linear stage motorized with a coreless linear motor and a linear encoder was designed and built to verify this design concept. The load capacity, stiffness and preload force were examined and compared with analysis. With the active magnetic preloading actuators controlled with DSP board and PWM power amplifiers, the active on-line adjusting tests about the vertical, pitching and rolling motion were performed. It was shown that motion control for three DOF motions were linear and independent after calibration of the control gains.

Key Words : Porous Air Bearing (다공질 공기베어링), Magnetic Preload (자기예압), Active Air Bearing (능동 공기 베어링), Magnetic Force (자기력), Ultra-precision Stage (초정밀 스테이지), Linearization Calibration (선형화 보정)

1. 서론

최근의 반도체와 LCD, PDP 등 평판디스플레이 (Flat Panel Display, FPD) 산업과 마이크로 부품 산업

등의 발달로 관련 제품의 초정밀 가공 및 검사 등 생산장비의 가공면적은 대형화되고 있으며, 반대로 프로세스 패턴의 미세화되고 있다. 따라서 이러한 장비들의 핵심 요소인 초정밀 직선 이송계

☞ 접수일: 2008년 2월 19일; 게재승인일: 2008년 3월 18일

교신저자: 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

E-mail: cniz@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7115

* 한국과학기술원 기계공학과

** 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부

의 작동영역은 커지면서, 높은 분해능 및 정밀도를 요구 받고 있는 상황이다.

현재 초정밀 직선 이송계에 있어서 많이 적용되고 있는 공기정압 및 유정압베어링은 마찰력을 최소화하여 높은 이송정밀도를 얻을 수 있으면서, 평균화 효과에 의해 가이드의 형상오차에 기인한 운동오차를 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

공기정압 베어링은 공기의 정적인 압력차이를 이용하여 하중을 지지하는 방식으로 베어링 패드와 가이드의 간극은 10~20 μm 정도의 값을 갖는다. 이러한 간극과 요구되는 강성을 제공하기 위해서는 공기베어링에 적절한 예압을 가할 필요가 있으며, 이러한 예압 방식으로는 일반적인 양면 패드 방식과, 자중을 이용하는 방법, 진공 흡인력을 이용하는 방법과 자기력을 이용하는 방법 등이 적용될 수 있다.

이중 자기예압 공기베어링은 자기력의 인력을 이용하여 공기베어링의 예압력을 발생시키는 방법으로, 일반적으로 사용되는 양면패드 형과 같이 양면의 가이드 면이 필요하지 않아 제작의 용이성과 구조의 단순화를 꾀할 수 있고, 예압을 위하여 자중이나 진공을 사용하는 경우에 비하여 경량화가 가능하고 간단하면서도 효율적인 예압을 줄 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 자기예압은 영구자석을 이용하여 간단히 구현할 수 있으며, 철심형 리니어 모터의 흡인력을 예압력으로 적용하는 것도 가능하다.^{1,2}

본 연구에서는 이러한 자기예압장치의 영구자석에 의한 자기력을 변화시킬 수 있도록 코일을 추가하여 공기베어링의 간극을 직접 제어할 수 있도록 하였다. 이러한 기능을 이용하여 스테이지의 이송 중에 발생하는 스테이지의 자세오차 혹은 운동오차를 능동적으로 보상하여 스테이지의 운동정밀도를 향상시키기 위한 용도로 적용될 수 있다. 이러한 정압 테이블의 능동 자세 제어를 위하여 공기베어링 패드와 테이블 사이에 압전 구동장치를 사용하거나 공기압의 제어를 통하여 능동 공기베어링 시스템을 구현하는 연구가 진행된 바 있으나, 액츄에이터의 비선형적 특성이 발생하며 시스템이 복잡해질 수 있다.^{3,4} 이에 비하여, 본 연구에서 적용한 자기력의 경우, 상대적으로 작은 공극 변화와 전류변화에 대해서는 우수한 선형성을 갖도록 설계할 수 있어 이러한 비선형성 보상의 필요가 없이, 운동오차 보상 등에 유용하게 사용될

수 있을 것으로 기대된다.⁵

따라서, 본 논문에서는 자기력을 예압력으로 이용하는 다공질 베어링의 설계를 위하여 다공질 공기베어링에 유한차분법을 이용하여 다공질 베어링을 설계 및 해석하고, 영구자석을 포함한 자기회로 모델을 통한 예압장치의 모델을 유도하였다. 또한 이러한 자기액츄에이터를 적용한 1 축 실험 스테이지를 설계하고 테이블의 모서리 네 곳에 액츄에이터를 적용하여 수직 및 피치, 롤 각운동의 3 자유도에 대한 미세한 자세 제어가 가능하도록 설계하였다. 제작된 이송계를 통하여 자기예압 공기베어링의 하중특성 및 부상특성을 실험하여 해석결과와 비교하였으며, 3 자유도의 자세제어실험과 각 자유도의 비연성화를 통하여 선형성이 우수한 제어특성을 확인하였다.

2. 능동자기예압 공기베어링 스테이지 설계

2.1 공기베어링 스테이지의 예압

다음의 Fig. 1 은 공기베어링 스테이지를 구성함에 있어서의 한 예를 나타낸 것이다. Fig. 1a 는 공기베어링으로 예압을 작용하는 방식 (양면 패드 방식, Boxed design or wrap-around design)을 나타낸 것이며, Fig. 1b 는 본 연구에서 적용한 바와 같이 예압형을 적용하는 경우로 가이드 부분의 형상을 좀더 단순화 할 수 있고, 예압 방향(수직)으로는 한쪽 가이드면만 사용함으로써 제작과 조립이 용이해지는 장점이 있으며, 특히 대형화에 유리하다 할 수 있다.

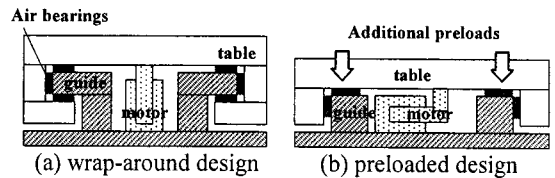


Fig. 1 A 1-axis air bearing stages with two types of preloading method

예압력으로 자기력을 사용하기 위하여 테이블 양쪽에 수직방향으로 자석을 배치한 경우, 테이블의 수직방향에 작용하는 힘을 2 자유도 모델을 도시하면 Fig. 2 와 같다. 즉, 테이블의 자중 W_t 및 자기예압에 의한 자기력 F_{m1} , F_{m2} 와 공기베어링 패드에 의한 $W_{a1} \sim W_{a4}$ 가 평형을 이루어 테이블을

지지하게 된다.

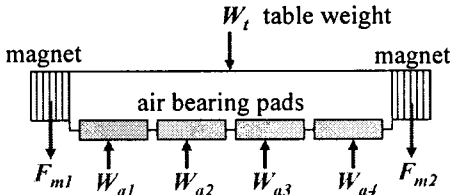


Fig. 2 Vertical forces acting on the table with magnetic preloads

2.2 다공질 공기베어링의 해석 방법

본 연구의 공기베어링은 강성과 부하용량, 안정성면에서 유리한 다공질 패드 공기 베어링을 적용하였다. 다공질 공기베어링은 가압된 공기가 다공질 재료를 통과하고 가이드 사이로 배기되며 유막을 형성하여 지지하는 것으로, 패드내의 압력분포 계산이 하중 용량 등의 계산을 위해 필요하다. 이를 위해 다공질 재료 내부에서의 기체 흐름에 대한 지배 방정식인 Darcy 의 방정식 (1), 다공질 재료와 베어링 간극 사이에서는 눈막힘 특성(E_2)을 고려한 유량의 평형 방정식 (2), 그리고 베어링 간극에서는 레이놀즈 방정식 (3)으로 유도되는 편미분 지배방정식을 이용하여 계산할 수 있다.⁶

$$k_x \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$k_x \frac{\partial p^2}{\partial x} \Big|_{x_-} dydz + k_y \frac{\partial p^2}{\partial y} \Big|_{y_-} dx dz + 2k_z \frac{\partial p^2}{\partial z} \Big|_{z_-} dx dy \quad (2)$$

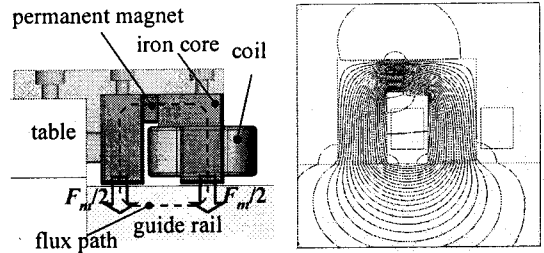
$$= k_x \frac{\partial p^2}{\partial x} \Big|_{x_+} dydz + k_y \frac{\partial p^2}{\partial y} \Big|_{y_+} dx dz + 2E_2 k_z \frac{\partial p^2}{\partial z} \Big|_{z_+} dx dy$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + h^3 \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{\partial p}{\partial y} \right) - 12\mu \rho w = 0 \quad (3)$$

본 연구에서는 식 (1) ~ (3)을 유한 차분법(Finite Difference Method)과 SOR (Successive Over Relaxation) 수치해석법을 적용한 사각형 다공질 공기베어링 해석 틀을 이용하여 다공질 베어링과 간극사이의 압력분포와 하중용량 및 강성을 계산하였다.⁷

2.3 능동 자기 예압 장치의 수학적 모델링

개별 공기베어링 패드의 하중능력 및 강성값이 계산되면 이를 이용하여 요구되는 강성을 갖기 위한 공기베어링 간극과 이에 해당하는 예압력을 구할 수 있으며, 본 연구에서 제안한 자기예압 장치에서 요구되는 예압력을 얻을 수 있도록 설계하여야 한다.



(a) magnetic actuator (b) 2D flux line (ANSYS 9.0)
Fig. 3 Magnetic actuator for preloading air bearing

Fig. 3 은 본 연구에서 제안한 자기예압 장치를 나타내고 있는 것으로, 정격예압을 제공하는 영구 자석과 철심, 자기력을 변화시키는 코일로 이루어져 있다. 정확한 자기력 및 특성 예측을 위해서는 유한요소법을 이용하여 공극에서의 자기장과 자기력을 계산할 수 있으나, 자기회로모델(magnetic circuit model)을 이용한 해석 방법이 설계단계에서는 더 유용하다 할 수 있다. Fig. 3b는 2 차원 유한요소 해석의 결과를 나타낸 것으로, 코어 공극면 부근에서의 프링징 효과 등을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 순철 코어의 자기저항(reluctance) 및 공극과 코어 주변의 자장 누설 및 공극 부분의 프링징 효과(fringing field)를 고려한 자기회로 모델을 사용하였으며, 자세한 내용은 부록 A1 에 나타내었다.

실제 예압으로 작용하는 자기력은 자극과 가이드면의 공극에서 자극면에 수직방향으로 작용하는 유효 자속 Φ_g 와 자극 면적 A_g 의 함수로 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$F_m = \frac{\Phi_g^2}{\mu_0 A_g} \quad (4)$$

이러한 자기력은 다음과 같이 공극의 변화와 코일의 전류에 대한 비선형 함수로 나타낼 수 있게 되는데, 설계된 정격 예압 및 공극 $F_m(g_0, 0)$ 부

근에서 다음의 식(5)과 같이 근사화 할 수 있다.

$$F_m = F_m(g, I) \approx F_m(g_0, 0) + \left. \frac{\partial F_m}{\partial g} \right|_{g_0, 0} g + \left. \frac{\partial F_m}{\partial I} \right|_{g_0, 0} I$$

$$= F_{m0} + K_g g + K_I I \quad (5)$$

여기서 F_{m0} 는 상수항으로, 정상상태에서의 예압력을 나타낸다. 즉, 이 값을 요구되는 예압력을 만족하도록 설계되어야 한다. 또한 K_g 는 공극의 변화에 대한 계인값으로, 자기 액튜에이터의 차체 강성이라 할 수 있다. 이러한 K_g 값은 일반적인 스프링과 달리, 음의 부호값을 갖게 된다. 그러나 공기베어링의 간극보다 자기 액튜에이터의 공극 g 를 매우 크게 설계할 경우, 자기액튜에이터 예압력의 변위민감 성분은 공기베어링의 강성보다 작아져 상대적으로 무시 할 수 있다.

전류에 대한 자기력의 변화의 계수를 나타내는 K_I 은, 이 값이 클수록 작은 전류로 큰 자기력의 변화를 얻을 수 있어, 효율적인 제어를 할 수 있으므로 이를 크게 설계 하는 것이 바람직하다. 이러한 자기력의 특성을 결정짓는 설계인자로는 자극의 면적, 공극의 길이, 영구자석의 크기, 코일의 감은 수 등이 있다.

2.4 능동 자기 예압 공기베어링 설계

자기회로 모델을 이용한 계산 예로 상용으로 구입이 가능한 블록형 영구자석을 사용한 다음의 Table 1 의 제원을 갖는 액추에이터에 대하여 공극이 0~2 mm 로 변할 때의 특성을 해석하였다.

Table 1 Parameters of analysis example for a magnetic actuator

Item	Specifications
Permanent magnet size ($W_{pm} \times H_{pm} \times l_{pm}$)	$8 \times 25 \times 4 \text{ mm}^3$ $8 \times 25 \times 10 \text{ mm}^3$
Coercive force of PM, H_c	$796 \times 10^3 \text{ A/m}$
Residual induction of PM, B_r	1.09 T
Area of pole face ($W_p \times L_p$)	$12 \times 25 \text{ mm}^2$
Number of turn of coil	300
Relative permeability of core	1,000 (Iron)
Relative permeability of guide	500 (Carbon steel)

영구자석 두께 (l_{pm})의 영향을 알아보기 위하여 두께가 4 mm 및 10 mm 인 두가지 영구자석을 사용한 경우의 공극에 따른 자속 밀도 및 자기력의

크기를 나타낸 Fig. 4a 에서 큰 영구자석을 쓴 경우 자기력이 0.5 mm 공극에서 약 10%정도 크게 나타난 것을 알 수 있으나, 전류 민감도를 나타낸 Fig. 4b 의 결과를 보면 전류민감도는 오히려 40%정도 작은 것을 알 수 있다. 이는 영구자석의 투자율이 공극과 비슷하여 영구자석의 길이가 코일의 자기력에 대해 공극과 같은 자기저항으로 작용하기 때문이다. 또한 전류 민감도의 경우 간극이 작을수록 크게 나타나고 있음을 알 수 있어, 전류민감도를 크게 하기 위해서는 가이드와의 간극을 작게 하고, 영구자석의 두께를 작은 것을 사용하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 또한 변위 민감도의 경우는 영구자석의 길이에는 거의 영향이 없으며, 간극 0.5 mm 이상에서 절대값이 0.1 N/ μm 이하로 공기베어링의 강성에 비하여 충분히 작은 값으로 무시할 수 있음을 알 수 있다.

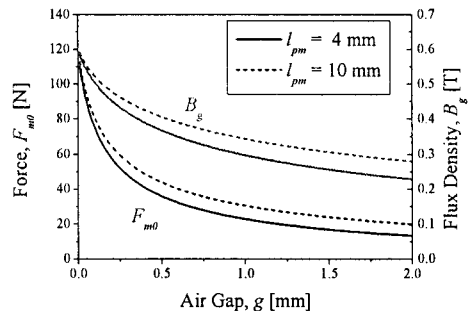


Fig. 4 (a) Calculated magnetic flux density and magnetic force for a actuator

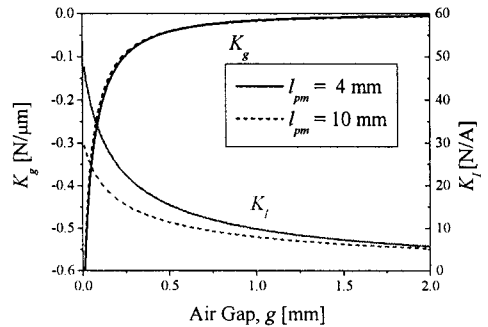


Fig. 4 (b) Calculated sensitivity of air gap and current of a magnetic actuator

2.5.1 축 실험 스테이지 설계

다음의 Fig. 5 는 설계된 1 축 실험 스테이지를

나타내고 있다. 테이블의 전체 이송거리는 240 mm 이며, 중앙에 위치한 리니어모터를 이용하여 직선 이송을 하도록 하였다. 테이블을 지지하는 수직방향의 공기베어링은 2x4 열로 배치하도록 하였으며, 수평방향은 양쪽에 배치하여 양면 패드 방식으로 구성하였다. 따라서 자기예압 장치는 수직방향에 대하여 필요하게 된다. 수직방향 운동 제어의 경우 수직방향의 변위와 관련된 자유도는 수직 변위 (z), 피치 운동 (θ_y), 롤 운동 (θ_x)의 3 개의 자유도를 가지게 된다. 따라서 최소한 3 개의 액츄에이터가 필요하나, 본 연구에서는 일반적인 직선 구동 스테이지의 형태에서 3 점 작용으로 설계하기가 용이하지 않아, 테이블의 4 군데 모서리에 장착하였다.

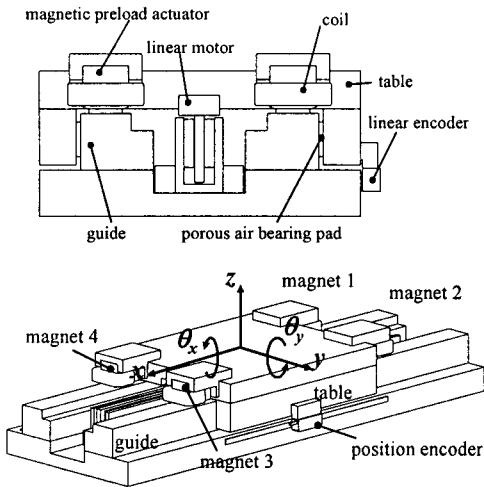


Fig. 5 1-axis air bearing stage with active magnetic preload

Table 2 에는 설계된 스테이지의 공기베어링 제원을 나타내고 있다. 요구되는 자기예압력은 각 공기베어링 패드의 하중용량과 자석의 자기력 합과의 평형을 이루는 조건에서 수직방향에 작용하는 테이블의 무게를 제외한 힘으로 구해서 약 250 N 으로 계산되었다. 또한, 자세제어를 위한 제어 게인의 경우, 수직방향의 경우 전류민감도를 이용하여 약 1.61 $\mu\text{m}/\text{A}$ 로 계산될 수 있는데, 이는 $\pm 1 \mu\text{m}$ 범위를 제어한다고 할 때, 최대 0.8 A 의 전류가 흐르는 것으로, 각 코일의 저항이 3 Ω 일 때, 약 2 W 의 I^2R 손실이 생기는 것으로 손실에 의한 발열은 크지 않을 것으로 예측된다.

Table 2 Designed air bearing stage with magnetic preload (0.4 MPa)

Item	Specifications
Air bearing pad size (W x L x t)	50 x 20 x 5 mm ³
Air bearing clearance (vertical)	13.5 μm
Vertical air bearing stiffness	38.5 N/ μm
Required preload (vertical)	250 N
Permanent magnet size	25 x 8 x 4 mm ³
Table weight	10.0 kg
Magnetic preload	35.8 x 4 N
Current gain of an actuator	15.5 N/A

3. 능동자기예압 공기베어링 스테이지의 실험적 연구

3.1 1 축 실험스테이지의 제작

Fig. 6 에는 제작된 스테이지의 사진을 나타내고 있다. 제작된 시스템은 DSP 보드(dSPACE DS1104)를 이용하여 이송제어 및 자기예압의 제어를 수행하도록 하였다. 이송시스템은 무철심형 리니어모터(Trilogy 210)를 사용하고, 0.1 μm 분해능의 엔코더(Renishaw RGH22)로 이송위치를 제어하도록 구성하였다.

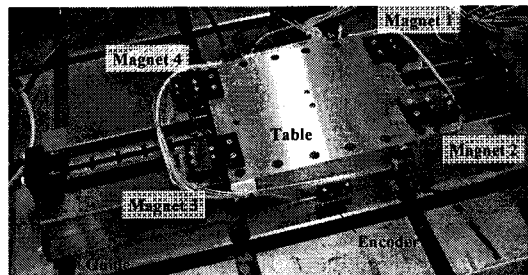


Fig. 6 Fabricated 1-axis linear motion stage with magnetically preloaded air bearings

3.2 자기예압 공기베어링 특성 실험

제작된 1 축 이송계의 공기베어링의 하중용량을 측정된 결과를 Fig. 7a 에 나타내었다. 각각 0.3, 0.4, 0.5 MPa 의 공기압력에서 수직방향의 하중에 대한 테이블 중심에서의 부상량을 용량형 센서(ADE-3401)로 측정된 것으로, 수치해석을 이용하여 해석한 결과와 측정된 결과를 나타내고 있다. 이때의 부가하중은 10~40 kgf 의 무게추를 이용하였으며, 테이블 자체의 무게 10.0 kgf 를 포함한 값이다. 여기서 제작된 공기베어링의 특성이 2.2

절의 방법으로 계산된 해석결과와 유사한 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

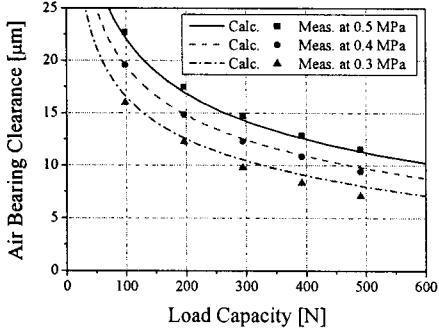


Fig. 7 (a) Load capacity of air bearing stage in vertical direction

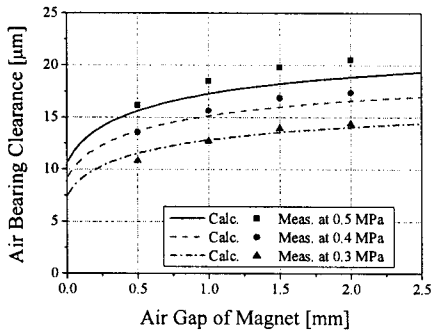


Fig. 7 (b) Experimental results of characteristics of magnetically preloaded air bearing

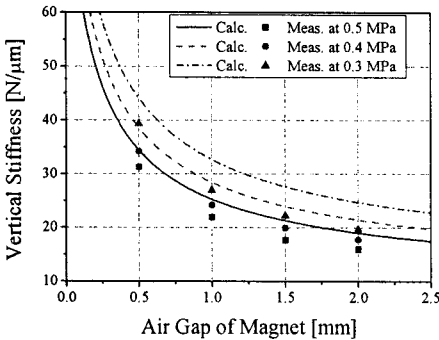


Fig. 7 (c) Experimental results of vertical stiffness of the stage

Fig. 7b 는 자기예압 액츄에이터의 자극과 가이드 면과의 간격에 따른 공기베어링의 간극을 측정 한 결과로, 0.5 mm 공극에서 0.4 MPa 압력에 대해

13.7 μm 공기베어링 부상량을 나타내, 설계값에 비하여 약간 크게 나타났다. 또한, Fig. 7c 는 테이블에 0.8 kgf, 1.6 kgf 의 하중을 가하고 수직방향의 변위를 측정하여 강성값을 계산한 것으로 약 10~15%의 오차를 나타내고 있다. 특히, 일반적인 더블패드 방식의 공기베어링의 경우 급기압을 크게 할 수록 강성이 증가하는 것에 비하여, 자기예압 방식의 경우 급기압이 감소할 때, 강성이 증가하는데, 이는 압력 감소시 간극의 감소에 의한 강성 증대 효과가 크기 때문으로, 예압형 공기베어링에서 나타나는 특성이라 할 수 있다.

최종적으로, 자석의 공극은 0.5 mm 를 갖도록 설정하였고, 공기베어링 강성은 0.4 MPa 에서 34.4 N/μm, 공기베어링 간극은 13.7 μm 로 결정되었다.

3.3.3 자유도 자세 제어 특성 및 선형화 보정

테이블에 장착된 4 개의 자기예압 액츄에이터의 전류를 제어함 따라 테이블의 자세를 제어할 수 있다. 3 개의 자유도에 대한 제어 입력을 u_y 라고 하고, Fig. 5 의 1~4 번 자기 액츄에이터 코일에 대한 제어기의 제어입력전압을 u_m 이라고 할 때, 변환 행렬 B_u 를 이용하여 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 제어 입력에 의하여 발생되는 테이블의 운동 y 는 제어 이득 행렬 K 를 사용하여 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_m = B_u u_y \quad (6)$$

$$y = K_t K_m u_m = K_t K_m B_u u_y = K u_y \quad (7)$$

여기서,

$$y = \begin{Bmatrix} z \\ \theta_y \\ \theta_x \end{Bmatrix}, \quad u_y = \begin{Bmatrix} u_z \\ u_{\theta_y} \\ u_{\theta_x} \end{Bmatrix}, \quad u_m = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix},$$

$$K = \begin{bmatrix} K_z & K_{z,\theta_y} & K_{z,\theta_x} \\ K_{\theta_y,z} & K_{\theta_y} & K_{\theta_y,\theta_x} \\ K_{\theta_x,z} & K_{\theta_x,\theta_y} & K_{\theta_x} \end{bmatrix} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있으며, K 는 3×3 의 제어 이득 행렬로, 각 항은 μm/V 및 arcsec/V 의 단위를 갖는다. B_u 는 4×3 행렬로 각 전자석 코일에 들어가는 제어입력 u_m 과 해당자유도의 제어를 위한 제어입력

u_y 과의 관계를 나타내는 행렬이며, K_m 은 각 액츄에이터의 제어입력에 의한 테이블의 변위를 나타내는 3×4 의 이득 행렬을 나타낸다. 또한 K_t 는 자기예압 및 공기베어링에 의한 테이블의 강성을 나타내는 3×3 행렬이다. 만약 K 행렬이 상수항으로 이루어진 대각행렬로 나타내어질 수 있으면, 각 자유도에 대하여 독립적이며, 선형적인 제어 특성을 갖게 된다고 할 수 있다.

Table 3 Motion control gains and transfer matrix

	Without calibration	With calibration
B_u	$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0231 & -1.1156 & 1.0476 \\ 0.9434 & -0.7791 & -0.9519 \\ 0.9778 & 1.2285 & -0.9671 \\ 1.0575 & 0.8919 & 1.0324 \end{bmatrix}$
K	$\begin{bmatrix} -0.6087 & 0.0384 & 0.0248 \\ -0.0779 & 4.4472 & 0.0370 \\ -0.0994 & 0.3950 & 2.3228 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.6110 & -0.0011 & 0.0056 \\ 0.0094 & 4.5166 & -0.0046 \\ 0.0080 & -0.0773 & 2.3280 \end{bmatrix}$

Table 3 에는 보정 전후의 B_u 와 K 를 나타내고 있는데, 보정이 필요한 이유는, 각 공기베어링 패드에서의 강성 불균일 등으로 인하여, 초기 B_u 값에 대해서는 K 의 대각항 외의 값이 크게는 대각항 값의 10%까지 나타나는 연성 특성이 있었기 때문이다. 이를 보정하기 위해 보정 전에 측정된 K 값을 고유값 행렬 K_2 로 대각화 하기 위하여 B_{u2} 를 다음의 (9)와 같이 설정하면, (7)에 대입할 경우 (10)과 같은 결과를 얻게된다.

$$B_{u2} = B_u K^{-1} K_2 \quad (9)$$

$$y = K_t K_m B_u K^{-1} K_2 u_y = K K^{-1} K_2 u_y = K_2 u_y \quad (10)$$

Fig. 8 은 최종적으로 보정된 제어이득의 측정실험 결과를 나타내고 있다. 제어이득의 측정은 각 자유도의 제어입력을 0 V 에서 2 V, 2 V 에서 -2 V 그리고 다시 0 V 로 인가하며, 각 자유도의 변위를 측정하는 것으로, 측정은 3 개의 용량형 변위센서를 이용하여 이루어졌다. 이때, 각 코일로의 출력은 각 전류증폭기의 게인 0.394 A/V 에 따라 전류로 변환된다. 결과에서 알 수 있듯이 입력에 대한 위치의 변화가 이력특성(Hysteresis)이 거의 없는 선형적인 특성을 가짐을 알 수 있으며, 각 자유도에 대해 독립적인 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

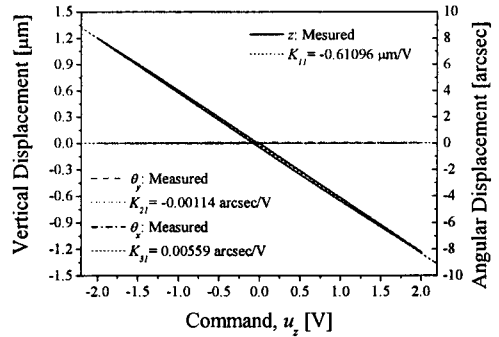


Fig. 8 (a) Table motion by vertical motion command, u_z

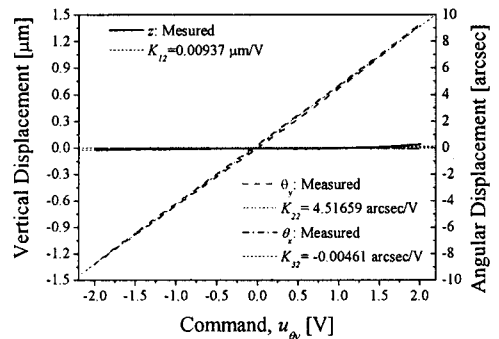


Fig. 8 (b) Table motion by pitch motion command, u_{θ}

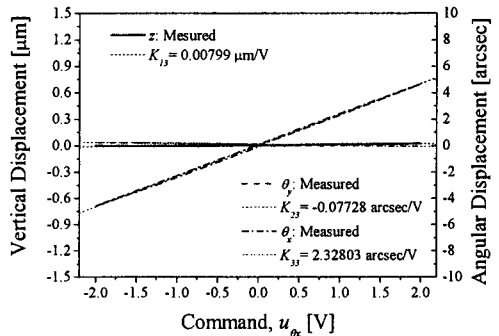


Fig. 8 (c) Table motion by roll motion command, u_{ϕ}

최종적으로 구해진 운동제어 이득은 수직방향의 경우 $-0.611 \mu\text{m/V}$, 피치 운동의 경우 4.5166 arcsec/V , 롤의 경우 2.328 arcsec/V 로 나타났으며, 측정된 수직방향의 강성과 제어이득, 증폭기의 전류 증폭비를 통해 액츄에이터의 전류민감도가 15.1 N/A 임을 역으로 유추할 수 있다. 또한 제어 입력 2 V 는 약 0.7 A 이므로, 2 장에서 해석한 것과 같이 $\pm 1 \mu\text{m}$ 정도의 수직변위에 대해서는 $\pm 0.6 \text{ A}$ 이내로 제어가 가능함을 알 수 있다.

이러한 선형성 및 독립성은 테이블의 자세제어를 위해 제한제어 방법을 사용하지 않고서도 정밀한 자세제어가 가능하며, 선형제어 방법의 적용 등이 용이하다는 장점을 제공한다 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 영구자석과 전자석을 조합한 능동자기예압 장치를 다공질 공기베어링 스테이지에 적용하여 공기베어링 스테이지의 구조 단순화와 능동 제어 특성을 갖도록 하기 위한 연구를 수행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 영구자석, 전자석 조합의 자기 예압장치의 자기 회로 모델을 구축하고, 다공질 공기베어링의 수치해석 결과를 이용하여 하중용량 및 강성을 고려한 설계 방법을 제시하였다.
- 2) 능동제어를 위한 제어이득을 크게 하기 위해서는 영구자석의 두께를 작게 하는 것이 유리하다.
- 3) 수직방향에 4 개의 자기예압 장치를 갖는 1 축 스테이지를 설계 및 제작하였다.
- 4) 자기예압 공기베어링의 정적 하중용량 및 강성 실험결과, 해석모델의 유효성을 확인할 수 있었으며, 압력의 감소에 따라 강성이 증가되는 특성을 나타내었다.
- 5) 제어 계인의 보정을 통하여 선형성 및 독립성이 우수한 자세제어 특성을 얻을 수 있었으며, 이를 이용하여 운동오차 제어 등에 효율적으로 적용될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Ro, S. K. and Park, J. K., "A Miniature Air-Bearing Positioning Stage with a Magnet-Moving Linear Motor," *Journal of Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 24, No. 8, pp. 89-96, 2007.
2. Slocum, A., Basaran, M., Cortesi, R. and Hart, A. J., "Linear Motion Carriage with Aerostatic Bearings Preloaded Inclined Iron Core Linear Electric Motor," *Precision Engineering*, Vol. 27, Issue 4, pp. 382-394, 2003.
3. Watanabe, I., Aoyama, H. and Shimokobe, A., "An Active Air Bearing - Ultra-precision Control of Floating Position and Vibration," *Journal of JSPE*, Vol. 54, No. 2, pp. 329-334, 1988.

4. Mizumoto, H., Tanaka, H., Okuno, K., Matsumura, T. and Kawakami, R., "An Infinite Stiffness Aerostatic Bearing with an Exhaust Control Restrictor," *Journal of JSPE*, Vol. 57, No. 11, pp. 164-169, 1991.
5. Lee, S. Q. and Gweon, D. G., "A new 3-DEF Z-tilts micro positioning System Using Electromagnetic Actuators and Air Bearings," *Precision Engineering*, Vol. 24, No. 1, pp. 24-31, 2000.
6. Yoshimoto, S. and Kohno, K., "Static and Dynamic Characteristics of Aerostatic Circular Porous Thrust Bearings (Effect of the Shape of the Air Supply Area)," *ASME J. of Tribology*, Vol. 123, Issue 3, pp. 501-508, 2001.
7. Park, C. H. and Lee, H., "Motion Error Analysis of the Porous Air Bearing Stage Using the Transfer Function," *Journal of Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 21, No. 7, pp. 185-194, 2004.

부 록

A1. 자기예압 액츄에이터 자기회로 모델

자기회로 모델은 전기회로와 자기장 흐름 사이의 유사성을 이용하여 계산하는 방법으로, 해석적 모델이 가능하여 널리 사용되는 방법이다. 단, 본문에서 논한 바와 같이, 다양한 자기로의 특성에 대한 모델링 필요하다. 다음의 Fig. A1 은 자기예압장치에서 발생하는 자기장을 나타낸 것이다. 여기서 R 은 자기저항(reluctance)을 의미하며, V 는 기자력 (magnetomotive force), Φ 는 자속(magnetic flux)을 의미한다. 이러한 자기 경로를 고려한 자기회로 모델은 Fig. A2a 이며, Fig. A2b 는 이를 단순화한 등가 모델을 나타낸다.

여기서 자기력을 발생시키는 영구자석의 기자력과 자체 자기저항은 네오디뮴 합금 영구자석의 자화특성인 영구자석의 투자율 μ_{pm} 과 보자력 H_c 을 고려하여 다음의 식 (A1.1), (A1.2)과 같으며,

$$V_{PM} = H_c l_{pm} \quad (A1.1)$$

$$R_{PM} = \frac{l_{pm}}{\mu_{pm} A_{pm}} \quad (A1.2)$$

공극면에 수직방향인 유효자속은 전체자속을 이용

하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi_g = \frac{R_{fsum} \Phi_1}{R_{fsum} + R_g} \quad (A1.3)$$

$$\Phi_1 = \frac{NI + \frac{R_{sum} V_{pm}}{R_{pm}}}{R_{sum} + R_{C1} + R_{C2} + 2R_{gsum} + R_{rail}} \quad (A1.4)$$

(A1.4)의 각 자기저항은 다음 같다.

$$R_{lksum} = \frac{1}{1/R_{lk1} + 1/R_{lk2} + 2/R_{lk3}} \quad (A1.5)$$

$$R_{sum} = \frac{1}{1/R_{lksum} + 1/R_{pm}} \quad (A1.6)$$

$$R_{gsum} = \frac{1}{1/R_{fsum} + 1/R_g} \quad (A1.7)$$

$$R_{fsum} = \frac{1}{1/R_{f1} + 1/R_{f2} + 2/R_{f3}} \quad (A1.8)$$

각각의 자기저항 중, 공기중에 발생하는 프린징 및 누설 자속의 자기저항은 자기저항의 역수인 퍼미언스(permiance, P)를 적분하여 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{lk1} = \frac{\mu_0 W_p}{\pi} \left[\ln \pi \left(\frac{l_{pm}}{2} + L_p \right) - \ln \frac{\pi l_{pm}}{2} \right] = \frac{1}{R_{lk1}} \quad (A1.9)$$

$$P_{lk3} = \frac{\mu_0 H_p}{\pi} \left[\ln \pi \left(\frac{l_{pm}}{2} + L_p \right) - \ln \frac{\pi l_{pm}}{2} \right] = \frac{1}{R_{lk3}} \quad (A1.10)$$

$$P_{lk2} = \frac{\mu_0 W_p h_4}{L_0} = \frac{1}{R_{lk2}} \quad (A1.11)$$

$$P_{lkpm} = \frac{\mu_0 (W_p H_p - W_{pm} H_{pm})}{l_{pm}} = \frac{1}{R_{lkpm}} \quad (A1.12)$$

$$P_{f1} = \frac{2\mu_0 W_p}{\pi} \left[\ln \pi \left(\frac{\pi}{2} h_1 + g \right) - \ln g \right] = \frac{1}{R_{f1}} \quad (A1.13)$$

$$P_{f2} = \frac{2\mu_0 W_p}{\pi} \left[\ln \pi \left(\frac{\pi}{2} h_2 + g \right) - \ln g \right] = \frac{1}{R_{f2}} \quad (A1.14)$$

$$P_{f3} = \frac{2\mu_0 W_p}{\pi} \left[\ln \pi \left(\frac{\pi}{2} h_3 + g \right) - \ln g \right] = \frac{1}{R_{f3}} \quad (A1.15)$$

이렇게 계산된 자기저항을 (A1.3)~(A1.4), 및 본

문의 (4) 등에 대입하여 자기력을 구하게 된다.

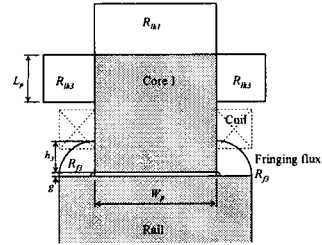
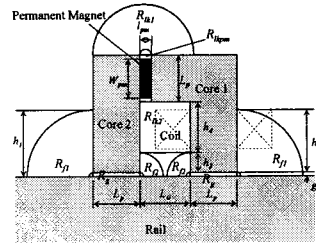
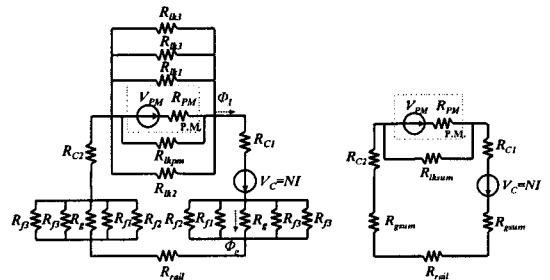


Fig. A1 Magnetic fluxes and respective reluctances of the magnetic actuator



(a) magnetic circuit model (b) simplified circuit
Fig. A2 Magnetic circuit model for the magnetic actuator

부록참고문헌

A1. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C. and Umans, S. D., "Electric Machinery," McGraw-Hill, pp. 1-146, 1992.
A2. Furlani, E. P., "Permanent Magnet and Electomechanical Devices," Academic Press, pp. 144-161, 2001.
A3. Lee, S. H., Baek, Y. S. and Jung, K. S., "Modeling and Analysis of Electromagnets for Magnetic Suspension Systems," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 7, No. 4, pp. 28-33, 2006.