

초정밀 스테이지를 위한 능동형 자기예압 공기베어링에 관한 연구

노승국*, 박천홍(한국기계연구원 지능기계연구센터), 김수현, 곽윤근(한국과학기술원 기계공학과)

Study on the Linear Air Bearing Stage with Actively Controllable Magnetic Preload

S. K. Ro, C. H. Park(Intelligent Machine Systems Research Center, KIMM)

S. H. Kim, Y. K. Kwak (Mechanical Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

A precise linear motion stage supported by magnetically preloaded air bearings is introduced where preloading magnetic actuators are combined with permanent magnets and coils to adjust air bearing clearance by controlling magnetic force actively. Each of the magnetic actuators has a permanent magnet generating nominal 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 nominal preload and variation of force due to current. A 1-axis linear stage motorized with a coreless linear motor and a linear encoder is built for verifying this design concept. 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, and the result shows very good linearity.

Key Words : Porous Air Bearing (다공질 공기베어링), Magnetic Preload (자기예압), Active Air Bearing (능동 공기베어링), Magnetic Force (자기력), Active Motion Error Compensation (능동 운동오차보상)

1. 서론

최근 초정밀 스테이지용으로 공기정압 베어링이 널리 적용되고 있으며, 공기정압 베어링의 간극과 요구되는 강성을 제공하기 위해서는 적절한 예압을 가할 필요가 있다. 이러한 예압에는 일반적인 양면패드 방식과, 자중을 이용하는 방법, 진공 흡인력을 이용하는 방법과 자기력을 이용하는 방법이 있다. 본 논문에서는 이중 자기예압을 적용하면서 스테이지의 이송 중 운동오차 등을 능동적으로 보상할 수 있는 기능을 갖도록 능동제어가 가능한 공기베어링을 소개한다.

본 논문에서는 자기력을 예압력으로 이용하는 다공질 베어링의 설계를 위하여 유한차분법을 이용하여 다공질 베어링을 설계 및 해석하고, 영구자석을 포함한 자기회로 모델을 통한 예압장치의 모델을 유도하였다. 이러한 자기액츄에이터를 적용한 1축 실험스테이지를 설계하고 테이블의 모서리 4 곳에 액츄에이터를 적용하여 수직 및 피치, 롤의 각 운동 3 자유도에 대한 자세 제어가 가능하도록 설계하였다. 제작된 이송계를 통하여 자기예압 공기베어링의 하중특성 및 부상특성을 해석결과와 비교하였으며, 3 자유도의 자세 제어실험을 통하여 선형성이 우수한 제어특성을 확인하였다.

2. 능동자기예압 공기베어링 스테이지

Fig. 1 에는 본 연구의 자기예압 공기베어링을 이용한 1축 스테이지를 나타내고 있다. 즉, 수직방향(Z)의 경우 공기베어링은 테이블의 하부 한 방향에만 위치하고 있으며, 모서리 4 곳에 1~4 번의 영구자석과 전자석이 조합된 능동자기예압 장치가 위치하고 있다.

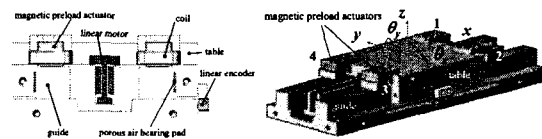


Fig. 1 1-axis air bearing stage with active magnetic preload

테이블의 수직방향에 작용하는 힘은 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 지지한다. 수평방향의 경우에는 양쪽에 공기베어링 패드들이 위치하는 양면패드 방식(double-pad or wrap-around type)으로 지지되어 있다.

본 연구의 공기베어링은 강성과 부하용량, 안정성면에서 유리한 다공질 패드 공기 베어링을 적용하였으며 수치해석법을 이용하여 압력분포 및 하중

용량 과 강성을 계산하였다. 여기서 적절한 공기베어링 간극을 유지할 수 있는 예압력을 구할 수 있으며, 이러한 예압력을 제공하기 위하여 본 연구에서 제안한 자기예압 장치는 다음의 Fig. 2a 과 같이 정격예압을 제공하는 영구자석과 철심, 그리고 자기력을 변화시키는 코일로 이루어져 있다. 정확한 자기력 및 특성 예측을 위해서 순철 코어의 자기저항 (reluctance) 및 공극과 코어 주변의 자장 누설 및 공극 부분의 프링징 효과(fringing field)를 고려한 자기회로 모델(Fig. 2b)을 이용하여 계산하였으며 Table 1 에는 설계된 공기베어링 및 자기예압 장치의 제원을 나타내고 있다.

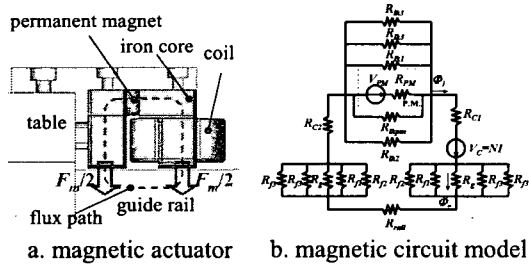


Fig. 2 Magnetic actuator for preloading air bearing

Table 1 Designed air bearing with magnetic preload (0.5 MPa)

Air bearing pad size (W×L×T)	50×20×5 mm ³
Air bearing clearance (vertical)	12 μm
Vertical air bearing stiffness	6.89 N/μm
Require preload (vertical)	317 N
Permanent magnet size	25×8×4 mm ³
Table weight	10.0 kg
Magnetic preload	51.9×4 N
Current gain of a actuator	20.1 N/A

3. 능동자기예압 공기베어링 특성 실험

제작된 1 축 이송계의 공기베어링의 하중용량을 측정된 결과를 Fig. 3a 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 유사한 값을 가지고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 3b 의 자기예압 액츄에이터의 자극과 가이드 면과의 간격에 따른 공기베어링의 부상량을 나타내고 있다. 측정된 결과와 자기회로 모델로 계산한 결과와의 오차는 최대 8.5%로 나타났다.

다음의 Fig. 4 는 세가지 제어입력에 대한 스테이지의 수직방향 및 피치, 롤 각운동 위치의 변화를 나타내고 있다. 여기서 자세 제어를 위한 출력은 전력 증폭기에서 전류로 변환되는데, 이때의 계

인은 0.394 A/V 이다. 결과에서 알 수 있듯이 입력에 대한 위치의 변화가 매우 선형적이며, 이력특성도 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었으며, 수직방향의 경우 $K_z = -0.785 \mu\text{m/V}$ 를 나타내어, 1.99 μm/A 의 전류대비 변위량을 나타내었다.

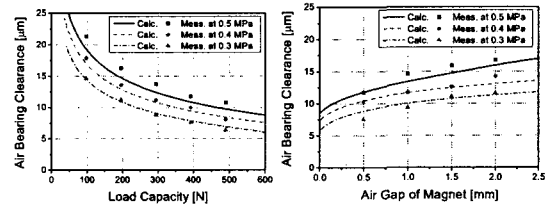


Fig. 3 Experimental results of characteristics of magnetically preloaded air bearing

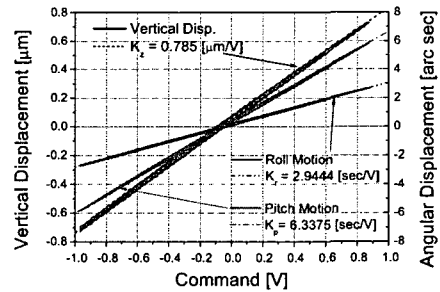


Fig. 4 Control gain of 3-DOF motion using magnetic actuators

4. 결론

본 연구에서는 영구자석과 전자석을 조합한 능동자기예압 장치를 다공질 공기베어링 스테이지에 적용하여 공기베어링 스테이지의 구조 단순화와 능동 제어 특성을 갖도록 하기 위한 연구를 수행하였다. 제안된 시스템의 모델링과 정적 하중용량 및 제어실험을 통하여 제안된 시스템의 효율성과 설계 모델의 정확성을 확인하였다. 특히, 선형성이 우수한 자세제어 특성을 보여 앞으로 본 제안된 시스템을 이용하여 물 오차를 포함한 3 자유도 오차제어, 동특성 분석 및 진동제어 등에 효과적으로 적용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- Slocum, A., etc., "Linear motion carriage with aerostatic bearings preloaded inclined iron core linear electric motor", Precision Engineering, 2003.
- Yamaguchi, J., etc., "Measurement and Control of Straight Motion Accuracy Using Liquid Surface for Absolute Reference", J. of JSPE, 1991