

# 자기예압을 이용한 공기베어링 스테이지의 능동 진동 감쇄 Active Damping of an Air Bearing Stage with Magnetic Preloads

\*#노승국<sup>1</sup>, 김수현<sup>2</sup>

\*S. K. Ro(cniz@kimm.re.kr)<sup>1</sup>, S. Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한국기계연구원 초정밀기계시스템실, <sup>2</sup> 한국과학기술원 기계공학과

Key words : Magnetic preloads, Air bearing table, Active damping.

## 1. 서론

초정밀 스테이지를 적용함에 있어서, 이송정밀도와 운동오차 등의 정밀도는 대부분 거의 정적인 특성을 기준으로 평가되지만, 실제 작동환경에서는 진동, 가감속 특성과 같은 동적인 특성도 매우 중요하게 된다. 특히, 공기베어링 스테이지의 경우, 작동 조건에 따라서는 공기베어링의 감쇠비가 매우 낮아져, 가감속 구간에서 공진이 존재하거나 심한 경우 재생진동(Self-excited vibration)이 발생하여 문제점을 일으킬 수 있다. 따라서 이러한 공기베어링의 동특성에 대해서는 이론 및 해석적으로 많은 연구가 진행되어 있으며, 1 자유도 시스템에 대하여 능동적으로 동특성을 향상시키는 방법에 대한 연구는 일부 진행된 바 있다.[3]

본 연구의 저자들은 공기베어링의 이송시 운동오차를 능동적으로 보상하기 위하여 전자기 액츄에이터를 포함하는 자기예압 공기베어링 스테이지를 제안한 바 있다.[1,2] 본 연구에서는 동적인 운동오차, 즉 진동을 감쇠시키기 위한 능동 제어 시스템을 제안하였다. 테이블의 동특성 중에서 공기베어링의 낮은 감쇠 특성에 의해 생기는 3 개의 강체 모우드에 대한 능동 감쇄를 수행하였으며, 이를 위하여 진동을 측정할 수 있는 가속도계를 테이블에 추가로 장착하였다. (Fig. 1)

이러한 능동 진동제어시스템의 적용을 실제 실험위주로 나타내었다. 능동 진동제어를 위한 시스템 셋업을 설명하고, 각 액츄에이터에 가해진 주어 테이블의 고유진동 특성을 확인하였다. 다음으로, 가속도계를 장착하여 진동을 능동 감쇠시키기 위하여 컨트롤러 내에 기존의 컨트롤러 내에서 속도로 변환을 위한 적분기와 각각의 대역통과 필터(Band-pass filter)를 적용한 시스템과 실험결과를 나타내었다. 특히 급기 압력이 높은 경우 발생하는 공기베어링의 자체 진동을 감쇠시키는 실험을 수행하였다.

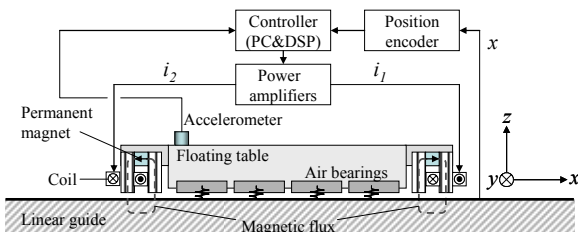


Fig. 1 Air bearing stage with active magnetic preloads for static and dynamic motion control

## 2. 공기베어링 테이블의 3 자유도 진동 제어

공기베어링으로 지지되어 있는 테이블에 대하여 테이블을 강체로 가정하고 수직방향에 관련된 3 개의 자유도만을 고려할 때, 다음의 Fig. 2 와 같은 스테이지에 대하여 Fig. 3 과 같은 형태로 단순화하여 모델링할 수 있다. 즉, 공기베어링을 선형 스프링으로 가정할 때, 공기베어링에 의한 테이블은 기본적으로 3 개의 진동 모우드를 갖게 된다. 만약 각 공기베어링 패드의 강성이 모두 균일하다고 할 경우, 3 개의 모우드는 각각 수직방향(z) 운동, 피치 운동( $\theta_y$ ), 롤 운동( $\theta_x$ )으로 나타내게 된다.

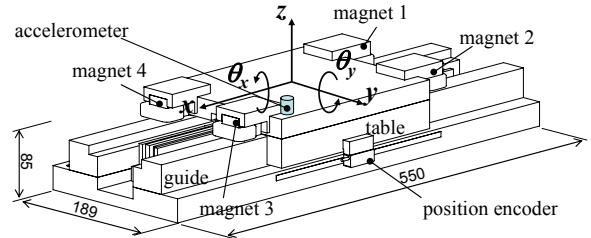


Fig. 2 1-axis air bearing stage with active magnetic preloads

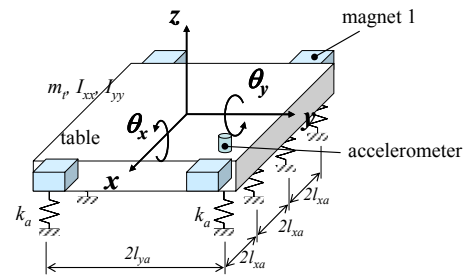


Fig. 3 Dynamic model of the air bearing table

실제로는 테이블의 강성 분포와 질량분포에 따라 자유도간 연성이 있을 수 있어, 정확히 수직과, 피치, 롤 운동으로 정확히 분리되지는 않는다. 이러한 일반적인 경우에는 3 자유도의 행렬식을 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}_t \mathbf{q}(t) = \mathbf{B}_m \mathbf{F}_m(t) \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{M}_t$ ,  $\mathbf{K}_t$  는 각각 관성 및 강성 행렬 ( $3 \times 3$ )이며,  $\mathbf{B}_m$  은 전달 행렬( $3 \times 4$ ) 이고,  $\mathbf{q}(t)$ 와  $\mathbf{F}_m(t)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{q}(t) = \begin{Bmatrix} z_r(t) \\ \theta_{yr}(t) \\ \theta_{xr}(t) \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{F}_m(t) = \begin{Bmatrix} f_{m1}(t) \\ f_{m2}(t) \\ f_{m3}(t) \\ f_{m4}(t) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

이러한 운동계에 속도궤환 제어를 통하여 제어하는 경우, 제어 게인 행렬을  $\mathbf{D}_m$  이라고 할 때,

$$\mathbf{F}_m(t) = -\mathbf{B}_u \mathbf{D}_m \dot{\mathbf{q}}(t) \quad (3)$$

(1)의 시스템 운동 방정식은 다음과 같이 감쇄 항을 포함하게 된다..

$$\mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{B}_m \mathbf{B}_u \mathbf{D}_m \dot{\mathbf{q}}(t) + \mathbf{K}_t \mathbf{q}(t) = 0 \quad (4)$$

즉, 감쇄항이 생기는 것을 알 수 있다. 이 경우,  $\mathbf{D}_m$  을 상수항으로 가져가기 위해서는 제어하고자 하는 세가지 자유도에 대해 측정이 되어야 하며, 이는 적어도 세개의 센

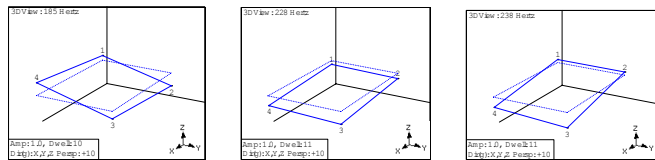
서가 있어야 함을 의미한다. 그러나, 본 연구에서는 공기베어링의 감쇠비를 능동적으로 향상시키는 것과 실용적인 시스템을 위하여 최소한의 센서 추가하도록 하였다. 만약 각각의 진동모우드의 주파수가 충분히 분리되어 있고, 모든 모우드에 민감한 부분에 센서를 설치할 수 있으면, 하나의 센서로 능동 감쇠가 가능해진다. 따라서, 본 연구에서는 진동을 절대적으로 측정할 수 있는 가속도계의 신호를 속도로 바꾸어주는 적분기와 대역통과 필터를 사용하는 방법을 적용하였다. 즉, 가속도계에서 측정된 가속도 신호를 속도로 변환하기 위하여 적분기를 통과 시켰으며, 적분된 신호를 세 개의 (5)와 같은 대역통과 필터에 병행으로 통과시켜서 이를 최종적으로 조합하는 방식을 사용하였다.

$$G_{BPi}(s) = \frac{K_{BPi}S}{s^2 + B_{BPi}S + \omega_{ni}^2}, i=1,2,3 \quad (5)$$

여기서  $K_{BPi}$  는 필터의 게인이며,  $B_{BPi}$  는 주파수  $\omega_{ni}$  에서 통과되는 밴드폭 (-3dB 기준)을 나타낸다.

### 3. 진동제어 실험 결과

테이블의 고유진동수 및 진동모우드를 측정하기 위하여, 모달 해석을 수행하였다. 주파수 응답함수를 얻기 위하여 테이블에 위치한 4 개의 자기액츄에이터에 랜덤 신호를 인가하고, Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 3 번 액츄에이터 인근에 가속도계를 장착하였다. 이 위치를 결정한 것은 이 부분이 3 개의 강체모드에 모두 민감한 부분이기 때문이다. 측정된 결과는 Fig. 5 와 같다.



a. Roll-like mode b. Translation-like mode c. Pitch-like mode

Fig. 5 Rigid body mode shapes of the air bearing table estimated from four FRFs.

측정결과에서 볼 수 있듯이, 1 차 모우드는 185 Hz 의 롤 운동과 유사한 모우드이며, 피치운동이 약간 포함된 수직 방향 운동 모우드가 228 Hz 에 있고, 피치 운동과 유사한 모우드가 238 Hz 에 포함되어 있다. 이는 계산된 고유진동수, 183.9 Hz, 225 Hz, 239 Hz 와 유사하나, 공기베어링 패드간의 강성차이 등으로 인하여, 연성이 나타나고 있음을 알 수 있다. 적용된 제어 파라미터는 다음의 Table 1 과 같다. 진동제어 루프의 경우 10 kHz 의 샘플링 주파수를 가지고 있으며, Tustin 법을 이용하여 전달함수를 디지털 제어기에 적용하였다.

Table 1 Parameters of band pass filters for active damping

Item	first mode	Second mode	Third mode
Natural frequency, $\omega_{ni}$ [Hz]	185	220	240
Filter gain, $K_{BPi}$	200	100	150
Passing bandwidth, $B_{BPi}$ [Hz]	40	30	40

Fig. 6 은 3 번 액츄에이터를 가진하여 측정된 전달함수를 나타낸 것으로, 능동 진동제어를 작동시키지 않은 경우

에는 185 Hz 와 238 Hz 의 1 차, 3 차 모우드에 대하여 낮은 감쇠비를 가지고 있으나, 제어를 수행한 경우 두 모우드의 감쇠비가 증가한 것을 알 수 있다.

Fig. 7 은 제시된 제어 방법을 적용하여, 공기베어링에 공기압을 크게 가하여 공진을 발생시킨 후, 제어를 통하여 감쇠시킨 결과를 나타내고 있다. 단 압력을 증가시킴에 따라 강성이 낮아지면서 고유진동수는 약간 감소하였다. 그러나 제어를 작동시키는 경우 약 0.1 초 안으로 진동이 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

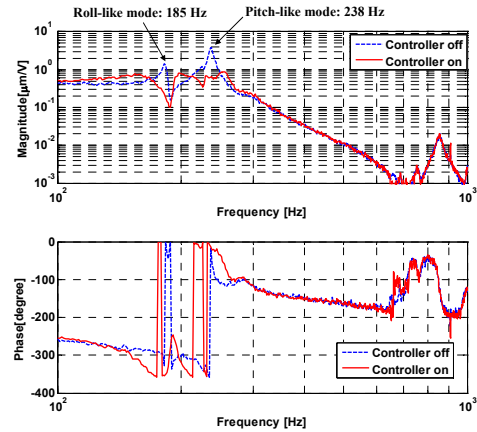


Fig. 6 Frequency response of the air bearing table with active damping control.

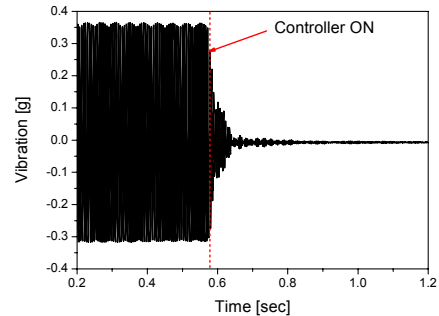


Fig. 7 Active suppression of self-excited vibration of air bearings

### 4. 결론

본 논문에서는, 능동 자기예압 공기베어링 스테이지에 대하여 1 개의 가속도계를 이용한 3 자유도의 강체 진동을 제어하는 기능을 구현하였다. 실험결과 테이블의 감쇠비를 증가시킬 수 있음을 확인할 수 있었으며, 특히 공기베어링의 자체 재생 진동을 효과적으로 제거할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 기능은 실제 적용에 있어서 운동오차 능동 앞먹임 보상 기능에 쉽게 추가될 수 있으며, 두가지 방법을 동시에 적용하는 경우, 본 스테이지의 보상영역은 정, 동적 운동오차로 넓어지게 된다.

### 참고문헌

1. 노승국, 김수현, 광윤근, 박천홍, “초정밀 직선이송계용 능동 자기예압 공기베어링에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, **25**, 6, 134-142, 2008.
2. 노승국, 김수현, 광윤근, 박천홍, “자기예압 공기베어링 스테이지의 3 자유도 운동오차 측정 및 능동보정,” 한국정밀공학회지, **26**, 2, 109-117, 2009
3. Watanabe, I., Aoyama, H. and Shimokobe, A., “A Measurement and control of straight motion accuracy using a liquid surface for absolute reference,” J. of the JSPE, **57**, 3, 128-133, 1991.