

〈논 문〉

## 공기 베어링의 능동제어에 관한 연구

이정배\* · 김경웅\*\*

(1996년 1월 10일 접수)

### A Study on the Active Control of Air Bearing

Jeong Bae Lee and Kyung Woong Kim

**Key Words:** Air Bearing (공기 베어링), Vibration Control (진동제어), Air Film (공기막), Active Control (능동제어)

#### Abstract

In this paper actively controlled air bearing is investigated to overcome the defects of air bearing such as low stiffness and damping coefficients. The actively controlled air bearing is composed of an air bearing, a gap sensor, a controller, and a piezo actuator. By controlling the position of air bearing with piezo actuator, the position of floating object is controlled. In this study the Proportional-Integral-Derivative controller is employed. Active air bearing is investigated numerically and experimentally. There is good agreement between the simulation and the experimental results. It is shown that the stiffness and damping characteristics and positioning accuracy of air bearing can be improved by means of adopting actively controlled air bearing.

#### 기 호 설 명

- $B$  : 공기막의 감쇠계수
- $h$  : 공기 베어링과 그것에 의해 지지되는 축 사이의 공기막 두께
- $M$  : 축의 질량
- $K$  : 공기막의 강성계수
- $k$  : 압전 액추에이터의 강성계수
- $K_a$  : 압전 액추에이터의 게인
- $K_d$  : 미분게인
- $K_i$  : 적분게인
- $K_p$  : 비례게인
- $K_s$  : 갭센서의 게인
- $P_s$  : 공급압력
- $T$  : 압전 액추에이터 지연시간
- $T_d$  : 미분시간지연
- $x$  : 드러스트 베어링의 변위

- $y$  : 축의 변위
- $u$  : 압전 액추에이터의 무부하시 변위

#### 1. 서 론

공기 베어링은 기체의 압축성에 의한 평균화 효과로 운전 정밀도가 우수하고 기체의 낮은 점도에 의한 효과로 마찰력과 열발생량이 매우 적으며, 사용가능 온도구간이 저온에서 고온까지 넓고, 프로세스 계통내의 기체를 윤활제로 사용할 수 있기 때문에 불순물에 의한 오염이 문제되지 않는 등의 장점이 있다. 이와 같은 특성과 더불어 공기 베어링은 지지물체를 완전히 부상시켜 운전함으로써 마찰, 마모와 온도 변화에 따른 열변형이 문제되지 않는다. 이러한 장점으로 인해서 공기 베어링은 현재 정밀기기의 미끄럼기구, 각종 측정장치의 테이블 지지기구로 많이 사용되고 있다. 반면 공기 베어링은 기체의 낮은 점성으로 인해서 부하능력이

\*한국과학기술원 기계공학과

\*\*회원, 한국과학기술원 기계공학과

작고 강성, 감쇠계수 또한 작다.

산업의 발달과 더불어 각 기기에서 필요로 하는 위치 정밀도는 점차 엄격해져서 한 예로 현재 전자 산업의 Lithograph Machine의 경우 수십 nm 정도의 값이 요구되고 있고 앞으로 그 정도는 더욱 심해질 것으로 예상된다. 따라서 기존의 공기베어링에서 공급 압력의 변동, 지지 베이스의 진동, 가공 조립 상의 오차 등으로 인한 미세 진동조차 허용치 못하는 수준에 이르렀다.

이에 대한 개선책으로 1987년 Mizumoto<sup>(1)</sup>은 부하변동에 따라 공기 베어링의 Restrictor의 개폐 정도가 수동적으로 변하도록 하여 강성을 크게 하였으나 복잡한 형상으로 가공이 힘든 단점이 있었다. 능동적 제어방법으로 1987년 Aoyama<sup>(2)</sup>는 공기 베어링의 공급 압력을 서보밸브로 제어하는 방법으로 테이블의 위치제어를 하였고, 1988년 Goto<sup>(3)</sup>은 압전 액추에이터의 미세 변형을 이용하여 고체 접촉을 통한 직접 테이블의 위치제어를 시도하여 만족스러운 결과가 얻어졌으나, 전자의 경우 공기의 압축성으로 인하여 응답속도가 비교적 느린 것이 문제점으로 지적되었고, 후자는 고체 접촉으로 인해 마찰 및 마모가 수반되는 것이 문제로 남았다. 또 1991년 Horikawa<sup>(4)</sup>는 압전 액추에이터를 이용해서 공기 베어링의 간극을 조정함으로써 위치 정밀도를 개선하였다. 그러나 전적으로 실험적으로 모델링하여 모델이 매우 복잡하였다.

본 연구의 목적은 강성과 감쇠계수가 작은 공기 베어링의 단점을 보완하기 위해 드러스트 베어링을 대상으로 능동베어링을 설계, 제작하여 그 특성을 연구하고 기초 설계 자료를 축적하는데 있다.

## 2. 능동 공기 베어링의 모델링

### 2.1 시스템 모델링

능동 공기 베어링은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 드러스트 베어링, 압전소자, 제어기, 센서로 구성되어 있다.

Fig. 2는 축과 드러스트 베어링, 압전 액추에이터를 나타낸 모델이다. 압전 액추에이터의 강성이 공기 베어링의 강성에 비해 1000배 이상 강하기 때문에 능동형 공기 베어링은 1 자유도 제로 단순하게 모델링할 수 있다. (부록 참조) 공기 베어링에 의해 지지되는 축에 대한 힘의 평형방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{Y} = K(X - Y) + B(\dot{X} - \dot{Y}) \quad (1)$$

여기서,  $M$ 은 축의 질량,  $K$ 와  $B$ 는 각각 공기막의 강성 및 감쇠계수이다. 식 (1)로부터 드러스트 베어링의 변위에 의한 축의 변위는 다음과 같다.

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{Bs + K}{Ms^2 + Bs + K} \quad (2)$$

베어링의 제어방식으로는 빠른 응답 특성과 입력에 대한 추종성을 좋게 하기 위하여 PID 제어를 채택하였다. 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_c = K_p + \frac{K_a s}{1 + T_a s} + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

여기서,  $K_p$ ,  $K_a$ ,  $K_i$ 는 각각 비례, 미분, 적분계인을 나타낸다. 그리고  $T_a$ 는 미분시간지연을 나타낸다. 파워 앰프와 압전소자의 전달함수는 다음과 같다.

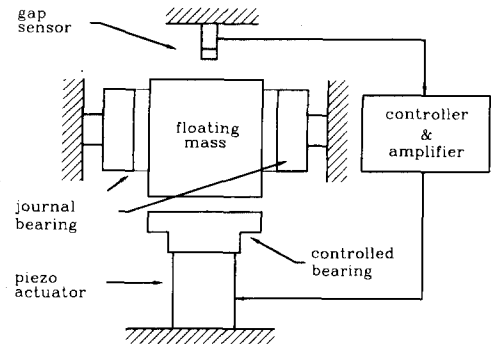


Fig. 1 Schematic diagram of an active air bearing

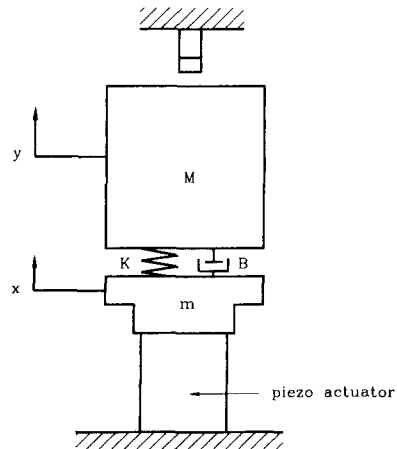


Fig. 2 Model of the active air bearing

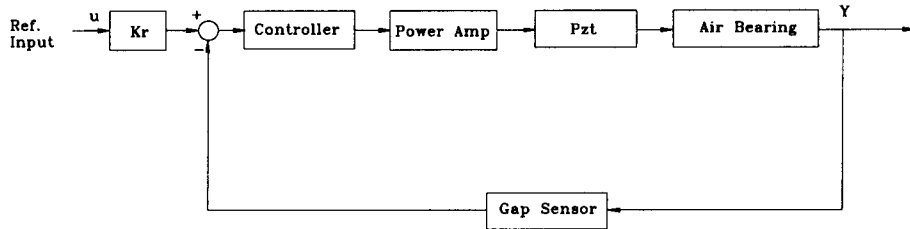


Fig. 3 Block diagram of the active air bearing

$$G_a = \frac{K_a K_e}{1 + T s} \quad (4)$$

여기서,  $K_a$ 와  $K_e$ 는 각각 파워 앰프와 압전 액추에이터의 게인이고,  $T$ 는 압전 액추에이터의 시간지연이다.

Fig. 3은 능동형 공기 베어링의 블록선도를 나타내는 그림이다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험장치

드러스트 베어링에 의해 지지되는 원통형의 축은 반경 방향으로 저널 공기 베어링에 의해 구속되어 있다. 실험에 사용된 드러스트 공기 베어링은 직경이 30 mm이고, 베어링 중심으로부터 5 mm 떨어진 위치에 직경 0.4 mm의 Inherently Compensated Restrictor 8개가 등간격으로 가공되어 있다. 그리고 축의 반경방향 움직임을 구속하기 위하여 사용된 저널 베어링은 12개의 공기 공급구를 갖는 1열 급기공 베어링으로 직경과 길이가 40 mm이다. 공기 베어링의 공기막은 일반적으로 수십  $\mu\text{m}$  두께이므로 스퀴즈효과를 통해 이를 제어하기 위해서 큰 힘을 낼 수 있고  $\mu\text{m}$ 단위의 제어가 가능한 적층형 압전 액추에이터를 베어링의 위치 제어용 구동원으로 사용하였다.

Fig. 4는 실험에 사용된 압전 액추에이터의 100 V의 전압 인가시 힘 발생량과 변형량의 관계를 나타내는 그림이다. 압전 액추에이터의 최대 변형량은 15  $\mu\text{m}$ 이고 최대 힘 발생량은 3,430 N이다. 이와 같이 압전 액추에이터의 변형량이 제한되는 관계로 실제 능동형 공기 베어링의 제어 영역은 수  $\mu\text{m}$ 으로 제약된다. 그러므로 이 점을 보완하기 위해서는 부수적으로 베어링의 공급 압력의 조절을 통한 축의 위치 조절이 필요하며, 이를 위해서는 공급 압력이 변하더라도 제어 특성에는 큰 영향이

없도록 제어를 설계하는 것이 필요하다. 제어하고자 하는 축의 위치를 측정하기 위해서는 정전 용량형의 갭센서를 사용하였다. 드러스트 베어링과 압전 액추에이터는 에폭시를 사용하여 접착하였다. 센서는 축의 축방향거리를 측정하여 그 출력 값을 제어기에 입력한다. 제어기의 출력전압은 앰프를 거쳐 압전 액추에이터에 가해 드러스트 베어링의 위치를 조정하여 축의 위치를 제어한다.

#### 3.2 실험방법

드러스트 공기 베어링의 강성, 감쇠계수는 실험에 의해 측정하였다. 베어링의 강성계수는 부하 질량을 변화시켜 그에 따른 공기막 두께의 변화를 측

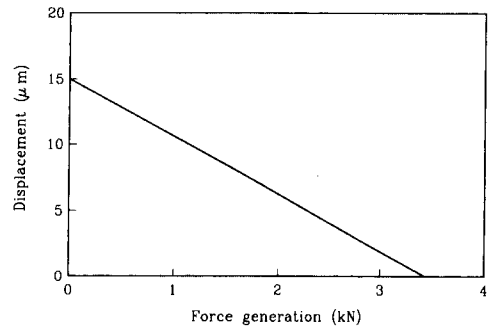


Fig. 4 Characteristics of the piezo actuator

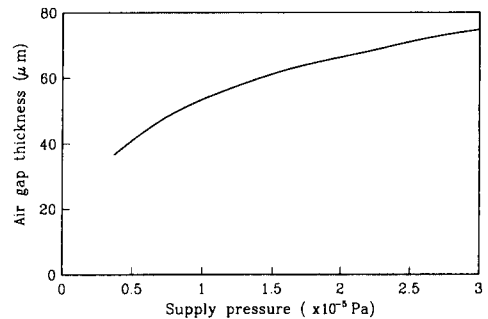


Fig. 5 Supply pressure vs. air film thickness

정하여 그로부터 계산된다. 공기 베어링의 감쇠 계수는 충격하중에 의한 진동 진폭의 대수 감쇠율(logarithmic decrement)로부터 계산된다.

Fig. 5는 본 실험에서 사용된 드러스트 베어링의 공급 압력에 따른 공기막 두께변화를 나타내고 있다. 공기막 두께는 공급 압력의 증가에 따라 증가

하며 공급 압력이 커질수록 증가율은 점차 줄어든다.

Fig. 6은 실험적으로 구한 공기 베어링의 공급 압력 변화에 따른 강성, 감쇠계수를 나타내고 있다. 공기 베어링의 강성계수와 감쇠계수는 공급 압력이 17 MPa일 때 최대값을 나타내었고, 그때의 공기막 두께는 67 $\mu$ m였다.

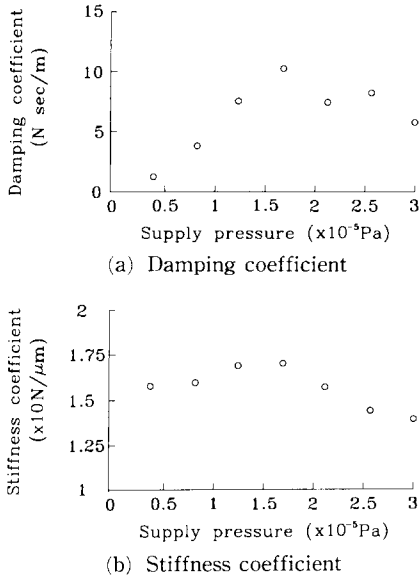


Fig. 6 Stiffness and damping coefficients of thrust air bearing

### 3.3 제어 계인의 선정

능동형 공기 베어링의 제어 계인에 대한 안정 영역은 Routh-Hurwitz 안정성 판별조건을 이용하여 구하였다.

Fig. 7은 각 공급 압력에 대해 능동형 공기 베어링의 제어 계인 변화에 따른 안정 선도이다. 적분 계인을 바꾸어 가며 비례, 미분 계인에 대한 안정 영역을 표시한 것으로 선을 기준으로 아래 부분은 불안정한 영역을 위 부분은 안정 영역을 나타낸다. 미분 계인의 증가에 의해 시스템의 안정 영역이 넓어지는 반면 적분 계인은 불안정한 영역을 넓히는 것을 알 수 있다. 그리고 능동 공기 베어링의 안정 영역은 각 공급 압력에 따라 달라지는데 이것은 공급 압력에 따라 베어링의 동특성이 달라지는 것 때문으로 그 중 베어링의 감쇠계수에 크게 영향을 받는 것을 알 수 있다. 따라서 공급 압력이 바뀔 때 따라 능동형 베어링이 불안정해 지지 않도록 제어 계인 선정시 이러한 특성이 고려되어야 한다.

능동 공기 베어링의 제어 계인은 안정성 해석 결과 얻어진 안정영역중 제어 시스템의 구동 한계 내에서 단위 계단 입력에 대한 빠른 응답 특성과 정상상태에서의 오차가 적도록 선정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

능동형 공기 베어링의 모델의 타당성과 제어에 의한 운전 정밀도의 향상 정도를 알아보기 위하여 실험을 수행하였다. 능동형 공기 베어링의 특성은 공급 압력의 미소 변동에 의한 축의 미소 진동의 제어, 기준 입력에 대한 추종 특성 등을 실험하였다. 실험은 능동형 공기 베어링을 콘크리트 베이스에 견고하게 부착한 상태에서 수행하였다.

Fig. 8은 공기막 두께가 67 $\mu$ m인 상태에서 능동형 공기 베어링의 시뮬레이션과 실험결과를 비교한 그림이다. 시각 0.01초일 때 0.7 $\mu$ m의 계단 입력을 가한 경우이다. 제어 계인의 변화에 따라 대체

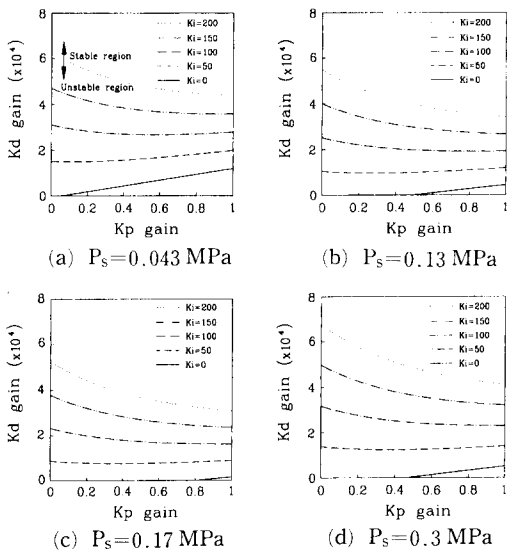


Fig. 7 Stability map of active air bearing for various supply pressure

적으로 시뮬레이션과 실험간에 유사한 경향을 보이고 있다. 실험은 Fig. 9(a)와 같이 축에 미소 진동이 존재하는 상태에서 수행된 것으로 따라서 실험 결과에는 축의 미소진동이 나타나고 있다. 그 결과 실험결과가 시뮬레이션 결과에 비하여 오버슈트가 전반적으로 크게 발생하고 있으며, 정착 시간의 비교 또한 어렵게 하고 있다. 두 경우에 있어 오버슈트 크기의 차이는 실험결과에 나타나는 축의 미소

진동의 진폭과 비슷한 정도로 나타났으며, 상대적으로 다른 경우에 비하여 불안정하여 가장 큰 잔류 진동을 보이는 Fig. 8(d)의 경우 가장 큰 차이를 보여 약 10%의 차이를 보이고 있다. 그리고 초기 변화율에서 약간의 차이가 나는 것은 주로 압전 액추에이터의 히스테리시스 비선형성을 고려하지 않은 결과로 여겨진다. 향후의 연구에서는 이에 대한 추가적인 고려가 필요하다. 능동 공기 베어링을 비례제어만 할 경우 비례 게인을 바꾸어 가며 시스템의 안정성을 관찰한 결과 게인이 0.78 이상에서는 불안정하였다.

Fig. 9는 능동 공기 베어링의 운전 정밀도를 나타낸 그림이다. 실험에 사용된 공기 베어링은 제어하지 않을 경우, 별도의 외란이 없더라도 Fig. 9(a)와 같이 150~180 nm 정도의 진폭으로 떨린다. 이러한 진동의 원인은 공기막을 통해 전달되는 베이스의 진동과 베어링에 공급되는 공기압력의 미소 변동 성분에 의한 것으로 여겨지며, 이때 진동의 주파수는 공기 베어링의 강성과 축의 질량의 조합에 대한 공진주파수였다. Fig. 9(b)는 공기 베어링의 위치를 제어한 경우에 대한 베어링의 운전 정밀도를 나타낸 것으로 진폭은 20 nm이내로 크게 줄었다. 이로서 베어링의 능동 제어를 통해 축의

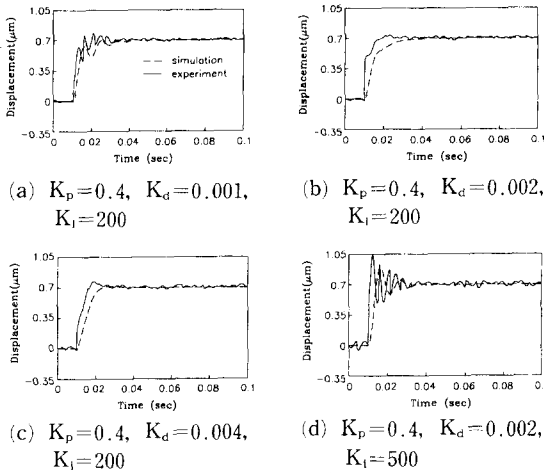


Fig. 8 Responses to step input

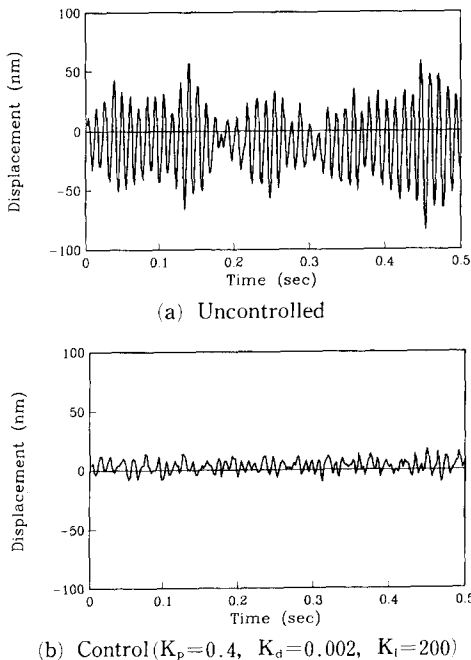


Fig. 9 Vibration displacements of the block

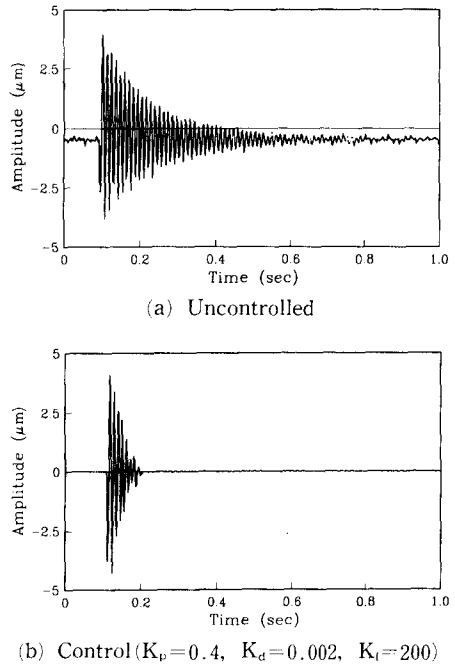


Fig. 10 Response to impulse input

미소 진동을 억제하여 운전 정밀도를 85% 이상 향상시킬 수 있다.

Fig. 10(a)은 드러스트 공기 베어링을 제어하지 않은 경우, 충격 입력에 대한 응답을 나타내는 그림이다. 공기 베어링은 감쇠 능력이 작아 잔류 진동이 오랫동안 남아있는 것을 알 수 있다. Fig. 10(b)은 능동형 공기 베어링의 충격 입력에 대한 응답을 나타내는 그림으로 이때 기준 입력은  $0\mu\text{m}$ 이다. 충격 입력에 대한 진동이 제어하지 않는 경우에 비해 5배 정도 빨리 줄어들고 있다. 이로서 능동제어를 통해 공기 베어링의 감쇠가 작은 단점을 보완할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

베어링의 위치가 제어되는 능동형 공기 베어링에 대해 시뮬레이션과 실험을 통해 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 능동형 공기 베어링을 간단한 1 자유도계 모델로 시뮬레이션하여 실험 결과와 비교적 잘 부합하는 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 공기 베어링의 능동제어를 통해 공급 압력의 미소 변동과 베이스의 진동에 의해 발생하는 축의 미소 진동을 85% 이상 억제하여 운전 정밀도를 크게 향상시킬 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 1994년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었다.

## 참고문헌

- (1) Mizumoto, H., Kubo, M., Makimoto, Y., Yoshimochi, S. and Okamura, S., 1987, "A Hydrostatically Controlled Restrictor for an Infinite Stiffness Hydrostatic Journal Bearing," *JSPE Eng.* Vol. 21, No. 1, pp. 49~54.
- (2) Aoyama, H. and Shimokobe, A., 1987, "Development of High Precision Straight Motion System," *JSPE Bull.*, Vol. 21, No. 2, pp. 113~118.
- (3) Goto, H. and Sasaoka, T., 1988, "Vertical

Micro Positioning System Using PZT Actuator," *JSPE Bull.*, Vol. 22, No. 4, pp. 277~282.

- (4) Horikawa, O., Yasuhara, K., Osada, H. and Shimokohbe, A., "Dynamic Stiffness Control of Active Air Bearing," *JSPE Int. J.*, Vol. 25, No. 1, 1991, pp. 45~50.
- (5) Horikawa, O. and Shimokohbe, A., 1990, "An Active Air Bearing," *JSPE Int. J.*, Vol. 33, No. 1, pp. 55~60.

## 부 록

Fig. 11과 같이 압전 액추에이터의 강성을 고려하여 능동 공기 베어링의 기구부를 2자유도 계로 모델링하면 힘의 평형 관계식으로부터 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$X(s) = \frac{k}{ms^2 + Bs + (K+k)} U(s) + \frac{Bs + K}{ms^2 + Bs + (K+k)} Y(s) \quad (5)$$

그리고 축의 위치와 드러스트 베어링의 위치는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$Y(s) = \frac{Bs + K}{Ms^2 + Bs + K} X(s) \quad (6)$$

위의 두 식으로부터 압전 액추에이터의 강성을 고려한 능동 공기 베어링의 전달함수는 다음과 같다.

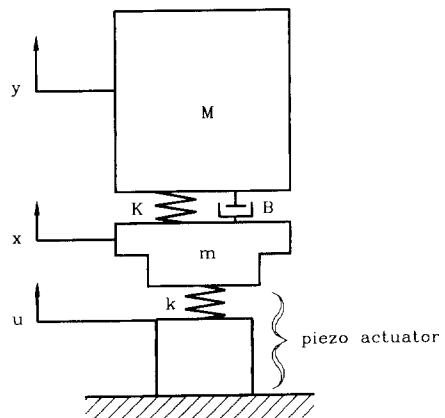


Fig. 11 2-degree of freedom model of the active air bearing

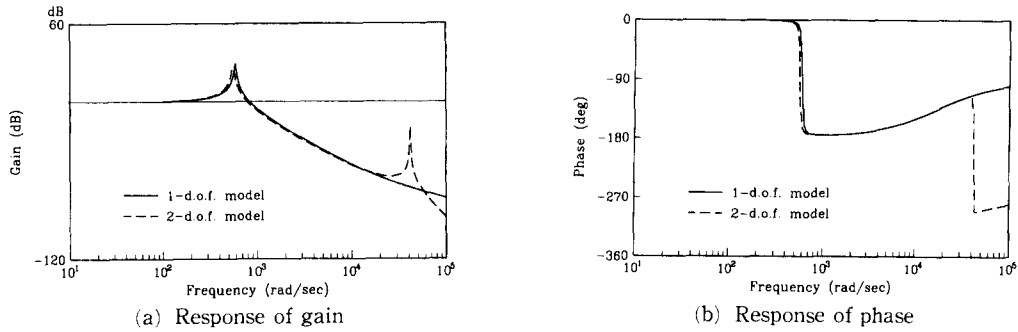


Fig. 12 Frequency response of air bearing and piezo actuator

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{(Bs+K)k}{(Ms^2+Bs+K)(ms^2+Bs+(K+k)) - (Bs+K)^2} \quad (7)$$

Fig. 12는 식 (2)의 1자유도 계로 능동 공기 베어링을 모델링한 것과 식 (7)의 2자유도 계로 모델링한 것의 주파수 응답 특성을 비교한 그림이다. 주파수가 20,000 rad/sec 미만인 구간에 있어서는 두 모델의 응답 특성 사이에 거의 차이가 없음을

알 수 있다. 공진 주파수의 경우 1자유도 모델의 경우 568 rad/sec인 반면 2자유도 모델은 558 rad/sec으로 두 모델간의 차이는 2% 미만이다. 본 연구에서는 고주파 노이즈의 차단을 목적으로 제어 영역을 12,500 rad/sec 미만의 영역으로 한정하였기 때문에 능동 공기 베어링 해석시 압전 액추에이터를 강제로 가정한 1 자유도 계 모델링을 사용하여도 충분히 타당하리라고 여겨진다.