

# 공기 베어링의 능동제어에 관한 연구

(A Study on Active Control of Air Bearing)

이정배 · 김경웅

한국과학기술원 정밀공학과

## 1. 서 론

공기베어링은 기체의 압축성에 의한 평균화 효과로 운전정밀도가 우수하고 기체의 낮은 점도에 의한 효과로 마찰력과 열발생량이 매우 적으며, 사용가능 온도구간이 저온에서 고온까지 넓고 프로세스 계통내의 기체를 윤활제로 사용할 수 있기 때문에 그 경우 불순물에 의한 오염이 문제되지 않는 장점등이 있다. 이와 같은 특성과 더불어 공기베어링은 지지물체를 완전히 부상시켜 운전하므로써 마찰·마모와 온도변화에 따른 열변형이 문제되지 않는다. 이러한 장점으로 인해서 공기베어링은 현재 정밀기기의 미끄럼면, 각종 측정장치의 테이블지지 기구로 많이 사용되고 있다. 반면 공기베어링의 단점으로는 기체의 낮은 점성계수로 인해서 부하능력이 적고 강성, 감쇄계수 또한 적다. 그리고 기체의 압축성으로 인해 뉴메틱 헤머라는 불안정 현상이 생기기도 한다.

산업의 발달과 더불어 각 기기에서 필요로 하는 위치 정밀도는 점차 엄격해져서 한 예로 현재 전자산업의 Lithograph Machine의 경우 수십 nm정도의 값이 요구되고 앞으로 그 정도는 더욱 심해 질 것으로 예상된다. 이로써 기존의 공기베어링에서 공급압력의 변동, 지지베이스의 진동, 가공·조립상의 오차등으로 인한 미세진동조차 허용치 못하는 수준에 이르렀다.

이에 대한 개선책으로 1987년 Mizumoto[1]는 부하변동에 따라 공기베어링의 Restrictor의 개폐정도가 수동적으로 변하도록 하여 강성을 크게 하였으나 복잡한 형상으로 가공이 힘든 단점이 있었다. 능동적 제어 방법으로 1987년 Aoyama[2]는 공기베어링의 공급압력을 서보밸브로 제어하는 방법으로 테이블의 위치 제어를 하였고, 1988년 Goto[3]는 압전 액추에이터의 미세 변형으로 고체접촉을 통한 직접 테이블의 위치제어를 시도하여 만족스러운 결과가 얻어졌으나 전자의 경우 공기의 압축성으로 인하여 응답속도가 비교적 느린 것이 문제점으로 지적되었고 후자는 고체접촉으로 인해 마찰 및 마모가 수반되는 것이 과제로 남았다. 또 1991년 Horikawa[4]는 압전액추에이터를 이용해서 공기베어링의 간극을 조정함으로써 위치정밀도를 개선하였으나, 공급압력의 미소변동분만을 외란으로 하여 제어 구간이 매우 좁은 결점이 있었다.

본 연구에서는 스퀴즈 효과를 이용한 능동 공기베어링을 설계, 제작하여 실험하였다. 본 연구의 목적은 강성과 감쇄 계수가 작은 공기베어링의 단점을 보완하기 위해 드러스트베어링을 대상으로 능동베어링을 설계, 제작하여 그 특성을 연구하고 기초 설계자료를 축적하는데 있다.

## 2. 실험장치

공기베어링은 그림1에 나타낸 바와 같이

드러스트 베어링, 압전소자, 제어기, 센서부로 구성되어 있다. 원통형의 스틸 블럭은 반경방향으로는 저어널베어링에 의해 구속되어 있다. 블럭의 위치는 갭 센서에 의해 측정되어 갭 센서출력에 대응하는 전압을 압전액추에이터에 가함으로써 능동베어링의 공기막 간격을 조정하여 그로인한 스퀴즈 효과로 부하 질량의 위치를 제어한다.

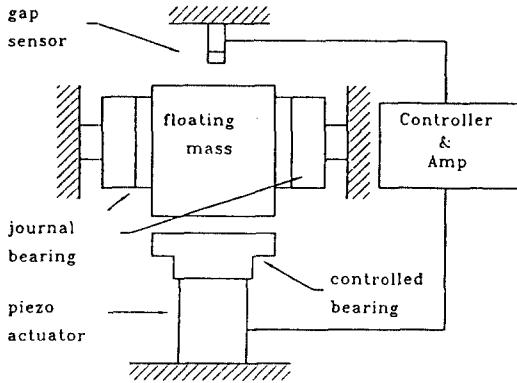


그림1 능동 공기베어링의 구성

### 2.1 드러스트공기베어링

드러스트 공기베어링의 강성, 감쇄계수는 실험에 의해 측정하였다. 베어링의 강성계수는 부하질량을 변화시켜 그에 따른 공기막 두께의 변화로부터 계산된다. 공기베어링의 감쇄계수는 충격하중에 의한 진동 진폭의 대수감쇠율(Logarithmic Decrement)로부터 계산한다.

### 2.2 압전 소자

공기베어링의 공기막은 일반적으로 수십  $\mu$ m 두께이므로 스퀴즈효과를 통해 이를 제어하기 위해서  $\mu$ m단위의 제어가 가능한 구동원으로 적층형 압전액추에이터를 사용하였다. 압전액추에이터는 기계적으로는 탄성체로 모델링할 수 있다.

### 2.3 센서

제어하고자 하는 블럭의 위치를 측정하기 위해서는 와전류 방식의 갭센서를 사용하였다. 사용된 갭센서는 최대 1.5mm의 측정거리를 갖고 분해능은 0.5 $\mu$ m이며 게인은 5000V/m이다. 센서는 저어널 베어링의 하우징에 설치하였고 블럭의 측방향 거리를 측정하여 그 출력값을 제어기에 입력한다.

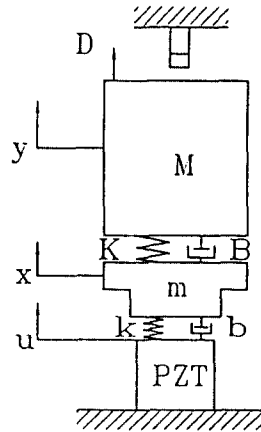


그림2 능동 공기베어링의 모델링

## 3. 능동 공기베어링의 모델링

그림 2는 블럭과 드러스트베어링, 압전액추에이터를 나타낸 모델이다.공기베어링에 의해 지지되는 블럭과 드러스트 베어링에 대한 균형위치에서의 힘평형 방정식은 각각 다음과 같다.

$$M\ddot{y} = K(x - y) + B(\dot{x} - \dot{y}) \quad (3-1)$$

$$m\ddot{x} = k(u - x) + b(\dot{u} - \dot{x}) + K(y - x) + B(\dot{y} - \dot{x}) \quad (3-2)$$

여기서 M은 블럭의 질량을 K,B는 각각 공기막의 강성·감쇄계수를 그리고 k,b는 각각 압전액추에이터의 강성·감쇄계수를 나타내고 m은 드러스트베어링의 질량이다. (3-1)로부터 드러스트 베어링의 변위에 의한 부하블럭의 변위는

$$\frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{BS + K}{mS^2 + BS + K} \quad (3-3)$$

(3-2)로 부터 압전소자에 하중이 걸리지 않을 때의 인가 전압에 대한 변위량 U와 부하블럭의 위치에 의한 드러스트 베어링의 변위는 다음 식으로 주어진다.

$$X(S) = \frac{bS + k}{mS^2 + (B+b)S + (K+k)} U(S) + \frac{BS + K}{mS^2 + (B+b)S + (K+k)} Y(S) \quad (3-4)$$

제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_c = K_p + \frac{K_a S}{1 + T_a S} + \frac{K_i}{S} \quad (3-5)$$

여기서  $K_p, K_d, K_i$ 는 각각 비례·미분·적분계 이율을 나타낸다. 파워 앰프와 압전소자의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_a = \frac{K_a K_e}{1 + T_S} \quad (3-6)$$

여기서  $K_a$ 와  $K_e$ 는 각각 파워앰프와 압전액 추에이터의 게인이다.

압전소자에 하중이 걸리지 않을 때의 인가 전압에 대한 변위량 U에 의해 부하블럭에 가해지는 힘을 나타내는 전달 함수는 다음과 같다.

$$G_1 = \frac{(BS + K)(bS + k)}{mS^2 + (B + b)S + (K+k)} \quad (3-7)$$

또 부하블럭에 가해지는 힘에 대한 부하블럭의 전달 함수는 다음과 같다.

$$G_2 = \frac{mS^2 + (B + b)S + (K + k)}{[mS^2 + (B+b)S + (K+k)][mS^2 + BS + K] - (BS + K)^2} \quad (3-8)$$

$K_s$ 는 겹센서의 게인을 나타낸다.

### 3.2 제어계인의 선정

전체 시스템의 폐루프 전달함수는 전절의 각 구성요소의 전달함수로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{Y(S)}{U(S)} = \frac{G_c \cdot G_a \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot K_s}{1 + G_c \cdot G_a \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot K_s} \quad (3-9)$$

특성방정식은

$D(S) = 1 + G_c \cdot G_a \cdot G_1 \cdot G_2 \cdot K_s$  이므로 이를 Routh 판별법을 사용하여 제어기의 안정 영역을 계산하였다. 능동공기베어링의 제어계인은 안정성해석결과 얻어진 안정영역중 단위 계단입력에 대한 빠른 응답특성과 정상상태에서의 오차를 작게하도록 선정하였다.

## 4. 실험

공기베어링의 능동제어는 우선 베어링이 최대 강성을 갖는 공기막 두께를 갖도록 공급압력을 가한 상태에서 하였다. 공기베어링의 경우 그 위치에서 강성의 변화율이 가장 작고 또 빠른 응답 특성을 기대 할수 있기 때문이다. 그림3 은 기준위치로부터  $3\mu\text{m}$ 의 위치에러를 제어할때의 응답특성을 측정 한 것이다. 그림의  $0\mu\text{m}$ 가 기준위치를 나타낸다. 제어에 의해 위치에러가  $0.2\mu\text{m}$ 이내로 줄어들음을 알수있다.

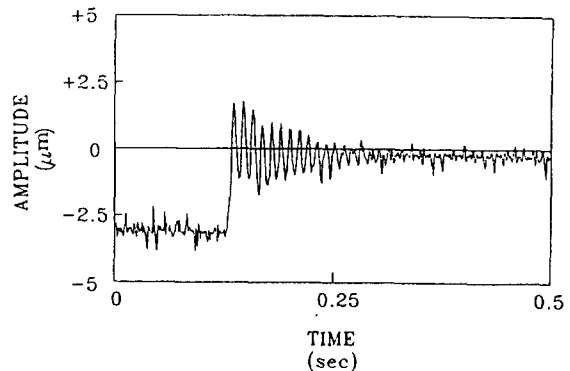
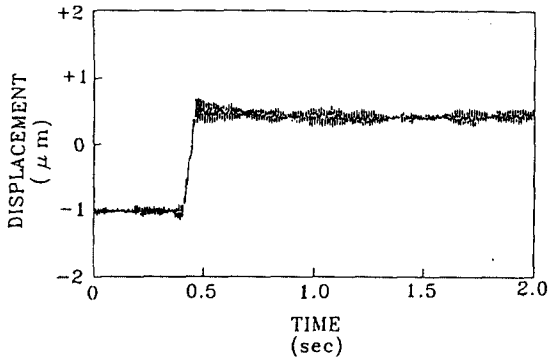


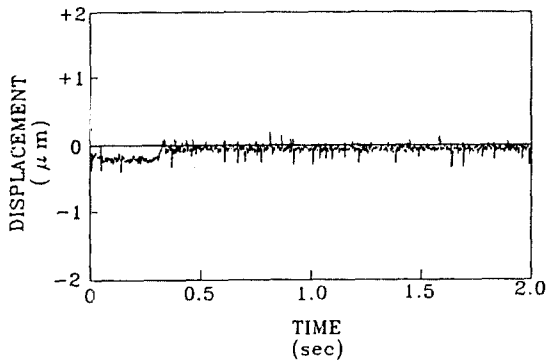
그림3 계단입력에 대한 응답

공기베어링의 정적강성이 제어에 의해 향상된 정도를 실험하기 위해서 부하 블럭에 추를 얹은후 제거하여 부하의 변동에 따른 블럭의 변위를 측정하였다. 그림4 는 정적 부하변동에 따른 블럭의 변위를 나타낸다. 제어를 하지않

을 경우 1.4 $\mu\text{m}$ 의 변위가 발생한 반면 제어시 변위는 0.1 $\mu\text{m}$ 정도로 감소하였다.



(a) 제어전



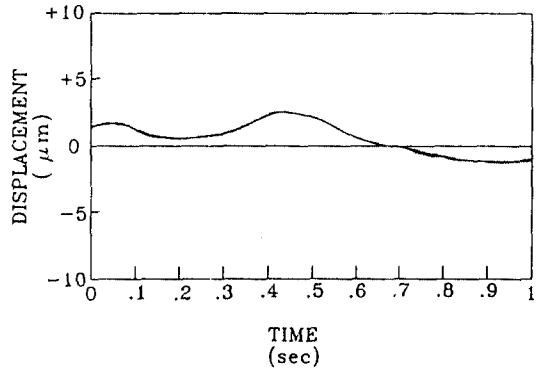
(b) 제어

그림4 정적 하중변동에 의한 변위

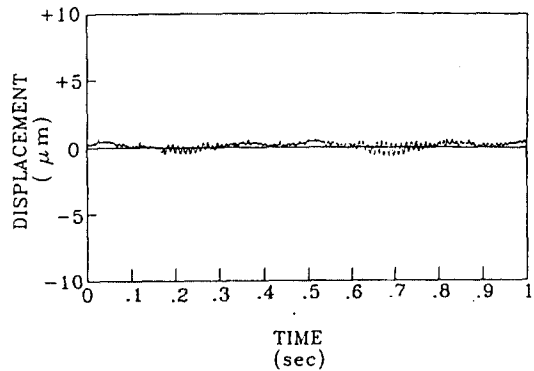
이로서 제어에 의하여 베어링의 정적강성이 10배가량 증가했음을 알수있다.

블럭은 한쪽단에 블레이드가 가공되어 있어 노즐을 통해 압축공기를 분사하여 회전이 가능하다. 블럭은 회전시 그림5 (a)에서 보는 바와 같이  $\pm 3\mu\text{m}$ 정도로 흔들린다. 이것은 드러스트베어링과 저어널베어링간의 수직도를 못맞추는 등의 조립 실수와 가공오차등에 기인하는 것으로 여겨진다. 이에 대해 제어를 할경우 그림5 (b)에 나타난 바와같이  $\pm 1\mu\text{m}$ 이내로 제어됨을 알수있다. 제어시 블럭의 회전속도를 높여가며 관찰한 결과 450rpm까지는  $\pm 2\mu\text{m}$ 이

내로 제어되었으나 600rpm이상의 속도에서는 제어전과 비슷한 진폭으로 진동하였다. 그림6은 200rpm으로 회전할때 제어전,후를 비교한 것이다.



(a) 제어전



(b) 제어

그림5 블럭회전시 특성 (100rpm)

## 5. 결 론

본 논문에서는 능동형 공기베어링을 제작하여 실험하였다. 공기베어링의 제어로 다음과 같은 결과를 얻었다.

제어시 블럭은 기준 위치에서 0.5 $\mu\text{m}$ 이내로 제어되었다. 능동 공기베어링은 수동의 공기베어링에 비해 강성이 증가하였다. 그리고 능동형 공기베어링은 정적부하의 변동, 공급압력의

변동등의 외력에 대해 일반 공기 베어링에 비해 위치정밀도가 개선되었다.

< 참고문헌 >

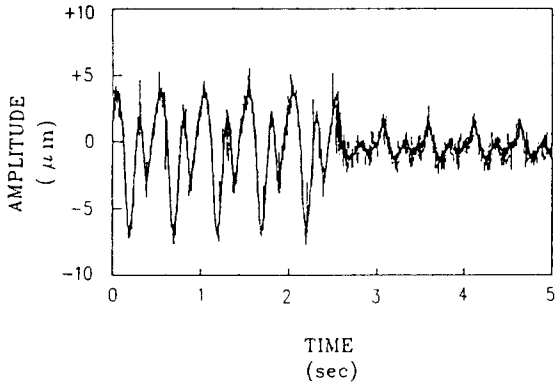


그림6 블럭회전시 특성 (200rpm)

기호 및 약호 설명

- B : 공기베어링의 공기막의 감쇄계수
- b : 압전액추에이터의 감쇄계수
- M : 공기베어링에 의해 지지되는 블럭의 질량
- m : 드러스트 공기베어링의 질량
- K : 공기베어링의 공기막의 강성계수
- k : 압전액추에이터의 강성계수
- Ka : 압전액추에이터의 게인
- Kd : 미분 게인
- Ke : 파워앰프의 게인
- Ki : 적분 게인
- Kp : 비례 게인
- Ks : 겹센서의 게인
- T : 압전액추에이터 지연시간
- Td : 미분 지연시간
- u : 압전액추에이터의 무부하시 변위
- X : 드러스트 베어링의 변위
- Y : 블럭의 변위
- δ : 대수 감쇠율
- ζ : 감쇄비

- [1] H. Mizumoto, M. Kubo, Y. Makimoto, S. Yoshimochi, S. Okamura, "A Hydrostatically Controlled Restrictor for an Infinite Stiffness Hydrostatic Journal Bearing", JSPE Eng. Vol.21, No.1, 1987, pp. 49 - 54
- [2] H. Aoyama, A. Shimokobe, "Development of High Precision Straight Motion System", JSPE Bull., Vol.21, No.2, 1987, pp. 113 - 118
- [3] H. Goto, T. Sasaoka, "Vertical Micro Positioning System Using PZT Actuator", JSPE Bull., Vol.22, No.4, 1988, pp 277 - 282
- [4] O. Horikawa, K. Yasuhara, H. Osada, A. Shimokohbe, "Dynamic Stiffness Control of Active Air Bearing", JSPE int.J., Vol.25, No1, 1991, pp 45 - 50
- [5] O. Horikawa, A. Shimokohbe, "An Active Air Bearing", JSPE Int.J., Vol.33, No.1, 1990, pp 55 - 60