

# 공기 주축 고강성화를 위한 스러스트 베어링의 에어포켓 설계에 관한 연구

한영칠<sup>†</sup>·이채문<sup>\*</sup>·이득우<sup>\*\*</sup>·안대균<sup>\*\*\*</sup>

## Study on air pocket design of thrust bearing for high-stiffness air spindle

Young chil Han, Chae moon Lee won Kim,  
Deug woo Lee and Dae geun An

**Key Words:** Air spindle, high-stiffness air bearing, Inherent orifice grooved thrust bearing,

### Abstract

This paper investigates the characteristics of stiffness and load in the thrust bearing of spindle which could be changeable according to the groove shape of inlet, in order to design a high-stiffness air bearing by selecting a optimal groove shape.

In experiments, dead weight and displacement sensor are used to measure the load carrying capacity and the stiffness respectively. Various shapes and different depth of groove of self-restrictor are used as experimental conditions. Comparative study between the theoretical value and the practical one by measuring the value of stiffness and load of the thrust bearing is performed.

### 기호설명

$\Gamma_s$  : 급기계수

$W$  : 부하지지능력 (kg)

$\overline{W}$  : 무차원부하지지능력

$k_s$  : 베어링 강성 (kg/ $\mu\text{m}$ )

$\overline{k_s}$  : 무차원강성계수

$n$  : 급기공수

$p_s$  : 급기압력 (6.033kg/cm<sup>2</sup>)

$p_a$  : 절대압력 (1.033kg/cm<sup>2</sup>)

$\mu$  : 기체점성계수 (1.833 $\times 10^{-10}$ kg · sec/cm<sup>2</sup>)

$d$  : 급기공의 직경 (10<sup>-4</sup>cm)

$\mathcal{H}$  : 기체상수 (cm/K)

$T_o$  : 급기온도(K)

$R_o$  : 스러스트 베어링의 외경 (cm)

$R_i$  : 스러스트 베어링의 내경(cm)

$g$  : 중력가속도 (cm/sec<sup>2</sup>)

<sup>†</sup> 책임저자의 소속 : 부산대학교 정밀기계대학원

<sup>\*</sup> 부산대학교 정밀기계대학원

<sup>\*\*</sup> 교신저자의 소속 : 부산대학교 ERC/NSDM

E-mail : [dwoolee@pusan.ac.kr](mailto:dwoolee@pusan.ac.kr)

TEL : (051)510-2465 FAX : (051)514-2982

<sup>\*\*\*</sup> 부산대학교 기계공학부

<sup>\*\*\*\*</sup> 한국공작기계주식회사

### 1. 서 론

공작기계의 고속화를 위한 고속주축시스템에 관한 연구는 구동부분과 베어링부분으로 나누어 볼 수 있다. 주축 구동부분에 관련된 것으로는 모터내장형 주축이 고속주축에 적용되고 있는데,

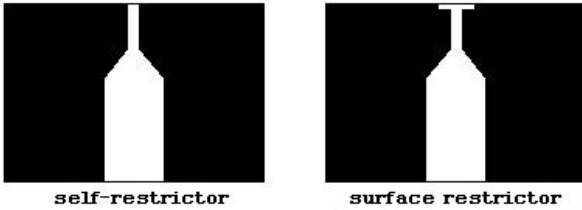


Fig 1. Restrictor pattern

모터내장형 주축은 구조가 간단하고 일반 공작기계에서 문제가 되는 외부구동에 따른 벨트 및 풀리 등에 의한 진동 및 마찰손실 등에 이점이 있으므로 고속특성에 유리하다는 장점을 가지고 있다.

주축시스템의 지지베어링 부분에 관해서도 많은 연구가 이루어지고 있는데, 현재까지 중속, 고출력 주축시스템의 경우 볼베어링이 사용되고 있고, 고속, 고정도의 주축시스템의 경우 공기베어링이 주로 이용되고 있다. 일반적으로 공기베어링은 우수한 회전 정밀도와 낮은 발열특성 때문에 초정밀, 초고속기계 요소로서 광범위에 응용되고 있다. 공기베어링 주축시스템은 이미 1960년대부터 선진국에서 활발히 연구되었으며 현재에는 상품화되어 초정밀 공작기계 및 측정 기기 등에 활용되고 있다. 특히 선진국인 미국, 일본 등에서는 이미 용도에 따라 치수와 형상을 표준화한 공기 주축 유니트가 개발, 채용되어 고부가가치를 창출하고 있다.

공기베어링 주축에 있어서 하나의 문제점은 부하지지능력 및 강성에 있어 다른 종류의 베어링에 비해 낮은 것이 결점으로 공기베어링 고강성에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.[1,2] 공기베어링의 고강성화를 위한 하나의 방법으로는 보상 요소의 변경으로 얻어질 수 있으며 능동형 보상 기구의 채용 등이 이루어지고 있다.

공기베어링에 사용되는 대표적인 보상요소로는 자성보상(Self-restrictor),표면보상(Surface restrictor), 다공질보상(Porous restrictor) 등이 있다. Fig.1은 자성보상과 표면보상요소를 보여주고 있다.

본 논문의 목적은 자성보상(self-restrictor)형과 표면보상형의 급기부 홈 깊이를 달리하여 제작된 스러스트 공기베어링의 각 조건에 따른 강성 변화를 연구하여 고강성 스러스트 베어링의 설계 자료를 축적하는데 있다.

## 2. 시스템 설계

현재 공작기계의 고속 주축에 쓰이고 있는 정압 공기 베어링은 압축공기를 공급함으로써 축과 베어링 사이에 5~ 10 μm (air film)를 형성시켜 축을 지지해 주는 구조를 이루며 공기막에 의해서 부품정밀도의 평균화 효과로서 고정밀도를 얻을 수 있다. 또한 부하지지능력을 얻기 위해서는 기름 윤활의 경우보다 매우 얇은 윤활막을 요구하게 된다. 이러한 얇은 윤활막을 얻기 위해서 가공상의 오차가 매우 작아야 하며 표면 조도와 열적, 조립상태 등에도 크게 영향을 받으며, 공기막의 작은 감쇠특성으로 인해 공진 속도나 고속불안정상 상태에서 저널을 지지해 줄 수 있는 충분한 감쇠력을 생성할 수 없기 때문에 공기베어링을 채용하는 시스템의 엄밀한 동특성 해석이 필요하다.

일반적인 스러스트 베어링의 급기구 설계에서 위치는 베어링 외경의 2/3, 1/3, 1/2 지점 혹은  $\sqrt{R_o \cdot R_i}$  지점 등이다[4]. 또한 베어링의 급기공 개수는 8~ 20이다. 본 연구에서는  $\sqrt{R_o \cdot R_i}$  지점 및 급기공수 12를 채택하였다.

그 외 공기 주축의 설계 및 베어링의 설계에 중요한 인자로는 충분한 유량의 공급과 급기된 공기가 원활히 배출되도록 하는데 있다.

## 3. 실험 장치 및 실험방법

### 3.1 베어링의 강성과 부하하중 계산

공기베어링 강성 및 부하하중은 J.W. Lund의 MTI설계도표[3]에서 급기압력(6.033kg/cm<sup>2</sup>)과 절대압력(1.033kg/cm<sup>2</sup>) 비가 6일 때, 그래프에서 무차원강성계수의 최대값을 구한다.

$$\Gamma_s = \frac{6\mu nd\sqrt{gRT_o}}{p_s h^2} \tag{1}$$

$$h^2 = \frac{6\mu nd\sqrt{gRT_o}}{p_s \Gamma_s} \tag{2}$$

$$\bar{k}_s = \frac{hk_s}{\pi(R_o^2 - R_i^2)(p_s - p_a)} \quad (3)$$

$$k_s = \frac{1}{h}\pi(R_o^2 - R_i^2)(p_s - p_a)\bar{k}_s \quad (4)$$

$$\bar{W} = \frac{W}{\pi(R_o^2 - R_i^2)(p_s - p_a)} \quad (5)$$

식(1)에서 간격(clearance) h에 대해서 이항하여 전개하면 식(2)에서 간격(h)을 구할 수 있다.

MTI설계도표에서 급기계수  $\Gamma_s$ 가 1일 때 무차원 강성계수가 최대의 값을 가진다. 식(3)에서 강성( $k_s$ )에 대해서 전개하여 식(2)에서 구한 간격(h) 값을 식(4)에 대입하여 그 값을 구한다.

베어링 부하하중은 식(5)을 이용하여 계산한다.

MTI설계도표에서 급기계수  $\Gamma_s=1$ 일때 무차원부하능력값을 구해서 식(5)를 부하하중(W)에 대해서 전개하여 무차원부하능력을 값을 대입하여 부하하중 값을 구한다.

### 3.2 실험장치 구성

그림 2는 실험장치의 구성도이다.

스러스트 베어링은 가공의 용이성을 고려하여 AL7075 재질로, 직경 100mm, 내경 50mm로 가공하였다. 급기구의 위치는 2/3지점, 급기구 홀의 직경은  $\phi$  0.3로 제작하였다.

스러스트 베어링의 가공은 5축고속가공기(MICRON-UCP 710)를 사용하였다. 최대 주축의 회전수는 42,000rpm, 위치결정정밀도는 1 $\mu$ m이다.

스러스트 베어링의 홈 형상은 폭 0.5mm 깊이를 0, 10, 13, 16, 19 $\mu$ m로 가공하였다.

공기 공급 장치는 두께 30mm, 폭 8mm의 홈을 가공하고 4방향에서 공기를 공급하였다.

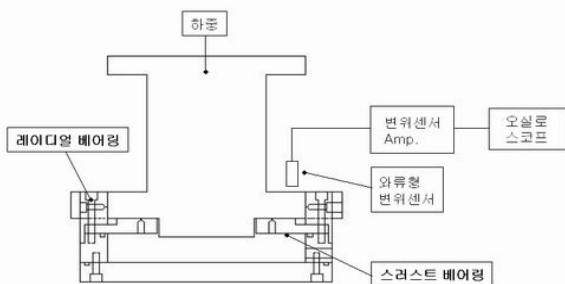


Fig 2. Experimental Setup



Fig 3. Thrust bearing and System

또한 공기의 원활한 배출을 위하여 스러스트 베어링 아랫단 고정부에 배출구를 하였다.

그림 3은 제작된 홈 깊이 10 $\mu$ m 스러스트 베어링이다. 공기의 배출을 원활히 하기 위해서 폭 4.5mm, 깊이 3.5로 홈을 가공하였다.

그리고 레이디얼 방향으로도 4개의 배출구를 가공하였다..

레이디얼 베어링은 스러스트 베어링과 에어 공급부를 체결할 수 있도록 제작하였으며, 레이디얼 방향으로의 하중 편심을 방지하도록 레이디얼 베어링의 중간 부분에 12개의  $\phi$  0.3 홀을 가공하였다.

스러스트 베어링의 급기부를 원주방향으로 고무 오링으로 공기의 유출을 막도록 하였다.

하중의 변화에 따른 유막의 두께를 측정하기 위해서 변위센서를 설치하였다. 변위센서는 변환기를 거쳐 오실로스코프로 데이터를 획득하였다.

변위센서를 하중의 양방향에 설치하여 각각의 변위를 측정하였다.

컴퓨터에서 나온 공기는 에어 드라이어(Air dryer)에서 수분을 제거하고, 공기압은 6기압으로 일정하게 공급하였다

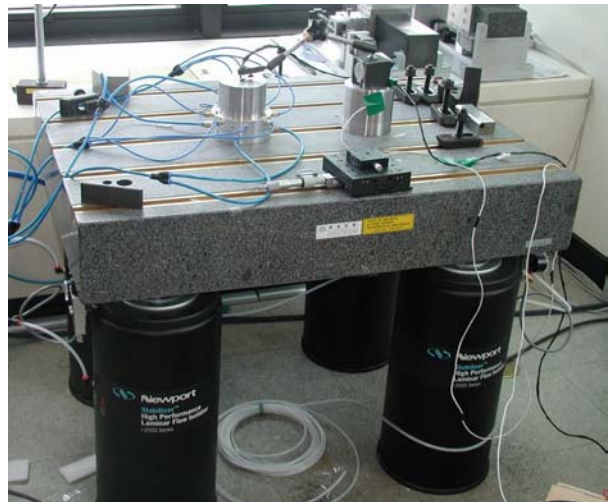


Fig 4. Vibration control system

진동에 의한 외란을 최소화시키기 위해서 그림 4와 같이 방진테이블을 이용하였다.

### 3.3 실험방법

하중의 무게는 13kg에서 40kg까지 7kg씩 증가시켜 하중에 따른 유막 두께를 측정하였다. 실험 장치위에 하중을 올리고 측정 부위에서 1mm 떨어진 지점에 변위 센서를 위치시켰다. 공기를 공급하고 부양된 유막 두께를 측정하고 부양된 상태에서 7kg의 하중을 가중시켰다. 최고 40kg까지 가중시켜 그 때의 각각의 변위를 측정하였다.

변위의 데이터는 하중을 가중하고 난 후 유막의 두께가 안정화하면 측정하였다.

스러스트 베어링의 강성 측정은 하중에 따른 유막의 두께로 값을 구하였다. 즉 하중의 변위에 유막의 변위를 나누어 강성 값을 비교하였다.

부하하중은 일정한 유막두께에서 각 하중의 값들을 비교하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

그림 5는 베어링에 하중을 가하여 얻어진 스러스트 베어링과 패드 사이의 간격을 나타낸 것이다. 샘플링 타임은 5초, 초기신호에서 필터링을 거친 것이다.

그림 6은 시편의 하중에 따른 패드와의 간격을 나타낸 것이다. 6kg에서 30kg까지 하중을 가중시킬 때의 유막 두께의 경향을 나타낸 것이다.

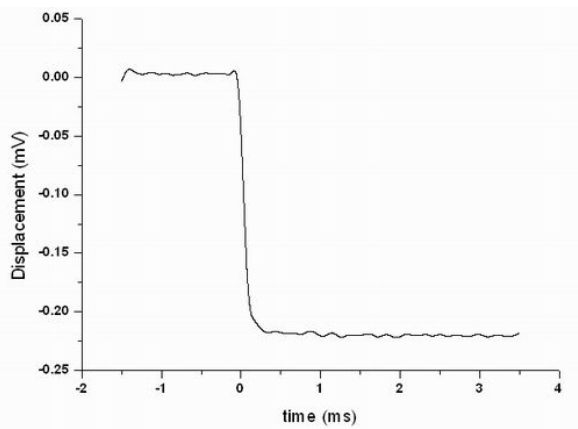


Fig 5. Displacement of Clearance

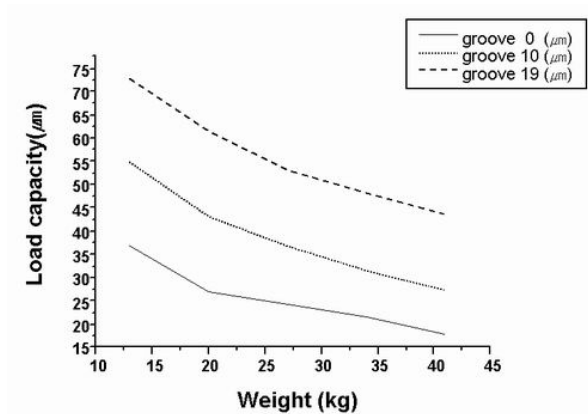


Fig 6. film thickness

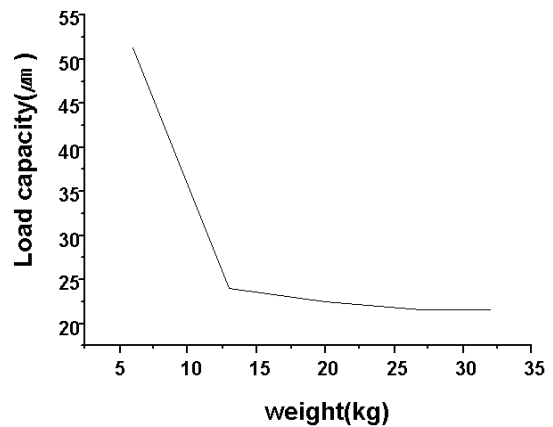


Fig 7. Trend of film thickness

막 두께가 급격히 떨어지는 구간에서의 베어링 강성값은 무시하여도 된다.

그림 7은 13kg에서 40kg까지 하중을 부가하여 이때의 유막두께를 구한 그래프이다. 베어링의 홈 깊이가 0, 10, 19μm로 홈의 깊이가 깊어질수록 스러스트 베어링의 부하지지하중이 증가되는 것을 알 수 있었다.

그러므로 공기베어링의 보상형식에 따른 부하지지능력은 자정보상에 비해 표면보상이 우수함을 알 수 있으며 표면보상에 있어서도 그루브의 깊이가 깊을수록 우수한 특성을 나타내었다. 스러스트베어링의 설계시에 부하지지능력을 향상시키기 위해서는 Air Hammer현상이 발생하지 않는 범위에서 그루브의 깊이를 깊게 하는 것이 유리한 것으로 보인다.

## 4. 결 론

자성보상형과 표면보상형의 급기부 홈 깊이를 달리하여 제작된 스러스트 공기베어링의 각 조건에 따른 부하지지능력에 대한 실험을 수행한 결과 부하지지능력은 자성보상에 비해 표면보상이 우수함을 알 수 있으며 표면보상에 있어서도 그 루브의 깊이가 깊을수록 우수한 특성을 얻었다. 연구결과는 스러스트베어링의 고강성화 설계에 자료로 활용이 기대된다.

## 후 기

산업자원부 중기거점사업의 지원을 받아 연구된 결과로 관계자의 노고에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] K, Czolzynski, "How To obtain stiffness and damping coefficients of gas bearings", Wear vol. 0, pp.265 ~ 275, 1996
- [2] L. Brzeski, Z. Kazimierski, T. Lech, "Experimental investigations oh precision spindles equipped with high stiffness gas journal bearings" Precision Engimeering Vol. 23, pp.155 ~ 163, 1999
- [3] Dr. h. s. cheng, "Hydorstatic thrust bearings", Design of gas bearing Vol 1, pp.5.3.1~5.3.20,1967
- [4] Mohamed Fourka, Marc Bonis "Comparison between externally pressurized gs thrust bearings with different orifice and porous feeding systems" wear 210, pp.311~317, 1997