

3축 마이크로 공작기계용 자기예압 공기베어링 스테이지의 정, 동적 특성

노승국*, Kornel F. Ehmann⁺, Hyung-Suk Yoon⁺, 박종권

Static and Dynamic Characteristics of Magnetically Preloaded Air Bearing Stage for a 3-Axis Micro-Machine Tool

Seung-Kook Ro*, Kornel F. Ehmann⁺, Hyung-Suk Yoon⁺, Jong-Kweon.Park

Abstract

In this paper, the static and dynamic stiffness of the air bearing stage for micro-machine tool are examined experimentally. For stiffness and precision concerns, air bearing stages are adapted for 3-axis micro-milling machine which is size of 200x200 mm². The air bearings in the stage are preloaded by permanent magnets to achieve desired bearing clearance and stiffness for vertical direction. As the stiffness of the air bearing is primary interests, static stiffness test were performed on XY stage in Z direction and Z column in Y direction. Dynamic test were performed on XY stage and Z column, respectively. Both static and dynamic tests were performed in different air pressure conditions. The vertical stiffness of XY stage is about 9 N/ μ m where Y stiffness of Z column is much smaller as 1 N/ μ m because of the large moment generated by Y force on the column.

Key Words : Micro machine tool, Air bearing Stage, Magnetically preloaded air bearing, Stiffness, Natural frequency

1. 서론

최근 IT, BT, NT, ST 등 신산업이 등장하면서 이를 구성하는 Micro/Meso 크기의 핵심 기계부품을 생산하기 위하여, 공간, 자원, 에너지, 유연성, 가반성 등의 효율화를 도모하기 위한 초소형 생산시스템인 μ -Factory 개념에 대한 관심이 고조되고 있다. 이미 1990년대에 연구를 시작한 일본과 유럽, 미국 등에서는 나노기술과 Macro 기술을 이어줄

연결 고리로 Micro manufacturing에 대한 연구 개발을 꾸준히 진행하고 있다. 특히, 미세 부품의 기계가공을 위한 마이크로 공작기계의 개발이 진행되고 있으며, 연구초기의 초소형화에 중점을 두었던 것에서 가공정밀도와 기계강성 등을 고려한 가공기 개발로 발전하고 있는 상황이다. 이미 일본에서는 초소형 선반 및 밀링 모듈 등을 이용한 마이크로팩토리 시스템을 개발한 바 있으며, 이에 관련된 마이크로 생산기계의 상용화가 진행 중이다.

* 주저자, 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부 (cniz@kimm.re.kr)

주소: 305-343 대전광역시 유성구 장동171

+ Mechanical Eng., Northwestern Univ., USA

독일을 비롯한 유럽에서도 다양한 초소형 공작기계가 개발되고 있으며, 미국에서도 이러한 마이크로 가공시스템 기술의 중요성을 인식하여 수년전부터 초소형 밀링 머신 등의 연구가 이루어진 바 있다.

마이크로 공작기계의 개발에 있어서, 가공 정밀도를 생각할 때에, 기계의 강성이 매우 중요한 요소로 대두된다. 특히, 기계의 크기가 초소형화 되는 경우, 구조물의 강성은 물론 이송계와 스피ndl을 지지하는 베어링의 강성이 상대적으로 작게 되며, 이로 인한 가공 정밀도의 손실이 발생할 가능성이 있다. 따라서 이송계의 강성과 정밀도를 최대화하기 위하여 공기베어링을 적용하여 강성을 키우고 마찰을 최소화할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 공기베어링을 이용한 마이크로 밀링 머신의 테이블의 정적인 강성 및 전달함수 측정을 통하여 자기예압을 이용한 공기베어링의 특성을 검토하고, 가공에 적합한 정, 동적 특성을 검증하였다.

2. 공기베어링을 이용한 Micro Milling Machine

2.1 Micro Machine Tool 개요

본 연구에서 해석한 3축 마이크로 밀링 머신은 Fig. 1과 같으며 제작된 시스템의 사진은 Fig. 2와 같다. 각각 3개의 동일한 공기베어링 이송계가 사용되었으며, 수평 XY 축의 경우 2개의 수평축이 적층된 형태를 가지고 있고, 수직 Z 축의 컬럼은 수직 축의 한쪽에 고정되어 있다. 수직축의 질량의 보정을 위하여 공기 실린더를 적용하였다.

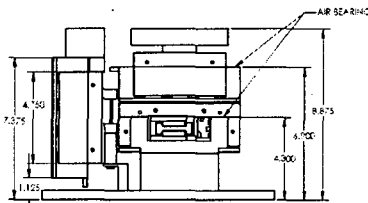


Fig. 1. 3-Axis stages with air bearing (inches)

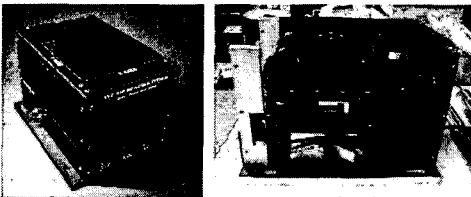


Fig. 2. the 3-axis micro machine tool

2.2 자기예압 공기베어링 스테이지

본 연구의 마이크로 가공기는 동일한 3개의 1축 스테이지를 이용하여 구성되어 있다. 각각의 스테이지는 Fig. 3과 같은 구성을 가지고 있으며, 무철심형 리니어 모터를 구동원으로 사용하며, 50 nm 분해능의 리니어 스케일을 이용하여 위치를 검출하도록 되어 있다.

여기서 공기베어링에는 영구자석을 이용한 예압이 적용되어 있다. 공기베어링의 경우, 하중능력과 강성을 위해서 설계된 베어링 공극을 유지하는 것이 중요하며, 이를 위해서 일반적으로는 반대방향에 공기베어링을 위치시키는 방법을 사용하며, 자중을 이용하거나, 진공예압, 또는 자기력을 이용하는 방법을 사용하기도 한다. 본 모델의 경우는 영구자석을 이용하고 있으며, 이를 통해서 반대쪽의 공기베어링을 없애므로써 형태가 단순해지는 장점이 있다. 측면의 경우에는 양쪽에 공기베어링을 위치시키는 구성을 하고 있다.

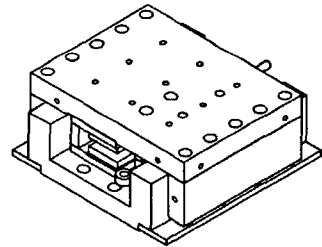


Fig. 3 1-axis air bearing stage with magnetic preload

3. 공기베어링 스테이지의 정, 동적 특성 측정

3.1 XY 테이블 및 Z 컬럼의 공기베어링 간극

공기베어링 테이블의 특성을 알아보기 위하여 우선적으로 공기 압력에 따른 간극의 변화를 측정하였다. Fig. 4는 XY 테이블의 부상량 측정결과를 나타내고 있다. 측정결과 20 psi까지는 부상이 되지 않으며 40 psi부터 약 15 μ m의 부상을 보이며 95 psi에서는 30 μ m의 부상량을 보이고 있음을 알 수 있다. Z컬럼의 경우 역시 40 psi에서부터 부상이 일어나며 최대 95 psi에서는 약 20 μ m의 간극을 보이고 있다.

본 공기정압 베어링의 정상 공기압은 80 psi로 되어 있으며, 본 연구에서는 60, 80, 95 psi의 세가지 압력에 대하여 강성을 측정하였다.

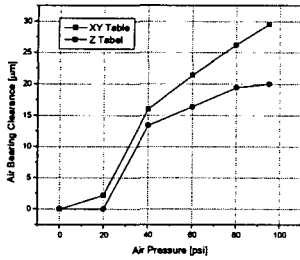


Fig. 4 Measured air bearing clearance

3.2 XY 테이블의 정강성 측정

Fig. 5는 XY 테이블의 정강성을 측정하기 위한 장치를 나타내고 있다. 힘의 측정을 위하여 Force Sensor를 사용하였으며 최대 50N 정도의 힘을 가하여 용량형 센서를 통하여 변위를 측정하여 강성을 측정하였다. 힘은 아래와 위의 양방향에 대하여 적용하였으며 Fig. 6은 60 psi에서의 측정결과를 나타내고 있으며, 여기서 50N 까지의 범위에서 양방향으로 우수한 선형성을 보이고 있음을 알 수 있다.

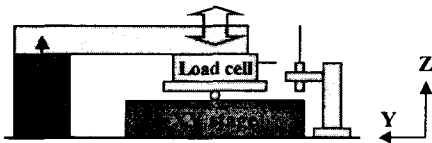


Fig. 5 Set-up for measuring stiffness of XY table

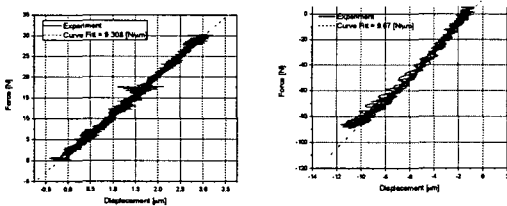


Fig. 6 Force-displacement plot at 60 psi (down and up force)

Table 1. Vertical stiffness of XY table

Air pressure	Stiffness [N/µm]	
	Down force	Up force
60 psi	9.3	9.6
80 psi	8.1	9.4
95 psi	7.2	7.6

XY 테이블의 수직방향 강성을 공기 압력에 따라 비교하면 다음의 Table 1과 같다. 60 psi에서 최대 약 9.5 N/µm의 값을 나타내고 있으며, 압력의 증가에 따라 강성이 낮아지는 특성을 나타내고 있다. 이는 일반적인 공기베어링 예압 (혹은 더블 패드)과는 반대의 특성으로, 앞 절에서 본 것과 같이 압력에 따라 공기베어링 강성이 증가하기 때문이다. 대체로 공기베어링이 강성은 간극이 어느 정도까지는 작아질수록 증가하는 특성을 갖는다. 수평 테이블이 두 개의 1축 스테이지가 적용된 형태임을 감안할 때, 한 축 스테이지의 수직 강성은 두 배인 약 18 N/µm 정도임을 예측할 수 있다.

3.3 Z 컬럼의 정강성 실험

수직방향 컬럼의 정강성 측정을 위하여 Fig. 7과 같이 컬럼 상단에 힘을 가하고 성단부에서의 변위를 측정하였다. 측정된 결과는 Table 2와 같다.

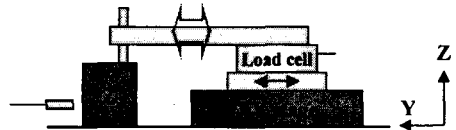


Fig. 7 Set-up for measuring stiffness of Z column

Table 2 Y-stiffness of Z column

Air pressure	Stiffness [N/µm]	
	+Y direction	-Y direction
60 psi	1.35	0.57*
80 psi	1.23	0.48*
95 psi	1.15	0.44*

*: big nonlinearity

측정결과, XY 테이블의 강성에 비하여 매우 작은 값이 나타나고 있음을 알 수 있는데, 이는 컬럼의 위치가 공기베어링 테이블의 한쪽에 위치하여 Y방향 힘이 모멘트를 발생시키기 때문이다. 이는 간단한 선형 스프링 모델을 사용하여 계산한 결과와 비교하여 확인할 수 있으며, 테이블의 수직강성이 20 N/µm라고 가정한 경우 강성 측정위치에서의 값은 약 1.1 N/µm로 계산되어 Z 컬럼의 강성이 작게 나타나는 이유를 설명할 수 있다. 따라서 강성을 높이기 위해서는 컬럼의 돌출길이를 최소화 하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

3.4 XY 테이블의 동특성

XY 테이블의 동특성을 알아보기 위하여 Impact Hammer(Kistler, 9274A, 2 mV/N)와 가속도계(PCB 307A, 100 mV/g)를 이용하여 테이블의 주파수 응답을 측정하였다. Fig. 8은 가진한 지점을 나타내고 있다. 1~3번은 수직으로 가진하고 4~5번은 X방향으로, 6~7번은 Y방향으로 가진한 지점이며, 가속도계는 그림과 같이 한쪽 모서리에 장착하였다. 테이블을 중앙에 위치시키고 그림의 지점들을 가진하면, 각각의 강체운동 모우드의 고유진동수를 알 수 있다. Fig. 9는 측정되어진 주파수 응답특성을 나타낸다.

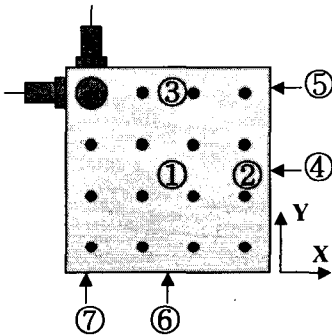


Fig. 8. Impacting and measuring points

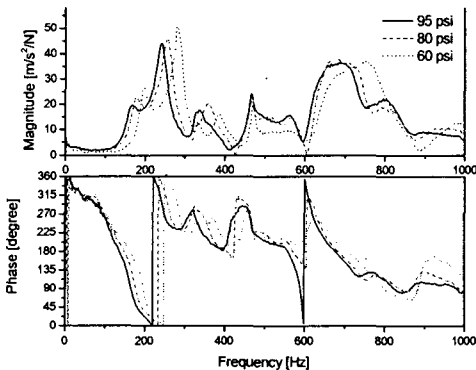


Fig. 9. Frequency response of XY table due to vertical impact

Table 3.은 수직방향의 가진에 대한 경우와, Table 4.는 수평 방향 가진의 경우에 대하여 베어링의 강성에 의한 고유진동수를 나타내고 있다. 대체로 200 Hz~ 400 Hz 사이의 값을 가지고 있으며, 구조물 자체의 고유진동에 의한 주파수는 1,500Hz 이상인 것으로 나타났다.

Table 3. Natural frequencies of XY table from vertical impact

Air pressure (psi)	First natural frequency [Hz]		
	Z motion	θ_y motion	θ_x motion
60	281	198	379
80	256	181	355
95	242	169	339

Table 4. Natural frequencies of XY table from horizontal impact

Air pressure (psi)	Natural frequencies from X impacts		Natural frequencies from Y impacts	
	x motion	θ_x motion	y motion	θ_y motion
60	198	110	386	112
80	183	119	365	122
95	169	126	350	127

이중 수직방향 모드는 250 Hz 부근이며, X축과 Y축에 대하여 회전운동을 하는 모우드의 주파수는 각각 200 Hz 부근과 370 Hz 부근으로, 두 개의 주파수가 다른것은 Y방향 스테이지가 X방향 위에 얹혀 있으므로 X방향의 질량이 크기 때문이다. 수평방향의 X, Y 방향 가진에서 나타난 고유모우드도 수직 가진에서 얻은 θ_x , θ_y 모우드와 동일한 것임을 알 수 있다. 또한 이 모우드는 수직방향 공기베어링의 강성에 영향을 받으므로 압력이 높을수록 주파수가 크게 낮아지는 특성을 보이며, θ_x 운동 주파수는 반대로 압력에 따라 고유진동수가 약간 증가하는데, 이것은 이 운동을 지지하는 공기베어링은 공기베어링으로 예약이 되어 있으므로, 압력을 높여도 베어링 간극의 변화 없이 강성이 증가하기 때문이다.

3.5 Z 컬럼의 동특성 실험

Z 컬럼을 X 방향 및 Y방향으로 가진하여 구해진 고유진동수는 Table 5.와 같다.

Table 5. Natural frequencies of Z column

Air pressure (psi)	First natural frequency [Hz]	
	X direction	Y direction
60	177	236
80	186	214
95	190	201

고유진동수는 80 psi에서 X방향으로 약 186 Hz, Y방향으로

로 약 215Hz 로 나타났으며, 자기예압 공기베어링의 영향을 받는 Y방향 운동에 대해서는 압력에 따라 주파수가 감소하며, X방향에 대해서는 압력에 따라 증가하는 경향을 보였다. Fig. 10에는 Y방향 가진에서 얻은 주파수 응답을 나타내고 있다.

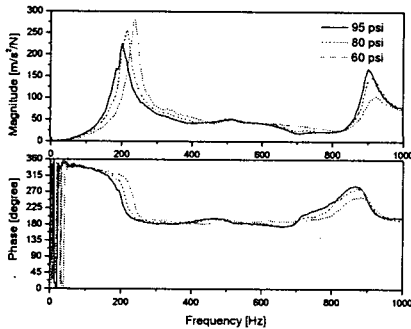


Fig. 10 Frequency response of Z column (Y direction)

3.6 결과 요약

이상의 결과에서 다음과 같은 내용들을 확인할 수 있다. 공기베어링의 강성은 한 개의 스테이지에 대하여 약 18 N/ μm 의 값을 가지고 있음을 알 수 있으며, 자기예압이 작용하는 부분에서는 공기 압력이 작을수록 강성이 크게 나타나는 경향을 나타내었다. 특히 수직 축의 경우 가공력의 작용점이 테이블의 중심점에서 상대적으로 멀리 떨어져 있음으로 인하여 모멘트가 크게 작용하게 되며 이때의 강성이 상대적으로 매우 작게 나타나게 됨을 알 수 있다.

XY 테이블 및 수직축(Z) 테이블의 고유진동수를 측정할 결과에서는 대체로 공기베어링에 의한 강체 모우드의 고유진동수가 200~350 Hz 부근에 위치하고 있음을 알 수 있었으며, 자기예압 공기베어링의 강성에 영향을 받는 모우드에 대해서는 압력에 따라 진동수가 약간 작아지는 경향을 나타내었으며 이는 정강성의 변화와 일치하는 경향이다. 그러나 공기베어링으로 예압된 강성에 영향을 받는 모우드에 대해서는 공기압력에 따라 고유진동수가 약간 증가하는 특성을 나타내었다.

테이블 및 구조물의 유연 모우드에 의한 고유진동수는 대체로 1.5kHz 이상에 위치하고 있으며 강체 고유진동수에서 유연 모우드까지에 큰 공진을 발생시킬 모우드는 없는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 자기예압 공기베어링 스테이지를 갖는 3축 마이크로 밀링 머신의 정적 강성 및 주파수 응답 실험을 통하여 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 수평 스테이지의 상하방향 강성은 약 9 N/ μm 이며, 한축만을 고려한 경우에는 약 18 N/ μm 정도로 유추할 수 있다.
- 2) 수직축의 경우 가공물위치에서의 강성은 1N/ μm 이하로 매우 낮으며, 이는 공기베어링 테이블에 모멘트가 크게 작용하는 구조이기 때문으로 개선이 필요하다.
- 3) 수평 스테이지의 경우 공기베어링에 의한 고유진동수는 200~350Hz로 나타났으며, 수직축의 경우 180~230Hz 부근으로 나타났다. 또한 테이블 등의 유연모우드 등에 의한 고유진동수는 대부분 1kHz 이상으로 나타났다.
- 4) 자기예압을 적용한 공기베어링의 경우 공기 압력이 클수록 강성이 다소 낮아지며 관련된 모우드의 고유진동수도 낮아지는 특성을 보였다. 또한 베어링의 힘-변위 특성은 양방향 하중에 대하여 50N 범위에서는 우수한 선형성을 나타냄을 확인할 수 있었다.

추후, 기계가공 실험을 위하여 정밀도를 분석하고 실 가공을 통하여 마이크로 밀링 머신의 가공특성을 분석할 예정이다.

후기

본 논문은 산업자원부 지원 차세대신기술 사업인 “차세대 지능형 마이크로 팩토리 기술 개발”사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Vogler, M. P., X. Liu, S. G. Kapoor, R. E. DeVor and K. F. Ehmann, 2002, "Development of meso scale machine tool (mMT) systems," *Transactions of NAMRI/SME*, 30, pp. 653-661.
- (2) Slocum, A., Badaran, M., Cortesi, R. and Hart, A. J. 2003, "Linear motion carriage with aerostatic bearings preloaded inclined iron core linear electric motor", *Precision Engineering*, Vol. 27, pp. 382~394.