

# 영구자석 이동형 선형 모터를 가진 초소형 공기베어링 스테이지

노승국<sup>#</sup>, 박종권<sup>\*</sup>

## A Miniature Air-Bearing Positioning Stage with a Magnet-Moving Linear Motor

Seung-Kook Ro<sup>#</sup> and Jong-Kweon Park<sup>\*</sup>

### ABSTRACT

In this paper, a new air bearing stage with magnetic preload and a linear motor has been developed for the small precision machine systems. The new air bearing stage is unique in the sense that permanent magnets attached bottom of the iron core of table are used not only for preloading air bearings in vertical direction but also for generating thrust force by current of the coil at base. The characteristics of air bearings using porous pads were analyzed with numerical method, and the magnetic circuit model was derived for linear motor for calculating required preload force and thrust force. A prototype of single axis miniature stage with size of 120(W)×120(L)×50(H) mm<sup>3</sup> was designed and fabricated and examined its performances, vertical stiffness, load capacity, thrust force and positioning resolution.

**Key Words** : Micro machine tool (초소형 공작기계), Air bearing stage (공기베어링 스테이지), Slotless linear motor (슬롯리스형 리니어 모터), Magnetic preload (자기예압)

### 1. 서론

최근 들어 미소 부품 및 모듈의 가공, 조립, 측정, 평가 등의 수요가 커지면서, 이러한 부품의 생산을 위한 장비 및 단위 기계의 소형화에 대한 요구가 증대되고 있다. 따라서, 마이크로팩토리(Micro-Factory)와 같은 개념을 적용한 초소형 생산 기계의 개발이 전세계적으로 주목을 받고 있으며, 생산 시스템의 하나의 새로운 개발 개념으로 자리잡아가고 있다.<sup>1,2</sup> 특히 기존의 절삭가공 등을 수행하는 공작기계를 소형화 할 경우, 작업 공간의 제약이

없어지며, 에너지와 자원의 절약, 유연성의 확보 등을 얻을 수 있는 장점을 갖게 된다. 이러한 초소형 공작기계의 구성을 위해서는, 기본적으로 초소형 고속 스펀들, 초소형 정밀 이송계, 공구 및 가공물의 핸들링과 같은 요소들이 필요하며, 이러한 기본요소들은 대상제품의 크기와 정밀도를 고려할 때, 충분한 정밀도를 구현할 수 있어야 한다.<sup>3</sup>

이 중 초소형 공작기계용 정밀 이송계의 경우, 기존의 개발사례나 상용제품을 살펴보면, 구름접촉의 소형 선형 가이드나 크로스 롤러 가이드와

접수일: 2007년 2월 12일; 게재승인일: 2007년 6월 1일

# 교신저자: 한국기계연구원 지능기계연구센터

E-mail: cniz@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7115

\* 한국기계연구원 지능기계연구센터

스텝 혹은 서보모터와 볼나사 등을 이용한 시스템들이 있으나 이송 정밀도가 수 마이크로 단위로 서브미크론의 정밀도를 요하는 정밀 가공기 용도로는 적합하지 않으며, 상대적으로 소형화에 한계가 있다. 다른 방법으로, 피에조 액츄에이터를 이용한 Inch worm 방식을 적용하면 이송계의 소형화와 미소 이송이 가능하나, 이송속도의 제한과 하중에 따른 이송변위 변화 등의 문제점을 가지고 있다. 따라서 소형 리니어모터나 보이스 코일을 이용한 이송계를 적용한 초소형 공작기계 개발이 시도되고 있다.<sup>1,2</sup>

여기서 공기의 압력을 이용하여 스테이지를 부상 지지 하는 공기베어링의 경우, 평균화 효과에 따라 가이드의 형상오차에 의한 영향이 적어 운동 정밀도가 우수하고, 마찰이 거의 없어 위치결정 정밀도를 높게 할 수 있는 장점을 가지고 있어, 초정밀 가공기 등의 초정밀 기계에 적용되고 있다.<sup>4,5</sup> 이러한 공기베어링을 이용한 스테이지를 소형화할 경우, 초소형 공작기계, 측정장치 등 정밀 기계장치에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

본 논문에서는 이러한 공기베어링을 이용한 이송계의 소형화를 위하여 새로운 방식의 공기베어링 및 선형 모터를 제안한다. 제안된 공기베어링 시스템은 수직방향 예압력을 제공하는 영구자석이 추력을 발생하는 자속의 제공원이 되는 방식으로 슬롯이 없는 리니어 모터와 공기베어링의 조합이라 할 수 있다. 자기예압을 적용함으로써 일반적인 공기베어링 스테이지에서 적용되는 양면 패드 방식과 달리 한쪽면의 가이드만 사용하여 구조의 단순화가 가능하다. 본 논문에서는 이러한 스테이지의 공기베어링을 수치해법을 이용하여 설계하고 모터에서의 수직방향 예압력과 추력의 계산을 위한 자기회로 모델을 유도하였으며, 제안된 모델을 이용하여 120(W)×120(L)×50(H) mm<sup>3</sup> 크기의 1축 스테이지를 설계하였다. 또한 제작된 실험 스테이지 수직방향 강성 및 추력, 이송 분해능 등 기본 특성에 대하여 평가하였다.

## 2. 소형 공기베어링 선형이송계 개요

Fig. 1 은 본 연구에서 제안한 소형 공기베어링 스테이지의 개념도를 나타내고 있다. 테이블 중앙의 모터의 영구자석과 고정자 사이의 공극에서 발생하는 흡인력 (Maxwell Force)을 다공질 공기베어

링의 예압력으로 사용하고, 공극의 자기장과 수직되는 방향에 전류를 흐르게 함으로써 영구자석이 부착된 테이블에 Lorenz 힘을 이용하여 이송력을 발생시키는 방법으로 영구자석 이동형 리니어모터 공기베어링 스테이지(magnet moving slotless linear motor air bearing stage)라 칭할 수 있다.<sup>10,11,12</sup> 특히, 본 스테이지의 리니어모터의 경우 기존의 철심형 리니어 모터의 슬롯이 예압력의 변화를 통해 코킹 및 운동오차를 발생시킬 수 있어<sup>8</sup>, 슬롯이 없는 형태로 설계하였으며, 단상의 코일을 이용하여 제어하므로 전류 증폭기능을 갖는 앰프만으로 구동할 수 있다.

본 연구에서는 스테이지 크기를 가로, 세로, 높이를 120×120×50 mm<sup>3</sup> 이하로 하면서 최대 정격 추력 20N 이상을 갖고, 수직방향의 강성은 20 N/μm 이상이 되는 공기베어링 스테이지를 설계하고자 하였다.

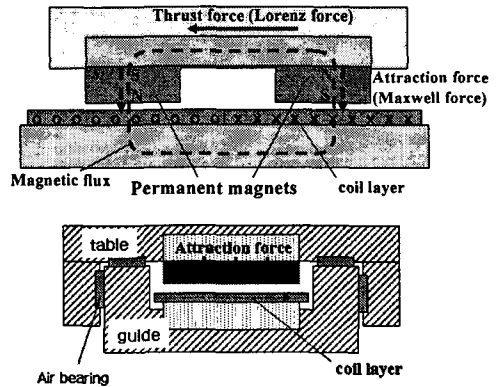


Fig. 1 Schematic diagram of air bearing stage with a slotless linear motor

## 3. 소형 공기베어링 스테이지의 모델링

### 3.1 다공질 공기베어링

본 연구의 공기베어링은 강성과 부하용량, 안정성면에서 유리하고 제작이 용이한 다공질 패드를 이용한 공기 베어링을 적용하였으며<sup>6</sup>, 다공질 재료의 두께를 줄일 수 있는 급기 홈을 이용한 방법을 적용하였다.<sup>7</sup> 다공질 공기베어링의 주요 설계변수인 하중용량을 계산하기 위해서는 베어링 간극에서 패드면의 압력분포 계산이 필요하며, 이

는 다공질 재료 내부에서의 기체 흐름에 대한 지배 방정식인 Darcy 의 방정식 (1), 다공질 재료와 베어링 간극 사이에서는 눈막힘을 고려한 유량의 평형 방정식 (2), 그리고 베어링 간극에서는 레이놀즈 방정식으로 유도되는 편미분 지배방정식 (3) 을 이용하여 계산이 가능하며, 이를 수치해석법을 통하여 계산하게 된다. 이때,  $x, y$  는 평면 방향이며,  $z$  는 두께 방향을 의미하고,  $k_x, k_y, k_z$  는 다공질 재질의 각 방향의 투과율로, 재료의 고유특성이다.

$$k_x \frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 p^2}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & -\frac{\rho k_x}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x-} dy \frac{dz}{2} - \frac{\rho k_y}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y-} dx \frac{dz}{2} \\ & - \frac{\rho k_z}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z-} dx dy \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & = -\frac{\rho k_x}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x+} dy \frac{dz}{2} - \frac{\rho k_y}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y} \Big|_{y+} dx \frac{dz}{2} \\ & - \frac{\rho E_z k_z}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{z+} dx dy \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p^2}{\partial x} \right) + h^3 \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2} - 12k_z E_z \frac{\partial p^2}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

본 연구에서는 위의 지배방정식 들을 3 차원 유한차분법을 이용하여 계산하여, 다공질 패드의 공극면에서의 압력분포 및 하중용량, 강성 등을 계산하였다.<sup>9</sup>

### 3.2 리니어 모터의 예압력 계산

Fig. 2 에는 본 연구의 리니어 모터의 구조를 나타내고 있다. 테이블 아래의 철심과 2 개의 영구자석을 배치하여 고정자의 철심 사이에 자속을 발생시키게 되며, 이때의 자속밀도는 자기회로 모델을 통하여 간단히 계산될 수 있다.

우선 작은 체적에서 강한 자기력을 발생시키는 네오디뮴 계열(NdFeB) 자석의 자화특성이 선형에 가까우므로 다음의 식과 같이 모델링 될 수 있다.

$$B_{pm} = -\mu_{pm} H_{pm} + B_r \quad (4)$$

여기서  $B_{pm}$  은 영구자석의 자속밀도,  $B_r$  은 잔류자속밀도,  $H_{pm}$  은 보자력으로 영구자석 재료의 고유

자화 특성이며, 잔류자속밀도와 보자력이 클수록 강한 자성을 띄게 된다.

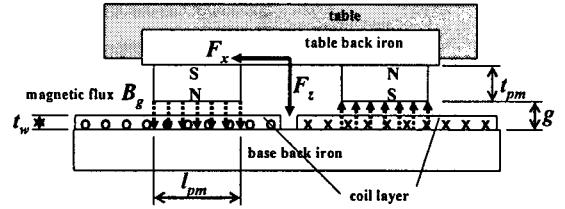


Fig. 2 Magnetic forces acting on the slotless linear motor

이때, 영구자석 면에서 베이스의 철심까지의 간극을  $g$  라고 할 때, 영구자석면의 공극에 수직 한 자속밀도가 균일하다고 가정하면 식 (5)와 같이 계산할 수 있으며 이에 따라 발생하는 Maxwell Force 는 수직 예압력으로 작용하며 (6)과 같이 계산된다. 이때,  $K_I$  은 누설계수로 실제로 자속이 공극 이외의 경로를 통하여 흐름으로써 생기는 자기 누설을 감안한 수치로 2 차원 및 3 차원 유효요소 해석이나 실험으로 검증할 수 있으며 대개 1.2~1.5 의 값을 갖는다.

여기서 예압력은 공극의 자속밀도  $B_g$  와 영구자석의 면적에 대한 함수임을 알 수 있으며, 철심 재료의 포화 자속밀도 등의 자성특성을 고려하여 결정되어야 한다.

$$B_g = \frac{\mu_0 t_{pm} B_r}{(\mu_0 t_{pm} + \mu_{pm} g) K_I} \quad (5)$$

$$F_z = \frac{B_g^2 A_g}{\mu_0} = \frac{\mu_0 t_{pm}^2 B_r^2 A_g}{(\mu_0 t_{pm} + \mu_{pm} g)^2 K_I^2} \quad (6)$$

### 3.3 선형 모터의 추력

Fig. 2 에서 추력  $F_x$  는 로렌츠 힘(Lorenz's Force) 에 의하여 발생하는 것으로 식 (7)과 같은 관계를 갖는다. 이를 (5)에서 구해진 공극에서의 자속밀도  $B_g$  와 자속이 지나가는 면과 총침되는 코일층에서의 전류밀도  $J$  와 중첩되는 부피의 곱으로 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$\vec{F} = \int \vec{B} \times \vec{J} dV \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 F_x &= 2B_g J A_g t_w \\
 &= 2B_g J l_g w_g t_w \\
 &= 2B_g w_g N l
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

여기서  $w_{pm}$  은 영구자석의 폭을 나타낸다. 선형 모터의 추력도 역시 공극에서의 수직방향 자속밀도와 단면적에 영향을 받으며, 특히 코일층의 높이  $t_w$ 와 전류밀도에 비례하여 증가함을 알 수 있다.

#### 4.1 축 시작 스테이지의 설계

##### 4.1 공기베어링 해석

Fig. 3 은 본 연구의 스테이지에 적용된 다공질 공기베어링 패드( $16 \times 25 \times 4 \text{mm}^3$ )의 특성을 유한 차분법 (FDM)을 이용하여 계산한 결과로 베어링 간극에 따른 1 개의 패드에서의 하중 용량과 강성을 공기압력 0.4, 0.5 MPa 일 때에 대하여 나타내고 있다. 여기서 요구되는 공기베어링의 강성을 확보하기 위해서는 하중용량에 해당하는 값을 예압으로 제공하여야 한다. 이러한 특성을 통하여 요구되는 강성과 이때의 예압력을 구할 수 있다. 해석 결과에서  $5 \mu\text{m}$ 의 간극 이상에서는 베어링 간극이 작을수록 하중용량 및 강성이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

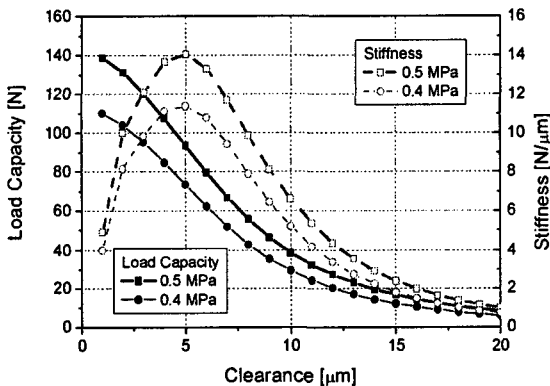


Fig. 3 Calculated load capacities and stiffness of a porous air bearing pad ( $16 \times 25 \times 4 \text{mm}^3$ )

##### 4.2 예압 및 이송력 설계

영구자석의 제원으로는 시중에서 구입이 가능한 NdFeB 재질의  $40(w_{pm}) \times 20(l_{pm}) \times 10(t_{pm}) \text{mm}^3$  크기의 블록형 자석(33 MGOe Grade,  $B_r=1.17 \text{T}$ ,  $H_c=911.3$

A/m)을 선정하였으며, Fig. 2 에서와 같이 2 개의 자석을 배치하도록 하였다. 3.2 절의 모델을 이용하여 영구자석과 고정자 철심 사이의 공극  $g$ 에 따른 자속 밀도 및 예압력을 계산한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

또한, Fig. 5 는 모터용 권선의 전류에 따라 발생하는 추력을 나타낸 것으로, 정격최대 출력 시 전류밀도를  $10 \text{A/mm}^2$ , 순간 최대 출력을  $20 \text{A/mm}^2$ 로 할 때의 값으로, 이때의 전류값을 0.5 mm 두께의 코일을 사용할 때에 대하여 계산하면 각각 약 2A 와 4A 의 값을 갖는다. 이때 코일층의 높이  $t_w = 4 \text{mm}$  이며 공극이 10 mm 일 때, 정격 및 순간 출력이 각각 약 20 N 및 40 N 을 나타내고 있다.

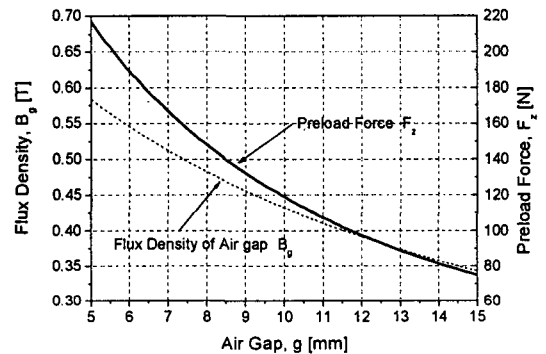


Fig. 4 Magnetic flux density and preloading force calculated from magnetic circuit model ( $K_t = 1.3$ )

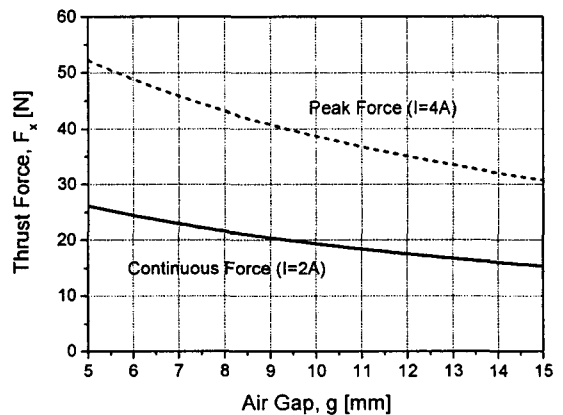


Fig. 5 Peak and continuous thrust force due to air gap ( $t_w=4 \text{mm}$ )

위의 결과에서 자속밀도의 제곱에 반비례하는 예압력의 경우 공극  $g$  에 더 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 공극 5~15 mm 사이에서 공극에서의 자속밀도는 약 0.4 T 전후로, 철심코어를 사용하기에 적합하다 할 수 있다.

### 4.3 설계 결과

Fig. 6 은 이렇게 설계된 1 축 시작 스테이지의 구성을 나타내고 있다. 전체적인 크기는 엔코더 부분을 제외하면 120x120x50 mm<sup>3</sup> 이며, 50nm 의 분해능을 갖는 광학식 선형 엔코더를 이용하여 위치를 검출하며, 20mm 의 작동범위에서 단상방식의 구동을 적용하였다.

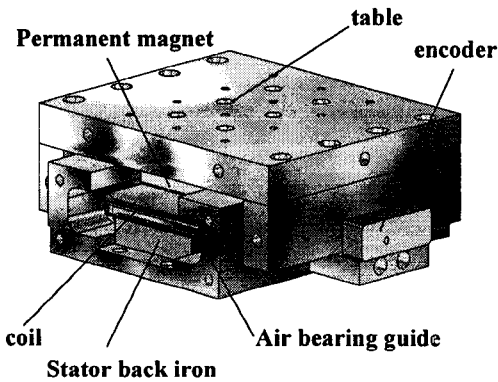


Fig. 6 Designed 1-axis miniature air bearing stage with a linear motor

Table 1 Designed parameters of the miniature air bearing stage

|                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| Size (W×L×H)                     | 120×120×50      |
| Stroke                           | 20mm            |
| Permanent magnet                 | 2 EA (40×20×10) |
| Air bearing clearance (vertical) | 13 μm           |
| Vertical Air Bearing stiffness   | 21.4 N/μm       |
| Magnetic preload (vertical)      | 120 N           |
| Moving weight                    | 0.98 kg         |
| Encoder resolution               | 50nm            |
| Thrust force (Cont./Peak)        | 20 N / 40 N     |

## 5. 실험 결과

### 5.1 1 축 시작시스템 제작

Fig. 7 은 제작된 1 축 스테이지의 그림을 나타내고 있다. 테이블 및 가이드는 알루미늄 합금으로 제작되었으며 설계된 다공질 공기베어링 패드는 Fig. 7 에 나타난 바와 같이 테이블에 부착되었다. 수평방향 간극의 경우 약 10 μm를 갖도록 제작되었으며, 수직방향의 경우에는 리니어 모터 부분의 자기력으로 예압이 적용되므로 각 패드에서의 평면도만 맞춘 상태이다. 테이블 중앙에는 선형 모터 철심이 조립되며, 철심아래쪽으로 두 개의 영구자석이 부착되어 있다.

가이드의 경우, 스테이터 철심에는 이송력을 발생시키기 위한 보빈에 0.5 mm 두께의 구리선 코일을 감은 권선이 부착되어 있다. 제작된 코일의 감은 수는 약 460 회였으며, 권선의 높이는 4 mm 이며, 저항은 8.9 Ω로 측정되었다. 위치제어를 위한 선형 엔코더(Renishaw RGH-22H, 50 nm resolution)를 가이드 한쪽 면에 부착하였다. 권선 코일의 경우 전류 캐환루프를 갖는 PWM 증폭기(Copley Controls 4122Z)를 이용하여 코일을 인가하며, DSP 제어를 이용하여 PID Controller 로 이송 제어를 수행하도록 구성하였다.

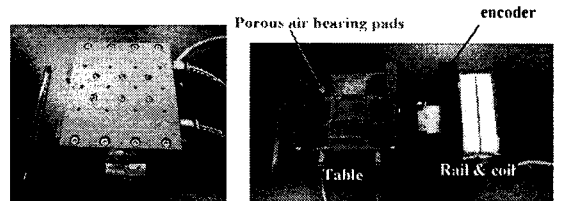


Fig. 7 Fabricated 1-axis miniature air bearing stage with a slotless linear motor

### 5.2 공기베어링 특성 시험

Fig 8 은 제작된 스테이지의 공기베어링의 공기압에 따른 부상량을 나타낸 그림이다. 5 기압 (0.5MPa)에서 테이블의 수직방향 부상량은 약 7.5 μm로 설계치 13 μm 수치보다는 낮은 수치를 나타내었다. 또한 Fig. 9 는 이때의 수직방향 강성을 측정 한 것으로 0.5 MPa 에서 16.5 N/μm 로 나타나 역시 설계된 값에 비하여 77%정도의 값을 나타내었다. 그러나 공기베어링의 강성은 공급압력을 0.3 MPa 로 줄이는 경우 간극이 줄어들어 목표했던

20 N/ $\mu\text{m}$ 를 얻을 수 있었다.

여기서 설계 시 해석결과와 오차가 발생하는 것은 공기베어링의 하중능력 및 강성이 설계값과 차이를 보이기 때문인데, 이러한 오차는 다공질

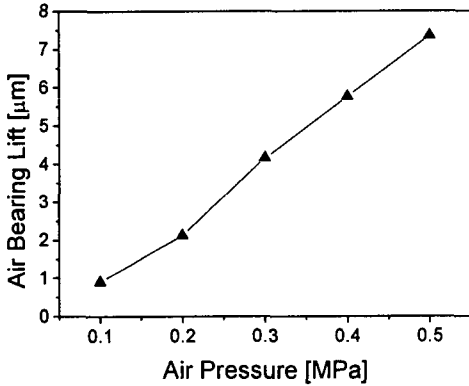


Fig. 8 Measured air bearing clearance of the table in vertical direction

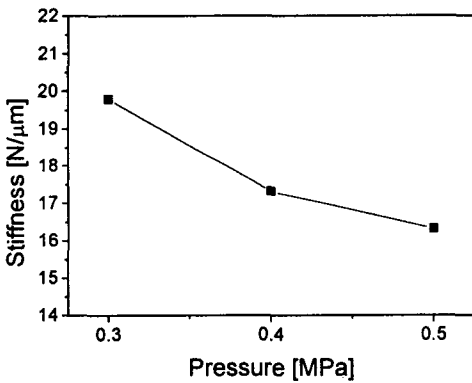


Fig. 9 Measured stiffness of table in vertical direction

패드의 접합 시 접착제의 퍼짐에 따라 급기면적이 감소된 영향이 크게 작용하였기 때문이다. 특히, 패드의 크기가 상대적으로 작은 본 연구의 공기베어링에서, 이러한 급기면적의 감소가 크게 작용하게 되는데, 접합제의 침투 깊이가 2 mm 인 경우, 한 개의 패드에서 급기면적은 기존 설계의 50% 이하로 감소하게 되기 때문이다. 따라서 공기베어링의 강성 증가를 위해서는, 이러한 제작상의 특성을 고려하여 급기면적을 충분히 확보하도록 설계할 필요가 있다.

### 5.3 선형 모터의 성능 시험

Fig. 10 은 모터 권선의 코일에 전류를 0~3 A 까지 가하여 추력을 로드셀을 이용하여 측정한 결과를 나타내고 있다. 측정은 테이블이 중앙에 있는 경우, 중앙에서 5mm 그리고 끝 부분인 10mm 에 위치하였을 때 3 군데에서 측정하였다. 그림에서 알 수 있듯이 5mm 까지는 거의 10 N/A 의 추력상수를 나타내었으며, 끝부분에서는 8.2 N/A 로 17% 정도 감소한 결과를 나타내었다. 이는 스테이지가 끝단에 있는 경우 자속이 지나가는 면적과 모터 권선의 면적이 겹치는 부분이 상대적으로 작아지기 때문으로 예측된다. 모터 코일에서의 온도 측정 결과 2A 에서 약 60 $^{\circ}\text{C}$ 에서 안정화 되었다. 일반적으로 상업적인 선형모터의 경우 100 $^{\circ}\text{C}$  이상을 기준으로 삼는 것을 감안하면 연속 최대추력을 20N 이상이라고 할 수 있어, 설계 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

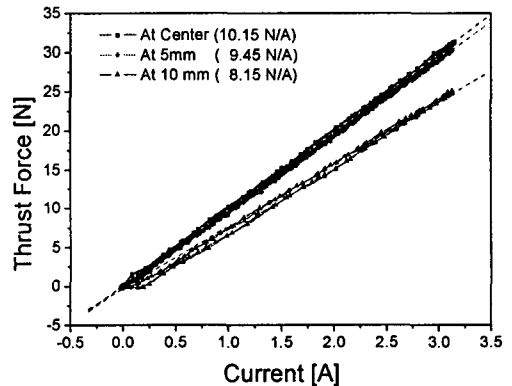


Fig. 10 Measured thrust force of the stage

### 5.4 이송제어 분해능

스테이지의 이송제어는 광학식 선형 엔코더를 통하여 변위를 검출한다. 공기베어링을 적용하는 경우 가이드에서의 마찰에 대한 영향이 거의 없으므로 이송 정밀도를 상당히 우수하게 가져갈 수 있으며, 비접촉식 리니어모터를 구동원으로 사용하므로 급속이송의 장점을 가질 수 있으며, 특히 상용으로 많이 사용되는 철심형 리니어모터에서 볼 수 있는 슬롯이 존재하지 않아 코깁이 거의 없는 운동을 기대할 수 있다.

제작된 스테이지의 이송제어는 DSP 제어보드 (dSPACE DS1104)를 이용하여 PID 제어를 이용하여 수행하였다. Fig. 11 은 0.1  $\mu\text{m}$ 의 계단응답을 용

량형 센서로 측정된 것으로 이송 분해능 0.1  $\mu\text{m}$  가 가능함을 알 수 있다. 사용된 엔코더의 분해능이 50 nm 임을 감안 할 때, 분해능이 높은 엔코더를 적용하는 경우 이송 분해능의 향상을 기대할 수 있음을 알 수 있다.

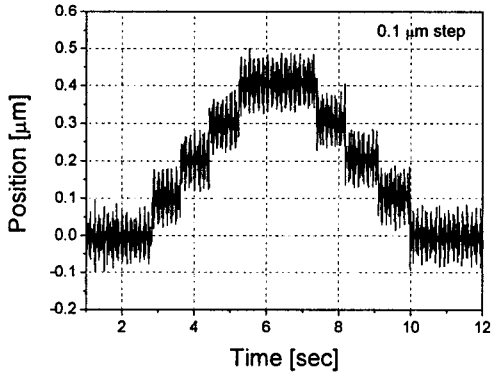


Fig. 11 Step response of the table with 0.1  $\mu\text{m}$  command

## 6. 결 론

초소형의 정밀 기계시스템을 위한 초소형 공기 베어링 스테이지에 대한이상의 연구결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 공기베어링을 이용한 초소형 정밀 스테이지의 개발을 위하여 예압력과 이송력을 같은 영구자석에서 발생시키는 모터를 포함한 스테이지 시스템을 제안하였다.

(2) 수치해석법과 자기회로 모델을 통하여 다공질 공기베어링 및 모터의 예압력, 추력을 계산하였으며, 가로, 세로 120×120 크기의 20mm 작동범위를 갖는 1축 스테이지를 설계하였다.

(3) 설계된 시스템을 제작하였으며, 수직방향 공기베어링의 간극은 8  $\mu\text{m}$ , 강성은 약 17.5 N/ $\mu\text{m}$ 로 측정되었으며, 이송력의 경우 2A 에서 20N 의 정격 추력을 나타내었으며 약 10 N/A 의 추력상수를 나타내었다.

(4) 50nm 분해능의 엔코더와 디지털 제어기를 이용한 이송제어 실험을 통하여 0.1  $\mu\text{m}$ 의 이송제어 분해능을 얻을 수 있었으며 엔코더의 분해능 향상을 통하여 정밀도 향상을 기대할 수 있음을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부 지원 차세대신기술 사업인 “차세대 Micro-Factory 시스템 기술 개발”의 일환으로 연구되었습니다.

## 참고문헌

1. Okazaki, Y., Mishima, N. and Ashida, K., “Microfactory-Concept, History, and Developments,” *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 126, Issue 4, pp. 837-844, 2004.
2. Vogler, M. P., Liu, X., Kapoor, S. G., DeVor, R. E. and Ehmann, K. F., “Development of Meso Scale Machine Tool (mMT) Systems,” *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 30, pp. 653-661, 2002.
3. Smith, S. T. and Seugling, R. M., “Sensor and Actuator Considerations for Precision, Small Machines,” *Precision Engineering*, Vol. 30, Issue 3, pp. 245-264, 2006.
4. Ro, S. K., Kim, S. H., Kwak, Y. G. and Park, C. H., “Liner Air Bearing Stage with Actively Controllable Magnetic Preload,” *Conference Proceedings of EUSPEN*, pp. 297-300, 2006.
5. Ro, S. K., Park, J. K., Yoon, H. S. and Ehmann, K. F., “Static and Dynamic Characteristics of Magnetically Preloaded Stages for a 3-Axis Micro-Machine Tool,” *Proceedings of KSMTE Spring Conference*, pp. 468-472, 2005.
6. Fourka, M. and Bonis, M., “Comparison between Externally Pressurized Gas Thrust Bearings with Different Orifice and Porous Feeding System,” *Wear*, Vol. 210, Issue 2, pp. 311-317, 1997.
7. Yoshimoto, S. and Kohno, K., “Static and Dynamic Characteristics of Aerostatic Circular Porous Thrust Bearings (Effect of the Shape of the Air Supply Area),” *ASME J. of Tribology*, Vol. 123, Issue 3, pp. 501-508, 2001.
8. Slocum, A., Basaran, M., Cortesi, R. and Hart, A. J., “Linear Motion Carriage with Aerostatic Bearings Preloaded Inclined Iron Core Linear Electric Motor,” *Precision Engineering*, Vol. 27, Issue 4, pp. 382-394, 2003.
9. Park, C. H. and Lee, H., “Motion Error Analysis of the Porous Air Bearing Stage Using the Transfer Function,” *J. of Korean Society for Precision*

- Engineering, Vol. 21, No. 7, pp. 185-194, 2004.
10. Filho, A. F. F., Susin, A. A. and da Silveria, M. A.,  
“An Analytical Method of Predict the Static Performance of a Planar Actuator,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 39, No. 5, pp. 3364-3366, 2003.
  11. Basak, A. and Anayi, F. J., “A DC Linear Motor with a Square Amarture,” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, pp. 462-469, 1995.
  12. Basak, A., Filho, A. F. F., Nakata, T. and Takahasi, N.,  
“Three Dimensional Computation of Force in a Novel Brushless DC Linear Motor,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 2, pp. 2030-2032, 1997.
  13. Furlani, E. P., “Permanent Magnet and Electro-mechanical Devices: Materils, Analysis, and Applications,” Academic Press, 2001.
  14. Fitzgerald, A. E., Kingsly, C. Jr. and Umans, S. D.,  
“Electric Machinery,” McGraw-Hill, 1992.