

# 자기예압 공기베어링 스테이지의 3 자유도 운동오차 측정 및 능동 보정

## Measurement and Active Compensation for 3-DOF Motion Errors of an Air Bearing Stage with Magnetic Preloads

✉ 노승국<sup>1</sup>, 김수현<sup>2</sup>, 곽윤근<sup>2</sup>, 박천홍<sup>1</sup>

✉ Seung-Kook Ro<sup>1</sup>, Soohyun Kim<sup>2</sup>, Yoonkeun Kwak<sup>2</sup> and Chun Hong Park<sup>1</sup>

1 한국기계연구원 지능형생산시스템연구본부 (Intelligent Machine Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials.)

2 한국과학기술원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

✉ Corresponding author: cniz@kimm.re.kr, Tel: 042-868-7115

Manuscript received: 2008.2.19 / Revised: 2008.10.19 / Accepted: 2008.12.3

*This paper presents a linear air bearing stage with compensated motion errors by active control of preloads generated by magnetic actuators with combination of permanent and electro-magnets. A 1-axis linear stage motorized with a linear motor with 240 mm of travel range is built for verifying this design concept and tested its performances. The three motions of the table are controlled with four magnetic actuators driven by current amplifiers and a DSP based digital controller. Three motion errors were measured combined method with laser interferometer and two-probe method with 0.085  $\mu\text{m}$  of repeatability for straightness error. The measured motion errors were modeled as functions of the stage position, and compensation were carried out with feedforward control because the characteristics of the motion control with magnetic actuators are linear and independent for each degree-of-freedom. As the results, the errors were reduced from 1.09  $\mu\text{m}$  to 0.11  $\mu\text{m}$  for the vertical motion, from 9.42 sec to 0.18 sec for the pitch motion and from 2.42 sec to 0.18 sec for roll motion.*

Key Words: Air Bearing Stage (공기베어링 스테이지), Active Compensation of Motion Errors (운동오차 능동 보정), Magnetic Preload (자기예압), Combined Two Probe Method (복합 이점법)

### 1. 서론

가압된 공기압을 이용하여 가이드 사이에 공압막을 형성하여 베어링 역할을 수행하는 공기정압 베어링은 마찰력이 없어 높은 이송 분해능과 정밀도를 얻을 수 있으며, 평균화 효과에 의하여 운동오차가 구름베어링에 비하여 작다는 점, 또한 청정환경에서 사용이 용이하다는 점에 의하여, 초정밀 공작기계, 측정장치, 반도체 및 평판 디스플레이 관련 생산장비 등 초정밀 시스템에 널리 적용

되고 있으며, 대행정화와 초정밀화가 최근의 기술 발전 경향이다.<sup>1</sup> 특히 최근의 센서 및 선형 모터 등 구동 기술, 디지털 제어시스템 기술의 발달로 나노미터 수준의 이송분해능을 얻는 것이 가능해지고 있다.<sup>2</sup> 그러나 이송 중에 발생하는 수직 및 수평 진직도 오차(Straightness error), 피치(Pitch), 롤(Roll), 요(Yaw) 등의 운동오차를 이송정밀도의 수준을 갖도록 만들기는 쉽지 않으며, 이송거리가 커질수록 이러한 어려움은 더욱 커진다.

이러한 운동오차의 최소화를 위해서 근본적인

로는 가이드의 형상오차를 수정가공을 통해 제거하는 방법이 있으나,<sup>3</sup> 비용과 시간의 소모에 따라 실용성이 떨어진다고 할 수 있으며, 무엇보다 서브미크론의 형상오차는 수정가공이 거의 불가능하다. 이에 대한 대안으로, 최종시스템에서 오차 보정 매핑을 통하여 운동오차의 영향을 제거하는 방법이 현실적으로 주로 적용되며, 스테이지 레벨에서의 운동오차 제거를 위하여 공기베어링에 능동 제어 요소를 추가하여 운동오차를 제거하는 연구가 일부 진행된 바 있다.

Yamaguchi 등은 공기베어링 패드와 테이블 사이에 압전 액츄에이터를 장착한 능동 공기베어링(Active air bearing)을 제안하고 이를 이용하여 유체면과 고체면을 조합하여 참조면으로 사용하는 운동오차의 능동 제어 시스템을 구성하여, 수직방향 직선운동오차를 0.14  $\mu\text{m}$ , 각운동오차를 0.14 sec 까지 보정한 바 있으며,<sup>4</sup> Oiwa 등은 초음파 가진으로 공기유막을 형성하는 공기베어링을 제안하고 진폭 제어를 통한 간극제어 특성을 이용 운동오차 보상에 적용한 바 있다.<sup>5</sup> Mizumoto 등은 능동 압력제한 장치로 공기베어링의 급기압력을 제어하는 방법을 이용하여, 베어링 간극을 용량형 센서를 이용하여 폐환제어함으로써, 무한 강성을 얻도록 하거나,<sup>6</sup> 운동오차의 제어 등에 적용한 예가 있다.<sup>7-9</sup> 이 외에 다공질 공기베어링과 전자기 베어링을 조합하거나,<sup>10</sup> 보이스 코일 액츄에이터와 전자석을 사용하여 공기베어링의 진동제어나 자세제어 등에 적용한 연구사례를 찾아볼 수 있다.<sup>11,12</sup>

대부분의 기존 연구에서는 폐환제어(feedback control) 방식을 적용하고 있는데, 이는 주로 사용된 피에조 액츄에이터의 특성 자체가 비선형성과 이력특성(Hysteresis loop)을 가지고 있기 때문이기도 하며, 폐환제어를 통하는 것이 기준(reference) 자체의 정밀도만 확보된다면 강인한 결과를 얻을 수 있기 때문이다. 그러나 운동오차를 폐환제어할 경우, 측정 시스템이 포함되어야 하며, 베어링 설계시부터 압전소자를 포함한 시스템을 설계하여야 하는 등의 어려움 때문에 실용화에 어려움이 있다. 그러나, 정압베어링의 운동오차의 반복오차가 작은 것을 감안하면,<sup>13</sup> 폐환제어를 이용하지 않고 능동 보정으로 보상이 가능하다.

본 연구는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같이, 공기베어링 스테이지에 영구자석 및 전자석의 조합을 통한 자기예압을 적용하고 자기예압을 제어하여 테이블의 운동오차를 능동적으로 보정하는 것을 목

표로 한다. 특히 운동오차의 보정은 페루프 제어를 적용하지 않고 운동오차 측정을 통하여 반복정밀도 내에서 보정하는 방식을 적용하여 운동오차를 최소화하도록 한다. 페루프 제어 시스템을 적용하지 않음으로써 고가의 장치를 항상 적용할 필요가 없어 실용성에 유리할 것으로 기대된다.

본 논문에서는 2 장에서 제안된 능동 자기예압을 가진 1 축 스테이지에 대해 개략적으로 소개하고,<sup>15</sup> 3 장에서 3 자유도의 운동오차를 보정하기 위해 적용된 방법을 설명하였으며, 4 장에는 수직 진직도, 피치, 롤 오차의 3 자유도 운동오차를 높은 공간분해능을 가지고 측정하기 위하여 레이저 간섭계와 2 점법을 혼합한 측정방법에 대하여 논하였으며, 5 장에서는 측정된 결과와 이를 앞먹임 보상법(Feedforward compensation)을 적용하여 운동오차를 보정결과를 나타내었다.

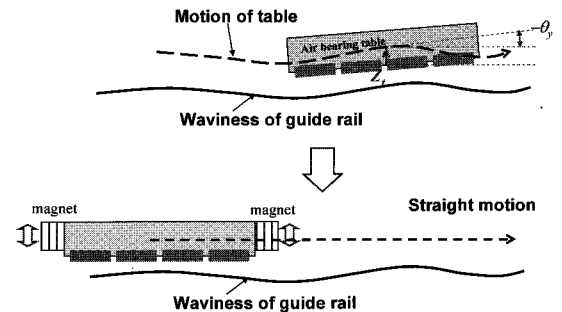


Fig. 1 active compensation of motion error for straight motion

## 2. 능동자기예압 공기베어링 스테이지<sup>15</sup>

다음의 Fig. 2 는 제안된 능동 자기예압을 갖는 스테이지의 개념도를 나타내고 있다. 테이블의 하부면에 위치한 공기베어링 패드들은 일종의 비선형 스프링의 특성을 갖게 되며, 양쪽 모서리에 있는 자기예압 장치의 인력이 작용하여 공기베어링에 예압력을 제공하는 구조이다. 자기예압 장치는 공기베어링의 강성 및 하중용량을 고려하여 설계된 자기예압을 발생시키기 위한 영구자석 및 철심과 영구자석에서 발생한 자기력을 제어하기 위한 코일로 구성되어 있다. 예압력의 제어는 디지털 제어시스템을 통하여 구성되며, 이송위치 (x)에 따른 운동오차 제어를 위한 제어기의 제어 출력은 각각의 전력증폭기를 통해 코일의 전류  $i_a$ ,  $i_b$  를 변화 시키게 된다. 예압력의 변화는 공기베어링의

강성에 의하여 공기베어링의 간극을 조절하게 되며, 결과적으로 테이블의 자세를 변화시키게 된다. Fig. 2 의 경우 2 자유도로 단순화한 경우이며, 이때 두 개의 예압조정 장치로 변경할 수 있는 자세는 수직방향 (z)과 피치 방향 ( $\theta_y$ )의 2 자유도가 된다.

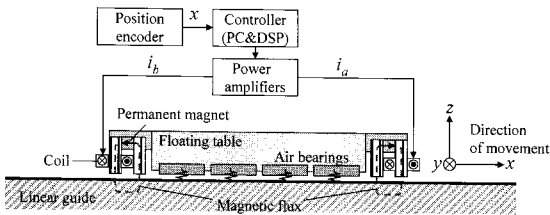


Fig. 2 Schematic diagram of an air-bearing table with magnetic preloads

이러한 능동 자기예압 공기베어링을 이용한 운동오차 능동보정 실험을 위하여 Fig. 3 에 나타난 것과 같은 1 축 실험 스테이지를 설계하고 제작하였다. 그림에서 알 수 있듯이 테이블의 수직방향 (z)에 대하여 4 개의 자기 예압 장치를 이용하여 자기예압을 발생시키고 있으며, 4 곳의 예압력 제어를 통하여 수직방향 (z), 피치 ( $\theta_y$ ) 및 롤 ( $\theta_x$ )의 3 자유도에 대한 자세 제어가 가능하다. 공기베어링은 다공질 패드를 이용한 베어링이며, 공기베어링

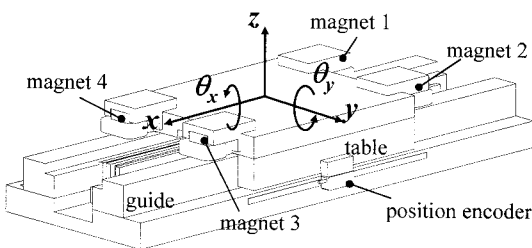


Fig. 3(a) Single-axis stage with magnetically preloaded air bearing for 3-DOF motion control<sup>15</sup>

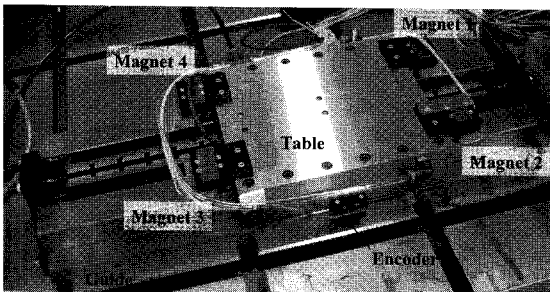


Fig. 3(b) Picture of manufactured 1-axis stage<sup>15</sup>

링과 예압력 및 제어력 발생을 위한 능동자기예압 장치는 수치해석을 통하여 설계되었다. 설계된 특성은 Table 1 에 나타나 있는 바와 같다. 테이블의 이송은 무철심형 선형모터를 사용하여 코깅을 최소화 하였고, 0.1m 분해능의 광학식 선형 엔코더를 이용하여 테이블의 이송위치를 측정한다. 테이블의 이송 및 예압력의 제어를 위하여 DSP 기반의 제어기를 적용하였다.

Table 1 Designed air bearing stage with magnetic preload<sup>15</sup>

Item	Specifications
Air bearing pad size (W × L × t)	50 × 20 × 5 mm <sup>3</sup>
Air bearing clearance (vertical)	13.5 μm
Vertical air bearing stiffness	38.5 N/μm
Required preload (vertical)	250 N
Permanent magnet size	25 × 8 × 4 mm <sup>3</sup>
Table weight	10.0 kg
Magnetic preload	35.8 × 4 N
Current gain of an actuator	15.5 N/A

이때, 각각의 자기예압 장치 및 공기베어링의 특성이 균일하고, 3 자유도의 운동을 제어하는데 테이블의 자세와 제어 입력과의 관계가 선형적이면서 독립적인 특성을 갖는다면, 수직 및 피치, 롤 방향 자세는 각각의 제어입력( $u_z, u_{\theta_y}, u_{\theta_x}$ )과 제어게인( $K_z, K_{\theta_y}, K_{\theta_x}$ )을 이용하여 식(1)과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$z = K_z u_z, \theta_y = K_{\theta_y} u_{\theta_y}, \theta_x = K_{\theta_x} u_{\theta_x} \quad (1)$$

실제 제작된 스테이지의 제어 이득은 각 자유도의 입력에 대해 선형적이며 독립적이 되도록 보정될 수 있었으며, 수직방향 변위에 대해서  $K_z = -0.611 \mu\text{m/V}$ , 피치 운동에 대해서는  $K_{\theta_y} = 4.517 \text{ sec/V}$  그리고 롤 운동에 대해서는  $K_{\theta_x} = 2.328 \text{ sec/V}$  를 나타내었다.

### 3. 운동오차 능동 보정 개요

다음의 Fig. 4 는 본 연구에서 제안한 운동오차

의 능동 보상법에 대하여 설명하고 있다. 즉, 운동 오차를 측정 한 후, 이중 반복적인 부분에 대하여 이송 위치에 대해 모델링 하고, 이 값을 이용하여 운동오차 제어를 위한 제어신호를 계산하여 각 액츄에이터의 전류를 제어하는 방식을 가지고 있다.

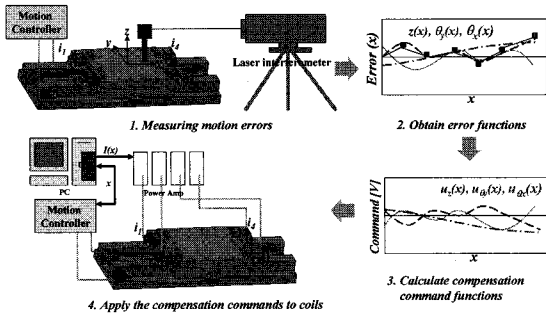


Fig. 4 Procedure of feedforward compensation of motion errors with active control of magnetic preloads

이러한 앞먹임 제어 방식이 적용되기 위해서는 측정된 운동오차의 반복오차가 작아야 하며, 제어 액츄에이터의 특성에 이력 특성(hysteresis)과 같은 비선형 특성이 작아야 정밀한 결과를 얻을 수 있다. 공기베어링 스테이지의 경우 운동오차의 반복 오차가 작으며, 제안된 능동자기예압 장치에서의 제어 특성이 선형성이 우수하기 때문에 이러한 제어 방법을 적용하는 것이 가능하다.

Fig. 5 에는 전체 스테이지의 제어시스템에 대한 블록선도를 나타내고 있다. 제어시스템은 테이블의 이송을 제어하기 위한 궤환제어 루프와 이송 제어 루프에서 계산된 테이블의 위치(x)에 대하여 운동오차 보정을 위한 제어 입력을 계산하는 개루프 제어계로 구성되어 있다. 제어 입력은 D/A 를 통하여 전력 증폭기로 인가되고 이를 통해 각 코일의 전류를 제어하게 된다.

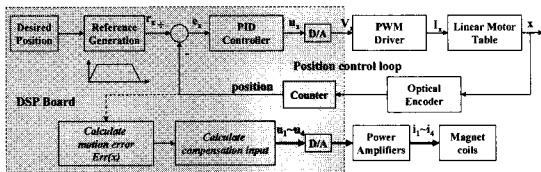


Fig. 5 Block diagram of the control system for the single-axis air bearing stage with active compensation of the motion errors.

4. 운동오차의 혼합 측정법

4.1.3 자유도 운동오차의 측정법

앞절에서 설명한 바와 같이 운동오차를 최소한의 오차로 보정하기 위해서는 3 자유도의 운동오차에 대하여 정밀한 측정법이 필요하다.

본 연구에서는 분해능이 높은 변위센서를 이용하고, 참조면의 오차를 분리할 수 있는 복합 이점법을 기본으로 채용하되,<sup>16-18</sup> 이점법 사용시 오차를 발생시킬 수 있는 각운동오차(피치)는 각운동오차의 측정 분해능이 우수한 레이저 간섭계를 이용하여 측정하였다.

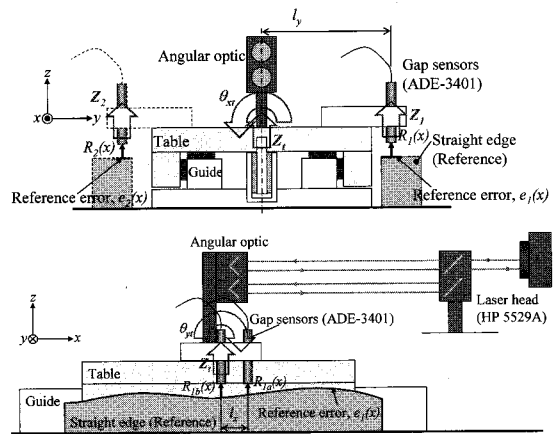


Fig. 6 Apparatus for measuring the vertical straightness, pitch, and roll errors

Fig. 6 은 본 연구에서 적용한 운동오차 측정법을 나타내고 있다. 우선 피치 오차를 측정하기 위한 방법으로 레이저 간섭계(HP 5529A)를 사용하였다. 이는 레이저 간섭계를 통한 피치 오차의 측정 정밀도가 우수하기 때문이다. 수직방향 진직도와 롤 오차의 측정은 변위 센서를 이용한 측차이점법과 이점법을 혼합한 방법을 사용하였다. 즉, 테이블의 중심에서  $l_1$  만큼 떨어진 양쪽 위치에서 각각 진직도 오차를 측정하여, 평균을 취하여 테이블 중앙부의 수직방향 진직도 오차를 구하여, 각 위치에서의 진직도 오차의 차이를  $2l_1$  로 나누어 롤 각운동 오차를 구하는 방법이다.

4.2 혼합 이점법을 이용한 진직도 측정

Fig. 6 의 한 쪽의 진직도  $z_1, z_2$  를 측정하기 위하여 두개의 변위센서를  $l_x$  만큼 떨어져 측정값  $R_{a1}, R_{b1}$  은 참조면의 오차  $e_f$  을 포함하여 다음과 같이 나타난다.

$$R_{1a}(x) = z_1(x) - l_x \theta_{y'}(x) - e_1(x + l_x) \quad (2)$$

$$R_{1b}(x) = z_1(x) - e_1(x) \quad (3)$$

여기서  $z_1(x)$ 는 중심에서 y 방향으로  $l_y$  만큼 떨어진 위치에서의 수직방향 변위를 나타내며,  $\theta_y$ 는 레이저 간섭계를 통하여 측정된 값을 적용한다. 이후, 테이블의 변위가  $l_x$  만큼 이동하였을 때의 센서의 측정값은 다음과 같다.

$$R_{1a}(x + l_x) = z_1(x + l_x) - l_x \theta_{y'}(x + l_x) - e_1(x + 2l_x) \quad (4)$$

$$R_{1b}(x + l_x) = z_1(x + l_x) - e_1(x + l_x) \quad (5)$$

이때, (2)과 (3), (5)를 이용하여 수직방향 변위와 참조면의 오차를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$e_1(x + l_x) = e_1(x) + R_{1b}(x) - R_{1a}(x) - l_x \theta_{y'}(x) \quad (6)$$

$$z_1(x + l_x) = z_1(x) + R_{1b(x)} - R_{1a}(x) - l_x \theta_{y'}(x) + R_{1b}(x + l_x) \quad (7)$$

(6), (7)을 이용하여 순차적으로 참조면의 오차 및 테이블의 오차를 계산할 수 있다. 이때, 시작위치에서  $l_x$  까지의 위치값은 일반적인 이점법을 이용하여 (8)과 같이 구하게 된다.

$$e_1^*(x + \Delta x) = e_1(x) + \{ (R_{1b}(x) - R_{1a}(x)) / l_x - \theta_{y'}(x) \} \Delta x \quad (8)$$

여기서  $\Delta x$ 는 이송 중 측정 간격을 나타낸다. 측정된 데이터에 대하여 초기위치의 측정값을 다음과 같이 정의하고 각각의 이송스텝에 대하여 측정하게 된다.

$$z_1(0) = 0, e_1(0) = 0, \theta_{y'}(0) = 0, R_{1b}(0) = 0 \quad (9)$$

이러한 두개의 프로브를 이용한 측정법의 문제점은  $R_{1a}(0)$ 의 값을 어떻게 설정하느냐에 있다. 정확한 측정을 위해서는 다음의 관계를 가지고 있어야 한다.

$$R_{1a}(0) = z_1(l_x) - l_x \theta_{y'}(l_x) - e_1(l_x) \quad (10)$$

(10)과 같은 관계가 성립되기 위해서는 두 센서의 초기 영점 설정이 정확하여야 하며, 그렇지 않을 경우 측정된  $R_{1a}(0)$  값에 초기 영점설정 오차가 포함되게 된다. 이러한 영점 오차는 진직도를 계산하는 과정에 계속 적분이 되기 때문에, 전체적으로 계산된 값에 기울기 성분을 만들게 된다. 또한, 이렇게 생긴 기울기 성분은 참조면의 기울기를 나타내는 것인지, 실제 운동의 기울기를 나타내는 것인지를 알 수 없게 된다. 그러나, 진직도(Straightness)의 정의 차제가 직선 성분을 제외하는 것을 의미하므로, 이렇게 측정된 값에서 위치의 1차 성분을 제거할 수 있다. 그러나 이렇게 계산된 진직도 오차만으로는 테이블 운동의 1차성분을 알 수 없어, 롤 오차의 측정에 문제점을 발생시킨다.

### 4.3 수직 진직도 및 롤오차의 계산법

수직 진직도와 롤 오차를 테이블 이송위치(x)에 따른 0 차(상수)항과 1 차(기울기)항, 그리고 고차항의 함수로 나타내 보면 다음과 같다.

$$z_i(x) = z_{i0} + z_{i1}x + z_i'(x) \quad (11)$$

$$\theta_{xi}(x) = \theta_{xi0} + \theta_{xi1}x + \theta_{xi}'(x) \quad (12)$$

수직방향 진직도라고 할 때, 진직도의 정의에 의하여  $z_i$ 의 0 차항( $z_{i0}$ )과 1 차항( $z_{i1}$ )을 무시할 수 있다. 따라서 앞절의 복합 2 점법을 이용하여 참조면 오차를 제거하여 각 부분에서 측정된 수직방향 진직도  $Z_1'$ ,  $Z_2'$ 를 이용하면, 식(15) 및 (16)과 같이 테이블 중심에서의 수직 진직도와 일차항을 제외한 롤 오차를 측정할 수 있다.

$$Z_1'(x) = z_i'(x) + l_y \theta_{xi}'(x) \quad (13)$$

$$Z_2'(x) = z_i'(x) - l_y \theta_{xi}'(x) \quad (14)$$

$$z_i'(x) = \frac{Z_1'(x) + Z_2'(x)}{2} \quad (15)$$

$$\theta_{xi}'(x) = \frac{Z_1'(x) - Z_2'(x)}{2l_y} \quad (16)$$

여기서 롤오차의 1 차항 ( $\theta_{xi1}$ ) 혹은 기울기 성분이

발생하는 가장 흔한 경우는 양쪽의 안내면이 서로 다른 기울기를 가지고 있는 경우이며, 이때 이송 변위에 비례한 롤 운동이 발생되게 된다. 이러한 1 차 성분의 롤오차는 본 방법을 통하여 측정할 수 없으므로, 정확한 롤오차의 측정을 위해서는 다른 방법을 적용하여야 한다. 변위센서를 이용하는 운동오차 측정에 있어서, 반전법을 적용하는 방법도 있으나, 역시 양쪽 측정시 참조면이 기울어져 생기는 각도 오차를 포함한 두 참조면의 오차를 동일하다고 할 수 없기 때문에 반전법 사용이 불가능 하다.

따라서 본 연구에서는 전자수준계(Electronic Level Meter)를 추가로 사용하는 방법을 적용하였다. 전자수준계는 내부의 추의 이동을 정밀하게 측정하는 것으로 각운동오차 분해능은 0.1sec 이나, 응답속도가 늦고 진동에 민감하여, 빠른 속도나 높은 가속속도로 이송 정지를 반복하는 경우에는 측정오차가 커질 수 있는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 복합 2 점법을 이용하여 양쪽에서의 수직방향 진직도를 측정하여 식(16)을 이용하여 테이블 중심에서의 진직도와 기울기향을 제외한 롤오차를 계산한 후, 전자수준계로 측정한 롤오차의 기울기  $\theta_{roll}$  를 이용하여 수직 진직도와 같은 공간분해능의 롤 운동오차를 계산하였다.

### 5. 오차 측정 및 보정 실험 결과

3.2 절에 나타난 측정방법을 위한 측정장치 셋업은 Fig. 7(a)와 Fig. 7(b)와 같다. 센서는 ADE 사의 Microsense 3401 모델이 사용되었으며, 각 센서의 민감도는 센서 A 의 경우  $2.36\mu\text{m}/\text{V}$ , 센서 B 의 경우  $2.45\mu\text{m}/\text{V}$  이다. 참조면으로 사용된 Straight edge (NIKON 사)는 전체 길이 340mm 에서 평탄도  $0.05\mu\text{m}$  이하의 제품으로 재질은 열변형이 없는 제로돌(Zerodur)로 되어 있으며, 용량형 센서의 측정을 위하여 알루미늄 코팅이 되어 있다. 변위센서의 고정은 강성과 열변형을 고려하여 알루미늄 세라믹으로 되어있는 고정 지그를 사용하였다. 다음의 Fig. 7(a)는 이러한 측정 셋업의 사진을 나타내고 있으며, Fig. 7(b)는 롤오차 측정을 위하여 전자수준계를 장착한 사진을 나타내고 있다. 여기서 테이블 중심에서 측정 센서까지의 거리  $l_s = 129.5\text{mm}$  이며, 두 센서의 거리  $l_x = 17\text{mm}$  이며, 측정간격  $\Delta x$  는 이송속도  $20 \text{ mm}/\text{sec}$  에서 약  $0.0625\text{mm}$  이다.

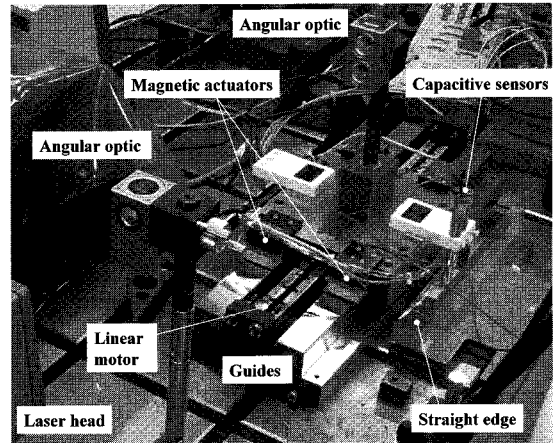


Fig. 7(a) Experimental set-up of measurement for motion errors

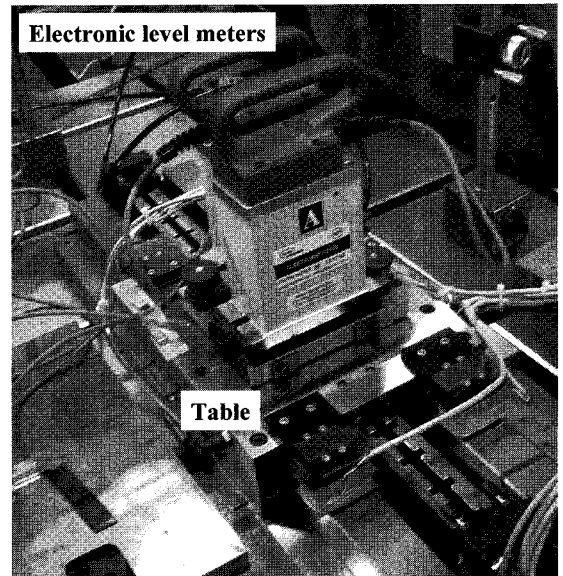


Fig. 7(b) Set-up of roll error measurement with electronic level meters

각각의 측정은 5 회씩 이루어졌으며, 1 번 위치에서 레이저 간섭계와 변위센서를 이용하여 5 회 측정후, 센서와 참조면(Straight edge)을 2 번 위치로 옮겨 역시 5 번을 측정하였다. 레이저 간섭계로 측정된 피치오차의 평균을 취하여, 해당 프로파일을 각 위치에서의 수직방향 운동계산시 피치오차값으로 사용하였다. 이렇게 5 번의 측정 반복정밀도에 대하여 표기하였다.

측정시 테이블은  $20 \text{ mm}/\text{sec}$  의 속도로 이송하였으며, 가속도는  $500 \text{ mm}/\text{sec}^2$  이다. 공기베어링의 압력은  $0.4 \text{ MPa}$  를 적용하였으며, 측정신호에 포함된

테이블의 진동영향을 제거하기 위하여 20 Hz 로 저역통과 필터링을 수행하였다.

다음의 Fig. 8 은 측정된 3 자유도의 운동오차를 나타내고 있다. 피치오차의 경우는 5 번의 측정결과를 중첩하여 나타내었으며, 수직방향 진직도 오차는 5 번 측정값을 평균한 것을 도시하였다.

피치오차의 경우 운동오차는 9.42 sec 이며, 이때의 반복정밀도  $\pm 2\sigma$ 값으로  $\pm 0.181$  sec 의 값을 나타내었다. 또한 수직방향 진직도 오차의 경우  $1.09 \mu\text{m}$  의 오차를 보였으며 이때의 반복정밀도는  $\pm 0.085 \mu\text{m}$  이다. 롤오차의 경우는 복합 이점법으로 구한 값을 전자 수준계의 측정결과에서 나타난 기울기로 보정한 값을 나타내었다. 롤 오차의 값은 2.417 sec 이며, 이때의 반복정밀도는  $\pm 0.113$  sec 로 나타났다.

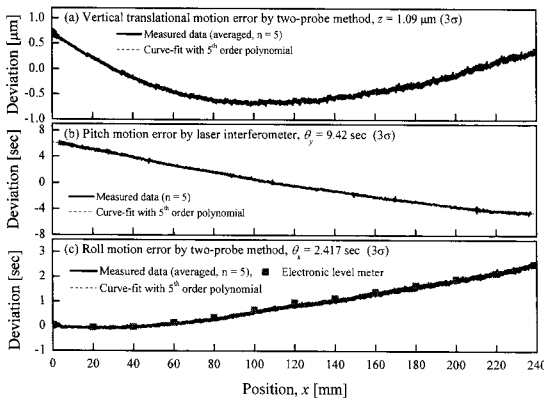


Fig. 8 Uncompensated three DOF motion errors

전체적인 형태는 주기가 500 mm 이상으로 예상되는 성분이 주를 이루고 있어, 피치오차에는 주로 선형 성분이 주를 이루고 있음을 알 수 있다. 또한 롤 오차의 경우 이송변위의 1 차항, 혹은 기울기 성분이 역시 주를 이루고 있어 두 레일 사이의 기울기 차이가 있음을 알 수 있다. 그림에서 점선으로 나타난 곡선은 이러한 운동오차의 평균값을 테이블의 이송위치에 대해 모델링하기 위한 곡선을 나타내며, 본 연구에서는 5 차 다항식(5<sup>th</sup> order polynomial function)을 적용하였다.

Fig. 8 의 측정된 결과를 모델링한 오차 함수를 이용하여 다음과 같이 제어 입력을 결정할 수 있다. 여기서  $K_z$ ,  $K_{\theta_y}$ ,  $K_{\theta_z}$  는 2 장에 나타난 제어 이득값이다.

$$u_z(x) = -\frac{E_z(x)}{K_z}, \quad u_{\theta_y}(x) = -\frac{E_{\theta_y}(x)}{K_{\theta_y}}$$

$$u_{\theta_z}(x) = -\frac{E_{\theta_z}(x)}{K_{\theta_z}} \quad (17)$$

이렇게 결정된 제어입력 및 각 코일에서의 제어전류를 계산하면 Fig. 9 와 같다.

각 운동의 제어입력의 크기는 2.8~3.2 V peak-to-peak 정도의 값을 가지고 있음을 알 수 있으며, 각 코일에 인가되는 전류의 크기를 보면 최대값이 1.4 A 를 넘지 않음을 알 수 있다. 각 코일의 저항값을 고려하면, 최대 전력손실은 6.86 W 이며, 1 번 및 4 번 코일에서의 전류값이 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다. 이는 롤 및 피치 각운동 보정을 위한 제어입력 때문이며, 각운동오차가 이송위치의 양 끝단에서 크게 나타나기 때문이다. 단, 40~200 mm 범위에서는 모든 제어전류의 크기는 1A 이하로 유지되고 있다.

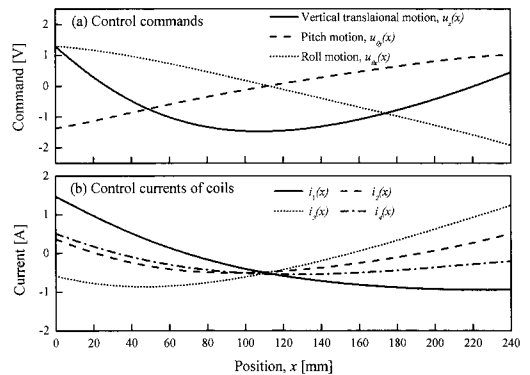


Fig. 9 Calculated control inputs and currents

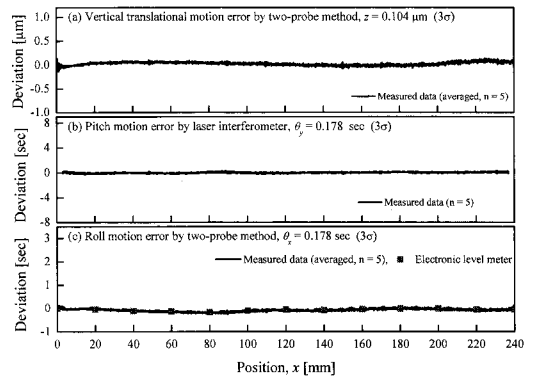


Fig. 10 Compensated three DOF motion errors

이러한 제어 입력값을 통하여 능동 보정시 측정된 운동오차는 Fig. 10 과 같다. 역시 각 5 회의 측정을 통하여 나타낸 것으로 롤오차의 경우는 전자수준계의 측정값을 같이 표시하였다. 능동보정에 의하여 측정된 결과로 수직방향 진직도는 보정전의 1.09  $\mu\text{m}$  에서 0.104  $\mu\text{m}$  로, 피치오차는 9.42 sec 에서 0.178 sec, 롤 오차의 경우 2.417 sec 에서 0.178 sec 로 감소한 것으로 나타났다. 측정된 반복정밀도는 수직방향 오차의 경우  $\pm 0.09 \mu\text{m}$ , 피치오차의 경우  $\pm 0.12 \text{ sec}$ , 롤오차의 경우  $\pm 0.11 \text{ sec}$  로 나타났다. 즉, 보정된 운동오차는 거의 측정의 반복정밀도와 비슷한 크기를 갖고 있음을 알 수 있어, 보정할 수 있는 한계에 가까운 특성을 보인다고 할 수 있으며, 본 연구에서 제시한 방법의 유용성을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 공기정압 베어링을 이용한 선형 스테이지의 운동오차의 최소화를 위한 방법으로 능동형 자기예압 방식을 제안하고, 제작된 1 축 실험시스템의 수직 진직도, 피치, 롤의 3 개 자유도에 대한 운동오차 능동보정을 수행하였다.

3 자유도의 오차측정을 위하여 레이저 간섭계와 두개의 변위센서를 이용한 복합 이점법, 롤오차의 선형 항을 전기레벨 메터로 보정한 롤 오차 측정법을 적용하여 수직 진직도의 반복정밀도  $\pm 0.08 \mu\text{m}$ , 각운동오차 반복정밀도를  $\pm 0.113 \text{ sec}$  로 측정할 수 있었다. 측정된 운동오차는 수직방향 진직도 1.09  $\mu\text{m}$ , 피치오차 9.42 sec, 롤 오차 2.417 sec 이며, 측정된 운동오차를 변위의 함수로 모델링하여 앞먹임 제어 능동 보정하도록 하였다. 능동 보정 결과 각각 0.104  $\mu\text{m}$ , 0.178 sec, 0.178 sec 로 운동오차의 측정 반복오차 수준과 비슷한 크기까지 보정이 가능하였다.

본 연구에서 제시된 방법은 운동오차의 반복정밀도까지의 보정이 가능하므로, 측정정밀도와 운동오차의 반복정밀도만 높일 수 있으면, 높은 정밀도의 보정이 가능하다.

따라서 이러한 방법은 긴 행정을 갖는 공기베어링 스테이지에 있어 직진 운동성을 향상시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 적절한 운동오차의 측정 시스템을 조합한다면 폐환제어 방법의 적용도 가능하며, 이 경우 좀더 강인한 특성을 얻을 수 있을 것이다.

## 참고문헌

1. Wunsch, H. L., "The Design of Air Bearing and Their Application to Measuring Instruments and Machine Tools," *International J. of Machine Tool Design and Research*, Vol. 1, pp. 198-212, 1961.
2. Fukada, S. and Nishimura, K., "Nanometric Positioning over a One Millimeter Stroke Using a Flexure Guide and Electromagnetic Linear Motor," *International J. of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 8, No. 2, pp. 49-53, 2007.
3. Park, C. H., Lee, C. H. and Lee, H., "Corrective Machining Algorithm for Improving the Motion Accuracy of Hydrostatic Table," *J. of KSPE*, Vol. 19, No. 6, pp. 62-69, 2002.
4. Yamaguchi, J., Sato, K., Aoyama, H. and Shimokobe, A., "Measurement and Control of Straight Motion Accuracy Using a Liquid Surface for Absolute Reference," *J. of JSPE*, Vol. 57, No. 3, pp. 128-133, 1991.
5. Oiwa, T. and Kato, M., "Squeeze Air Bearing Based on Ultrasonic Oscillation: Motion Error Compensation Using Amplitude Modulation," *Review of Science Instruments*, Vol. 75, No. 11, pp. 4615-4620, 2004.
6. Mizumoto, H., Tanaka, H., Okuno, K., Matsumura, T. and Kawakami, R., "An Infinite Stiffness Aerostatic Bearing with an Exhaust Control Restrictor," *J. of JSPE*, Vol. 57, No. 11, pp. 164-169, 1991.
7. Mizumoto, H., Ari, S., Yamamoto, T., Takata, Y. and Kami, Y., "An Ultraprecision Aerostatic Guideway Controlled by Active Inherent Restrictors," *J. of JSPE*, Vol. 63, No. 11, pp. 1543-1547, 1997.
8. Mizumoto, H., Yabuya, M., Kami, Y. and Ari, S., "Ultraprecision Positioning System Using Aerostatic Guideway as Motion-Reduction Mechanism," *J. of JSPE*, Vol. 67, No. 9, pp. 1524-1529, 2001.
9. Mizumoto, H., Yabuta, Y., Ari, S., Yabuya, M. and Tazoe, Y., "A Dual-Mode Pico-Positioning System Using Active Aerostatic Coupling," *International J. of Precision Engineering & Manufacturing*, Vol. 8, No. 2, pp. 32-37, 2007.
10. Hara, S., Kwakami, R., Echigo, K. and Kubo, M., "The Accuracy Improvement of Porous Air Bearing by Magnetic Compensation," *Proceeding of 5th*



- Symposium on Dynamics Related with Magnetic Force, Japan Society of AEM, pp. 305-308, 1993.
11. Satomi, T., "Studies on the Aerostatic Guiding System: Improvement of Damping Characteristics and Prevention of Self-excited Vibration by Electromagnetic Control," J. of JSPE, Vol. 51, No. 12, pp. 2259-2264, 1985.
  12. Lee, S. Q. and Gweon, D. G., "A New 3-DOF Z-tilts Micro Positioning System Using Electromagnetic Actuators and Air Bearings," Precision Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 24-31, 2000.
  13. Park, C. H., Oh, Y. J., Shamoto, E. and Lee, D. W., "Compensation for Five DOF Motion Errors of a Hydrostatic Feed Table by Utilizing Actively Controlled Capillaries," Precision Engineering, Vol. 30, No. 3, pp. 299-305, 2006.
  14. Park, C. H. and Lee, H., "Motion Error Analysis of the Porous Air Bearing Stages Using the Transfer Function," J. of KSPE, Vol. 21, No. 7, pp. 185-194, 2004.
  15. Ro, S. K., Kim, S., Kwak, Y. and Park, C. H., "Study on the Air Bearings with Actively Controllable Magnetic Preloads for Ultra-precision Linear Stage," J. of KSPE, Vol. 25, No. 6, pp. 134-142, 2008.
  16. Gao, W. and Kiyono, S., "High Accuracy Profile Measurement of a Machined Surface by the Combined Method," Measurement, Vol. 19, No. 1, pp. 55-64, 1996.
  17. Park, C. H., Chung, J. H., Kim S. T. and Lee, H., "Development of a Submicron Order Straightness Measuring Device," J. of KSPE, Vol. 17, No. 5, pp. 124-130, 2000.
  18. Gao, W., Yokoyama, J., Kojima, H. and Kiyono, S., "Precision Measurement of Cylinder Straightness Using a Scanning Multi-probe System," Precision Engineering, Vol. 26, No. 3, pp. 279-288, 2002.