

# 리니어모터를 이용한 초정밀 공기정압안내면 개발

박종하\*, 황주호<sup>+</sup>, 박천홍<sup>+</sup>, 홍준희<sup>++</sup>

## Development of a Aerostatic Guideway Driven by the Linear Motor

Jong Ha Park\*, Joo Ho Hwang<sup>+</sup>, Chun Hong Park<sup>+</sup>, Jun Hee Hong<sup>++</sup>

### Abstract

In order to discuss the availability of aerostatic guideways driven by the coreless linear motor to ultra precision machine tools, a prototype of guideway is designed and tested in this research. A coreless linear DC motor with the continuous force of 156N and a laser scale with the resolution of  $0.01\mu\text{m}$  are used as the feeding system. The experiments are performed on the static stiffness, motion accuracy, positioning accuracy, microstep response and variation of velocity. The guideway also has  $0.21\mu\text{m}$  of positioning error and  $0.09\mu\text{m}$  of repeatability, and it shows the stable response against the  $0.01\mu\text{m}$  resolution step command. The velocity variation of feeding system is less than 0.6%. From these results, it is confirmed that the aerostatic guideway driven by the coreless linear motion is very useful for the ultra precision machine tools.

**Key Words :** Aerostatic guideway(공기정압안내면), Coreless linear motor(무철심형 리니어모터), Axial stiffness(축 방향 강성), Positioning error(위치결정오차), Velocity variation(속도변동)

## 1. 서론

초정밀 가공 및 미세가공기술의 발전으로 기계요소부품, 광학소자, 반도체웨이퍼, 금형가공, 초정밀비구면 렌즈, 반사경등의 수요는 급격히 증가하고 있다. 이러한 가운데 위와 같은 제품을 가공할수 있는 초정밀 가공기에 대한 수요는 계속적인 증가 추세를 보이고 있다.

초정밀 가공기의 가공정밀도는 가공기를 구성하는 운동요소에 의해 매우 큰 작용을 하며 특히 안내면에 의해 정밀도는 크게 좌우되고 있다. 초정밀가공기는 비구면 가공등을 위해서  $0.01\mu\text{m}$ 대의 높은분해능과 함께 서브미크론대의 직선운동정밀도가 요구되고 있다. 이러한 조건에 따라 저마찰특성으로, 청정환경유지, 높은운동정밀도의 특성을 가지고 있는 공기정압안내면을 많이 채용하고 있다.<sup>1,2</sup>

\* 주저자, 충남대학교 기계공학과 대학원(smjongha@freechal.com)  
주소: 305-764 대전광역시 유성구 궁동 220번지 충남대학교  
+ 한국기계연구원  
++ 충남대학교

한편, 18세기 중반에 발명되어 현재까지 리니어 모터는 매우 많은 부분에 응용되고 있다. 구조가 복잡하지 않으며 에너지 손실이나 소음을 발생하지 않는 것은 물론이고 운전속도에도 제한을 받지 않는 등의 특유의 이점이 있어 각종 자동화 시스템분야의 핵심구동장치로 응용개발이 날로 확대되고 있다.<sup>3,4</sup> 이러한 특성에 따라 초정밀 가공기 설계자들에게 있어서도 설계 및 조립면에서 편리성이 뛰어난 리니어 모터를 적용하고자 하는 요구가 급증하고 있으나, 실제적용사례 및 특성검토등을 보고한 예는 극히 적어 적용하는데 많은 어려움을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 요구에 대응하기 위해, 리니어모터를 이용한 공기정압안내면을 설계/제작하고, 초정밀 가공기에 적용하기에 필요한 기본적인 특성들을 실험적으로 분석하여 적용가능성을 검토하고자 하였다. 수평방향, 수직방향 정강성 실험을 통해 절삭력의 부가에 따른 부하특성을 해석하였다. 위치결정정밀도의 미소분해능 실험을 통해 초정밀 안내면으로서의 적용가능성을 분석하였으며, 또한 절삭가공에 필요한 저속에서의 속도 변동특성의 분석을 통해 실용화상의 문제점도 파악하고자 하였다.

## 2. 공기정압안내면 이송계의 구성

Fig.1은 실험에 사용된 공기정압 스테이지다. 카본 그래파이트 재료로 구성된 공기정압베어링을 사용하고 있고, 더블패드방식으로 상하운동을 구속하고 있으며, 구동은 Anorad사의 LEM-S-4-S 무철심형 리니어 DC모터를 사용하였으며, 최대행정은 250mm이다. 공기정압안내면의 구조는 조립의 편리성 및 구조강성을 고려하여, 레일이 공기정압베어링을 감싸는 역구속형으로 설계하였다

위치검출은 Sony사의BSA75A-310N 레이저스케일, 정밀도 0.28 $\mu$ m을 사용하였으며 스케일은 테이블 측면에 설치하였으며 이에따른 Abbe offset 오차는 실험을 통해서 소프트웨어적으로 보정하였다. 열팽창계수가  $0.7 \times 10^{-6}$ 의 zerodur glass위에 간섭에 의한0.55 $\mu$ m의 광학적 grating pitch를 생성하여 기존의 리니어스케일보다 매우 정밀한 특성을 가지고 있다. 제어기에서 4채배된 후 최종분해능은 10nm이며, 광경로가스케일 head 안에서 생기기 때문에 대기의 온도, 압력등, 습도등의 변화에 의한 영향이 거의 없는 장점이 있다.

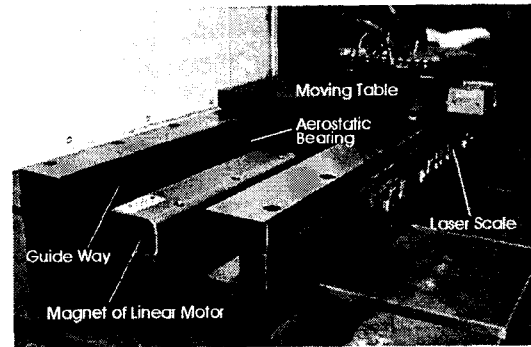


Fig.1 Photograph of aerostatic stage

## 3. 안내면의 성능실험 및 고찰

### 3.1 실험방법

실험은 총 6가지로 수행 하였으며 다음과 같다. 안내면의 정강성, 운동정밀도, 위치결정정밀도 및 반복정밀도, 미소이송분해능 및 속도 변동특성 등에 대해 수행하였다. 정강성은 수평방향, 수직방향을 실험하였다. 수평방향은 로드셀을 설치하고 스크류로 하중을 가했을때 테이블 변위를, 전기마이크로 미터(분해능 0.01 $\mu$ m, Mahr)를 4곳에 설치하여 측정하고 평균값으로부터 계산 하였다. 수직방향 실험은 10개의 Mass(2Kg $\times$ 10)를 테이블 위면에 1개씩 증가시키면서 테이블 끝단에 4개의 전기마이크로미터를 설치하여 측정하고 평균값으로부터 계산하였다. 운동정밀도, 위치결정정밀도 및 반복정밀도는 테이블 중앙에 반사경을 설치하고 레이저 간섭계(5529A, HP)를 이용하여 측정하였다. 미소이송특성은 테이블 끝단의 중앙부에 정전용량형 센서(Microsense 3401, ADE, 분해능 1nm)를 설치하고 0.01, 0.02 $\mu$ m/step 이송에 대한 응답특성을 측정하였다

### 3.2 안내면의 정강성

Fig.2에 수평방향 및 수직방향에 대한 정강성 측정결과를 나타내었다. 먼저 수평방향 실험결과는 38N/ $\mu$ m로 나타내고 있다. 이것은 Fig1의 공기정압안내면의 구조를 보게되면 수평방향 레일의 두께가 얇으므로, 공기정압패드에 작용하는 면압에 의해 수평방향 레일이 탄성변형을 일으키게 되고 이에 따라 정강성이 감소되기 때문에 나타나는 결과이

다. 수직방향 실험결과 $246\text{N}/\mu\text{m}$ 를 보이고 있는 것을 알 수 있다.

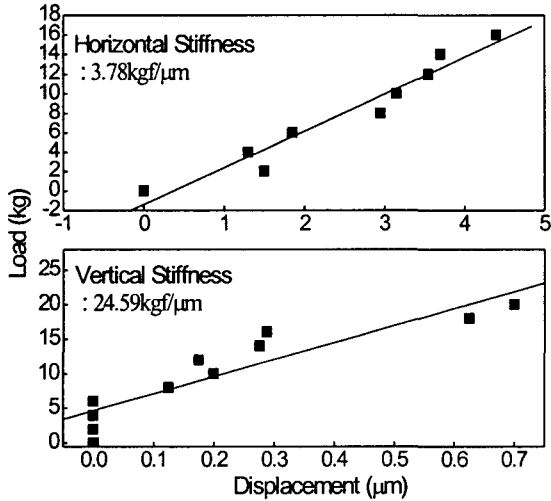


Fig.2 Static stiffness of guideway in the vertical and horizontal direction

### 3.3 운동정밀도

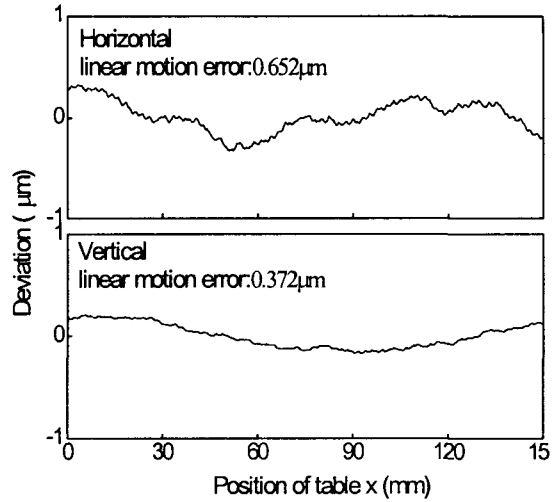
Fig.3 은 공기정압안내면 수평방향 운동정밀도와 수직방향 운동정밀도의 측정결과를 나타내었다. 운동정밀도는 테이블중앙에 반사경을 설치하고 레이저 간섭계(5529A,HP)를 이용하여 측정하였다. 측정결과 수직방향 운동정밀도는  $0.372\mu\text{m}$ 이고 수평방향 운동정밀도는  $0.652\mu\text{m}$ 의 결과를 보이고 있다.

### 3.4 미소분해능

스테이지의 최소위치검출 분해능인  $10\text{nm}/\text{step}$ 와 그의 2배인  $20\text{nm}/\text{step}$ 으로 5초 간격으로운동시킨 후 정전용량형 센서로 측정한 결과를 Fig.4에 도시하였다. 두 경우 모두 두 운동명령에 대하여 정확하게 반응함을 알 수 있다.

그림으로부터 테이블은, 실험에 사용한 레이저스케일의 최소 분해능인  $0.01\mu\text{m}/\text{step}$ 의 분해능까지 명확히 추종하고 있음을 보이고 있으며, 왕복운동에 있어서의 구조적 비대칭에 기인하는 비선형 변위특성이나 로스트모션 등은 발생하지 않음을 확인 할 수 있다. 한편  $0.01\mu\text{m}/\text{step}$ 의

측정결과에 있어, 시작점과 끝점의 상대 위치가 약  $6\sim 7\text{nm}$ 정도 차이가 나는 것은, 스케일의 전기적이 체배의 최소값이  $0.01\mu\text{m}$ 이므로 그 이하의 값에 대한 직선성이 떨어지는



것이 주요 원인이라고 판단된다.

Fig.3 Motion error of aerostatic stage

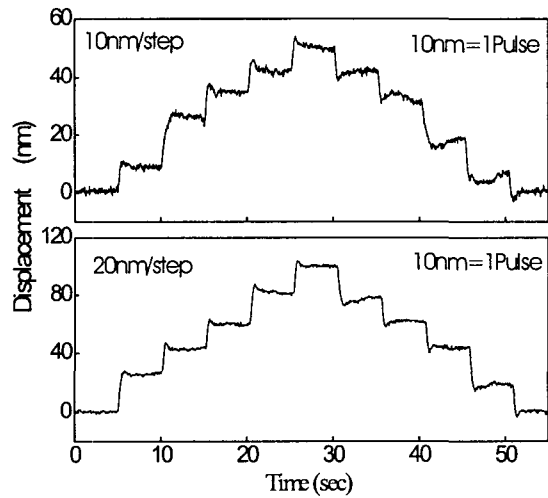


Fig.4 Micro step response of stage

### 3.5 위치결정 정밀도와 반복정밀도

측정기에 사용된 HP사의 레이저간섭계(HP5529A)는 공기 굴절률과 사용된 레이저 파장을 고려하여 보정계수C를 사용하고 있

다. 보정에 활용된 식은 식(1)과 같으며 온도, 압력, 습도를 고려하고 영향이 적은 CO<sub>2</sub> 함유량은 무시하였다<sup>5</sup>.

$$\Delta L_{true} = C_f \Delta L_{m\ measure} + \frac{C_f - C_i}{C_i} (L_i - L_r) \quad (1)$$

$$C = \frac{10^6}{N + 10^6}$$

$$N = 0.3836391P \times$$

$$\left( \frac{1 + 10^{-6} P (0.817 - 0.0133 T)}{1 + 0.0036610 T} \right)$$

$$- 3.033 \times 10^{-3} H \times e^{0.057627 T}$$

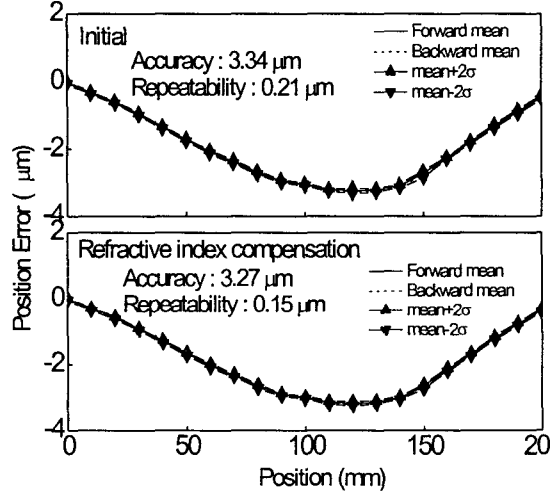


Fig.5 comparison of repeatability between before and after refractive index compensation

여기서 첨자 *i*는 초기값, *f*는 현재값 이며 *P*는 압력 (mmHg), *T*는 온도 (°C), *H*는 상대습도(%)이다. 여기서 압력은 setra사의 Model 270 Pressure Transducer를 설치하여 측정하였다. 공기베어링 스테이지의 반복정밀도를 측정 후 식(1)을 활용하여 보정을 수행하였다. 측정간의 동기화를 위하여 -10mm와 210mm 지점을 10mm 간격으로 왕복 5회 운동하였으며 테이블의 중앙에 반사경을 설치하여 측정을 수행하였다. 측정 구간은 0~200mm,  $L_i - L_r = 290$  소요시간은 22분이다 스테이지의 왕복운동시 보정을 수행한 결과를 Fig.5에 나타내었다. 온도편차는 0.26°C이며, 굴절을 보정 후 약 25%의 반복정밀도가 향상되어 0.15μm로 향상되었음을 알 수 있다. Fig.5의 측정결과로부터 평균 위치오차를 구하

여 이를 수치 보정한 결과를 Fig.6상단에 도시하였다. 실험 수행 동안의 온도편차는 약 0.15°C이며 수치 보정 후 위치결정 정도 뿐만 아니라 반복정밀도가 향상되었음을 알 수 있는데, 이는 양방향의 반전오차를 보정한 효과와 실험수행 동안 온도가 안정적인 영향으로 보여진다. 공기굴절을 보정한 결과 온도의 변화가 적어 측정오차 개선 정도가 크지는 않지만 스테이지의 반복정밀도는 0.10μm로 향상되었음을 알 수 있다.

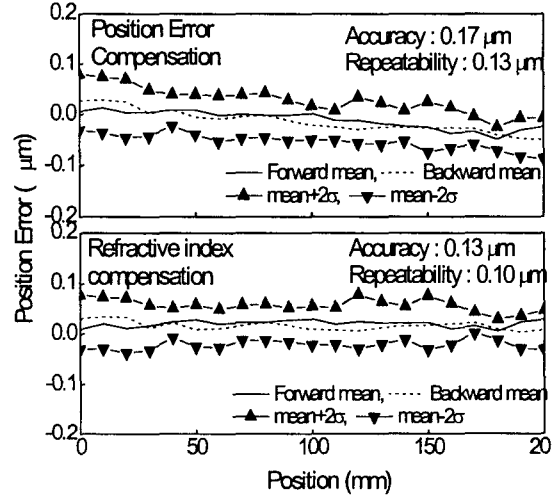


Fig.6 positioning accuracy of stage after compensating position error and refractive index index

### 3.7 속도특성

Fig.7은 초정밀 절삭가공의 일반적인 절삭속도 범위인 30mm/min 와 급속이송범위인 720mm/min 에서의 공기정 압안내면의 속도변동특성을 실험한 결과를 나타낸 것으로, 구형파에 대한 응답속도 측정결과로부터 안정된 정속구간의 측정값을 확대하여 나타낸 것이다. 이송속도는 지령속도와 정확히 일치하고 있으며, 속도의 최대변동값은 이송속도에 따라, 각각 1.1, 0.2mm/min를 나타내고 있다. 이것은 각각의 이송속도에 대해 0.6% 및 0.15%에 해당하는 값이므로, 매우 안정적으로 초정밀가공에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

### 4. 결론

리니어모터와 레이저 스케일을 활용한 초정밀 공기정압

스테이지를 제작하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

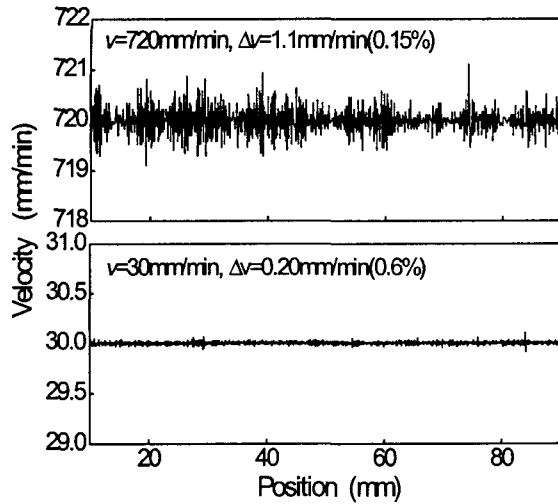


Fig.7 Velocity variation of guideway in the range of ultra precision cutting

1. 미소분해능 실험결과, 안내면은, 실험에 사용한 레이저 스케일의 최소분해능인  $0.01\mu\text{m}/\text{step}$ 의 분해능까지 응답특성이 정확하게 나타났다.
2. 정강성실험결과 수평방향은  $38\text{N}/\mu\text{m}$ 의 결과가 나타났으며 수직방향의 경우  $246\text{N}/\mu\text{m}$ 의 결과가 나타남을 확인하였다.
3. 오차의 수치보정과 공기 굴절을 보정을 통하여 레이저 200mm 행정에 대하여 0.10m의 반복정밀도와 0.13m의 위치결정 정도를 가짐을 확인하였으며, 반복정밀도가 가장 큰 0mm지점을 정전용량 센서로 측정된 결과 0.07m 부분의 반복정밀도를 가지고 있음을 확인하였다.

4. Abbe오차를 보정한 결과,  $0.21\mu\text{m}$ 까지의 위치결정오차를 얻었으며, 반복오차는  $0.09\mu\text{m}(2\sigma)$ 임을 확인하였다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 개발한 리니어모터구동형 공기정압안내면은 초정밀가공용 안내면으로써 매우 유효하게 적용될 수 있음을 확인 할 수 있다.

## 참고문헌

1. Rank Pneumo Co., "Nanoform 600" Catalog, 1992.
2. H. Suzuki, Y. Niino, S. Murakami and Y. Namba, "Development of ultrl-precision grinding machine for grazing incidence X-ray mirrors," JSPE, Vol. 60, No. 9, pp. 1309-1313, 1994.
3. S. Makinouchi, Y. Hayashi and S. Kamiya, "New Stage System for Step-and-Repeat Scanning Stepper," JSPE, Vol 61, NO. 12, pp. 1676-1680, 1995.
4. Shinji Wakui, "Current and Futures of Precision Positioning Stage Working in Stepper," JSPE, Vol. 67, No. 2, pp. 202-206, 2001.
5. K.J. Stout and S.M. Barrans, "The design of aerostatic bearings for application to nanometer resolution manufacturing machine systems", Tribology International, Vol. 33, pp. 803-809, 2000