

리니어모터를 이용한 초정밀 유정압안내면 개발

박천홍#, 오윤진*, 황주호*, 이득우**

Development of a Hydrostatic Guideway Driven by the Linear Motor

Chun Hong Park[#], Yoon Jin Oh^{*}, Joo Ho Hwang^{*} and Deug Woo Lee^{**}

ABSTRACT

In order to discuss the availability of hydrostatic 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 156 N and a laser scale with the resolution of 0.01 μm 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 has the infinite axial stiffness within 50 N of applied load, and by the motion error compensation method using the Active Controlled Capillary, 0.08 μm of linear motion error and 0.1 arcsec of angular motion error are acquired. The guideway also has 0.21 μm of positioning error and 0.09 μm of repeatability, and it shows the stable response against the 0.01 μm resolution step command. The velocity variation of feeding system is less than 0.6 %. From these results, it is confirmed that the hydrostatic guideway driven by the coreless linear motor is very useful for the ultra precision machine tools.

Key Words : Hydrostatic guideway(유정압안내면), Coreless linear motor(무철심형 리니어모터), Axial stiffness(축방향 강성), Positioning error(위치결정오차), Velocity variation(속도변동)

1. 서론

광, 가전산업등의 눈부신 발전과 함께, 초정밀 비구면 렌즈나 반사경에 대한 수요가 급격히 증가하고 있으며, 이에 따라 이들 렌즈나 렌즈금형을 가공할 수 있는 초정밀 가공기에 대한 수요도 급격히 증가하고 있다.

초정밀 가공기의 가공정밀도는 기본적으로 가공기를 구성하는 운동요소에 의해 크게 좌우되며, 특히 안내면의 정밀도는 가공대상인 렌즈의 형상

정밀도를 좌우하는 중요한 역할을 한다. 일반적으로 초정밀가공기는 비구면의 가공 등을 위해 0.01 μm 대의 높은 분해능과 함께 서브미크론대의 직선운동정밀도가 요구되며, 이에 따라 저마찰특성으로 정밀도면에서 유리하면서도 높은 강성과 감쇠특성을 얻을 수 있는 유정압안내면을 많이 채용하고 있다^{1,2}.

한편, 최근들어 리니어모터의 급격한 성능향상과 함께, 반도체용 리소그래피등의 장비에 있어서 0.01 μm 대의 반복정밀도를 갖는 초정밀 이송

접수일: 2003 년 12 월 9 일; 게재승인일: 2004 년 3 월 12 일

교신저자, 한국기계연구원 공작기계그룹
Email pch657@kimm.re.kr, Tel: (042) 868-7117

* 한국기계연구원 공작기계그룹

** 부산대학교 나노공학과

계의 실용화가 현실화되고 있다^{3,4}. 이에 따라 초정밀 가공기 설계자에게 있어서도 설계, 조립면에서도 편리성이 뛰어난 리니어모터를 적용하고자 하는 요구가 급증하고 있으나, 실제 적용 사례 및 그에 따른 특성 검토등을 보고한 예를 찾아 볼 수 없어 적용에 많은 어려움을 겪고 있다.

본 연구에서는 이러한 요구에 대응하기위해, 리니어모터를 이용한 유정압안내면을 설계/제작하고, 초정밀가공기에 적용하기위해 필요한 기본적인 특성들을 실험적으로 분석함으로써 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 이를 위해, 먼저, 초정밀 선반에의 적용함을 가정하고, 이에 필요한 유정압안내면 성능의 레이아웃설계 및 상세설계를 수행하였으며, 수평방향 정강성 및 이송방향 정강성 실험을 통해 절삭력의 부가에 따른 부하특성을 해석하였다. 한편, 능동제어모세관을 이용한 운동정밀도의 보정, 위치결정정밀도의 NC 보정 및 미소분해능 실험을 통해 초정밀 안내면으로의 적용 가능성을 분석하였으며, 또한 절삭가공에 필요한 저속에서의 속도변동특성의 분석을 통해 실용상의 문제점도 파악하고자 하였다

2. 유정압안내면 이송계의 설계

2.1 안내면/이송계의 레이아웃 설계

초정밀 절삭에 작용하는 절삭력은 일반적인 경우 10 N 이하라고 알려져 있다. 초정밀 부품의 가공 형상정밀도를 0.1 μm 이내로 설정하면, 가공물의 형상정밀도와 안내면의 정강성의 관계를 고려할 때 기본적으로 100 $\text{N}/\mu\text{m}$ 이상의 절삭계의 정강성을 필요로 한다. Fig. 1의 일반적인 초정밀 가공기의 구조를 고려하면, 절삭계의 정강성(루프강성)은 X 축 안내면의 수평방향 정강성, Z 축 안내면의 이송방향 정강성, 주축의 축방향 정강성

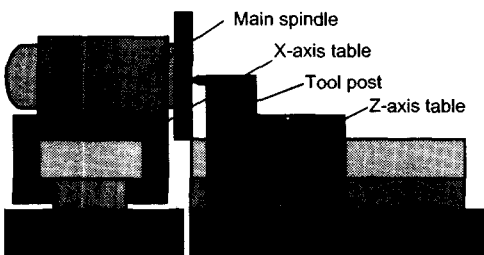


Fig. 1 Example of an ultra precision lathe

및 톨포스트의 정강성 등의 조합으로 이루어진다. 여기서, 톨포스트의 구조강성이 충분히 높다고 가정해도, 주축은 일반적으로 안내면에 비해 강성이 작으므로, 충분한 루프강성을 유지하기 위해서는 안내면의 정강성을 높일 필요가 있으며, 따라서 본 연구에서는 안내면의 수평방향 정강성이 루프강성의 2 배가 되는 200 $\text{N}/\mu\text{m}$ 가 되도록 설계하였다. 유정압안내면의 구조는, 조립의 용이성 및 구조강성을 고려하여, 레일이 유정압베어링을 감싸는 역구속형으로 설계하였으며, 유정압안내면의 이송길이는 250 mm 이다.

안내면의 축방향 정강성은 리니어모터 자체의 이송방향 추력과 피드백센서로 사용되는 리니어스케일의 페루프 제어강성에 의존하게 된다. 리니어모터의 실제 추력은 제어계의 튜닝에 의해 변화하므로 최대 절삭력을 충분히 견딜수 있도록 선정되어야 하며, 또한 초정밀가공기에 적합하도록 발열 특성도 좋아야한다. 본 연구에서는 이러한 요구 특성을 고려하여 156 N의 이송방향 연속추력을 갖는 무철심형 리니어 DC 모터(LEA-S, Anorad)를 사용하였으며, 피드백센서로는 최소분해능 0.01 μm 의 레이저스케일(BS75A, Sony, 정밀도 0.28 μm)을 사용하였다. 스케일은 테이블 측면에 설치하였으며, 이에 따른 Abbe offset 오차는 실험을 통해 소프트웨어적으로 보정하였다. 리니어모터는 윤활유의 침입을 막고 공간적인 면에서도 유리하도록 입형으로 하였으며, 구동점이 테이블의 중앙부에 오도록 설계하였다. Fig. 2에 설계된 유정압안내면 개념도를 나타내었다.

한편, 형상정밀도 0.1 μm 이내의 초정밀가공을 위해서는 유정압안내면의 수평방향 운동오차를 최

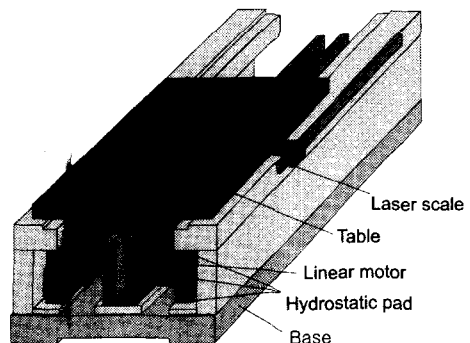


Fig. 2 Structure of designed hydrostatic guideway

소한 같은 수준으로 유지할 필요가 있다. 본 연구에서는 저자등이 기제안한 바 있는 능동제어모세관(Active Controlled Capillary, 이하 ACC로 약칭)을 이용한 운동오차 보정법⁵을 적용하여, Fig. 3과 같이 수평방향 한 쪽 면의 양단 포켓에 ACC를 설치하고 직선 및 각운동오차를 동시에 보정하도록 하였다. 또한 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 온도제어능력을 갖는 오일 컨디셔너(AKS206, Daikin)를 윤활탱크에 연결하여 윤활유를 냉각함으로써 유온변화가 유정압안내면의 반복정밀도에 미치는 영향을 최소화하였다.

2.2 안내면의 성능설계

Fig. 4는 위에서 정강성 설계결과를 고려하여 패드치수를 결정하고, 베어링간극에 따른 강성 및 유량의 계산결과를 나타낸 것이다.

베어링간극을 크게 할수록 제작면에서 유리하고 발열의 우려가 적다는 장점을 갖게 되나, 정강성이 작아지고 유량이 크게 증가하는 단점이 있다. 앞에서의 정강성범위를 만족하는 범위에서 사용유량을 최소화할 수 있도록 베어링간극은 25 μm 로 결정하였으며, 유정압안내면의 구체적인 형상치수와 성능설계결과를 Table 1에 정리하였다.

3. 안내면의 성능실험 및 고찰

3.1 실험방법

실험은 안내면의 정강성, 운동정밀도, 위치결정정밀도 및 반복정밀도, 미소이송분해능 및 속도

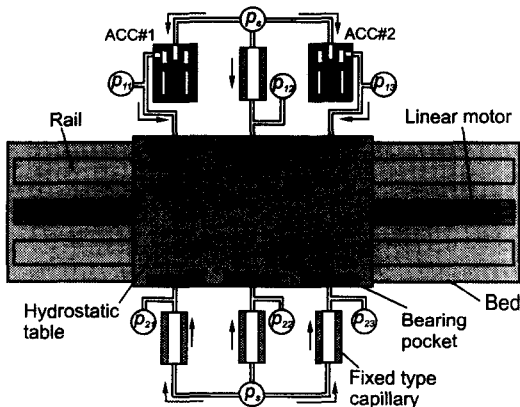


Fig. 3 Compensation method of horizontal motion errors using two ACCs

변동특성 등에 대해 수행하였다. 정강성은 수직방향, 수평방향 및 이송방향에 각각 로드셀을 설치하고 스크류로 하중을 가했을 때의 테이블의 변위를, 전기마이크로미터(분해능 0.01 μm , Mahr)를 4곳에 배치하여 측정하고 그 평균값으로부터 계산하였다. 운동정밀도, 위치결정정밀도 및 반복정밀도는 테이블 중앙에 반사경을 설치하고 레이저간섭계(5529A, HP)를 이용하여 측정하였다. 미소이송특성은 테이블 끝단의 중앙부에 정전용량형 센서(Microsense 3401, ADE, 분해능 1 nm)를 설치하고 0.01, 0.02 $\mu\text{m}/\text{step}$ 이송에 대한 응답특성을 측정하였다. 속도변동특성은 제어기(MEI)를 통해 구형파의 속도곡선을 입력하고, 이 때의 테이블의 응답파형을 레이저간섭계를 이용하여 측정하여 입력파형과 비교하였다.

3.2 안내면의 정강성

Fig. 5에 수직방향 및 수평방향에 대한 정강성

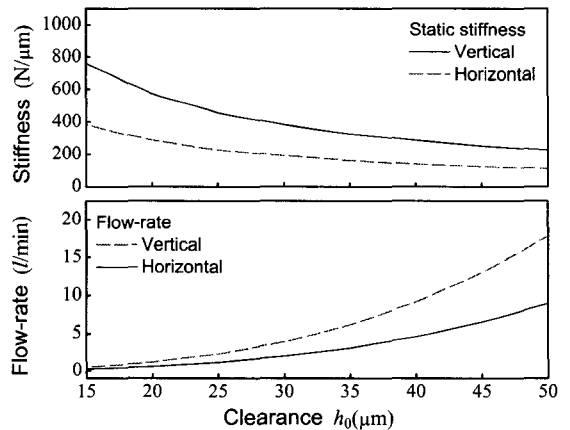


Fig. 4 Stiffness and flow-rate of hydrostatic guideway according to the bearing clearance

Table 1 Designed performances of hydrostatic guideway

Specifications	Horizontal	Vertical
Number of pad	3	6
Pad size	80×20 mm	80×20 mm
Clearance	25 μm	25 μm
Load capacity ($\epsilon=0.1$)	2,110 N	4,220 N
Static stiffness ($\epsilon=0$)	224 N/ μm	448 N/ μm
Flow rate	1.15 l/min	2.30 l/min
Supply pressure 100N/cm ² , Oil viscosity 10cSt(40°C)		

측정결과를 이론치와 함께 비교하여 나타내었다. 먼저 수직방향 실험결과는 428 N/μm를 보이고 있으며 이론치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이로부터 실제 제작시 중요한 역할을 하는 모세관 보상요소의 유량특성이 잘 제어되어 포켓압력을 설계치와 잘 일치시켰음을 알 수 있다. 그러나 수평방향의 경우에는 설계치에 비해 다소 부족한 177 N/μm를 나타내고 있다. 이것은, Fig. 6에 나타낸 바와 같이, 유정압안내면의 레일 및 하부 플레이트의 구조강성이 상대적으로 약하므로, 오일이 공급되는 순간 유정압패드에 작용하는 면압(설계치 50 N/cm²)에 의해 탄성변형을 일으키게 되고 이에 따라 정강성이 감소되기 때문이다. 실험결과 수평레일부에서 평균 4 μm, 하부플레이트에서 평균 2 μm의 탄성변형이 Fig. 6의 화살표 방향으로 발생함을 확인하였으며, 이때의 수평방향 레일의 변형값을 베어링간극의 증가로 간주하여 다시 계산한 이론치($h_0=29 \mu\text{m}$)는, Fig. 5(b)에서와 같이, 실험결과와 잘 일치하고 있다. 실제, 초정밀가공기용

유정압안내면의 경우, 하부플레이트는 베드면을 기준으로 제작하므로 이러한 현상이 발생할 가능성은 거의 없으나, 수평방향 레일의 경우에는 탄성변형을 고려하여 보다 높은 구조강성을 갖도록 설계할 필요가 있다.

Fig. 7은 안내면의 이송방향 정강성 실험결과를 나타낸 것이다. 이상적으로는 리니어모터의 연속추력 156 N까지 무한강성을 기대할 수 있다. 그러나, 실제로는 제어계인, 특히 오차를 누적 보상하는 적분게인의 포화상태에 의해 약 50 N까지의 하중에 대해서는 무한강성을 얻을 수 있지만, 그 이상의 하중이 작용할 경우에는 약 4.4 N/μm로 정강성이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 안내면의 경량화, 스케일 분해능의 저하 및 제어기의 제어성능 개선등을 통해 무한강성의 범위를 다소 확장하는 것은 충분히 가능하다고 예측되며, 본 연구에서는 최대 절삭력 10 N을 기준으로 설계하였으므로, 50 N까지의 무한강성 범위이면 초정밀가공기 안내면에 충분히 적용가능하다고 판단

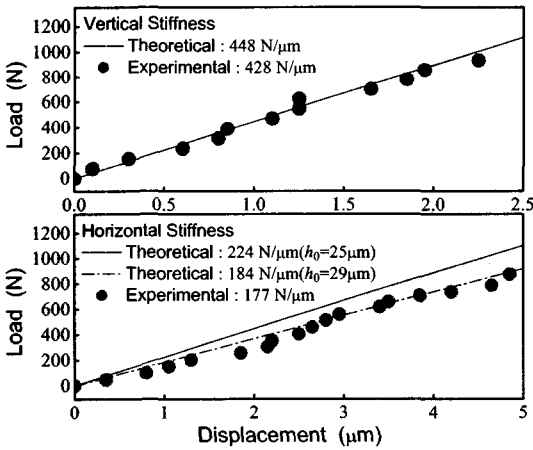
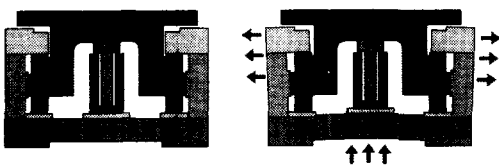


Fig. 5 Static stiffness of guideway in the vertical and horizontal direction



(a) before deformation (b) after deformation
Fig. 6 Aspect of structural deformation by supplied oil

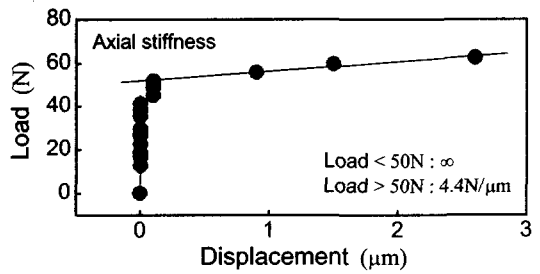


Fig. 7 Static stiffness of guideway in the feed direction

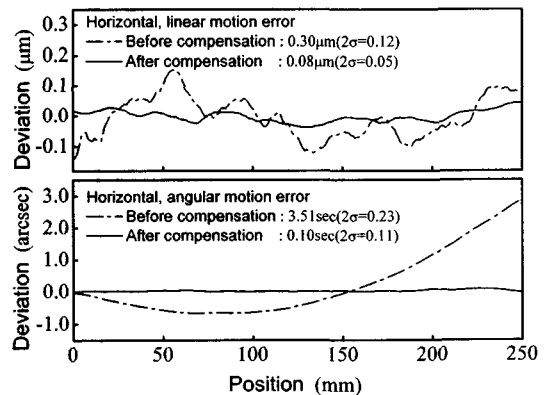


Fig. 8 Improvement of motion errors by the compensation method using the ACCs

된다.

3.3 운동정밀도

Fig. 8 에 가공물의 형상오차에 영향을 미치게 되는 유정압안내면 수평방향 운동정밀도의 오차보정 전, 측정결과를 나타내었다. 조립 직후의 직선 및 각운동오차는, 250 mm 의 이송구간에 대해, 각각 0.30 μm 및 3.51 arcsec 를 나타내었으며, 이 안내면을 가공에 그대로 적용할 경우 0.1 μm 이내의 초정밀 가공형상을 기대하기는 어렵다. 따라서 Fig. 3 의 직선 및 각운동오차 동시보정방법을 적용하여 운동오차를 보정하였다. 구체적인 보정방법⁵으로는 먼저, 운동오차 측정치로부터 보정해야 할 운동오차에 해당하는 각 이송위치에서의 변위값을 구한 후, 예비실험을 통해 미리 얻은 개인값을 이용하여 각 ACC 내 압전소자에의 입력전압을 구해 제어기에 입력하고 보정을 수행한다. 개인 및 압전소자 등의 비선형성에 의해 한 번의 보정으로 충분한 정밀도를 얻지 못할 경우, 반복제어 알고리즘을 이용하여 반복적인 보정을 수행하게 된다. 보정을 완료한 후의 운동오차 측정치를 Fig. 7 에 같이 나타내었다. 보정은 3 회를 반복하였으며, 보정결과, 직선운동오차 0.08 μm 및 각운동오차 0.10 arcsec 의 정밀도를 나타내고 있어 초정밀 가공에 충분히 적용할 수 있는 결과를 보이고 있다.

3.4 미소분해능 및 위치결정정밀도

유정압안내면의 미소이송에 따른 응답특성 실험결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 실험에서는 1 step 당 0.02 μm 및 0.01 μm 의 변위를 5 step 연속으로 전, 후진할 수 있도록 입력값을 주고 그 때의 테이블의 응답변위를 측정하였다. 그림으로부터 테이블은, 실험에 사용한 레이저스케일의 최소분해능인 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 확인할 수 있다. 한편, 0.01 $\mu\text{m}/\text{step}$ 의 측정결과에 있어, 시작점과 끝점의 상대위치가 약 6~7 nm 정도 차이가 나는 것은, 스케일의 전기적이 체배의 최소값이 0.01 μm 이므로 그 이하의 값에 대한 직선성이 떨어지는 것이 주요 원인이라고 판단된다.

ISO 평가규격을 이용하여 유정압안내면의 위치

결정오차 및 그 때의 반복오차를 측정한 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. 측정결과는 5 회 반복 측정값으로부터 통계적으로 구한 것이다. 먼저, 조립된 상태 그대로에서의 위치결정오차 및 반복오차는 각각 3.08 μm 및 0.15 $\mu\text{m}(2\sigma)$ 를 나타내고 있다(Fig. 10(a)참조). 레이저스케일의 250 mm 이송에 대한 정밀도는 0.28 μm 이지만, 실험에 사용된 레이저스케일이 테이블의 측면에 설치되어 있으며, 측정은 테이블 중앙부에서 이루어졌으므로 Abbe offset 오차에 의해 위치결정오차가 확대되어 나타나고 있다. 이 오차값을 이용하여 테이블중앙을 기준으로 소프트웨어적으로 오차보정을 수행한 결과를 Fig. 10(b)에 나타내었다. 위치결정오차 및 반복오차는 각각 0.21 μm 및 0.09 $\mu\text{m}(2\sigma)$ 로 향상되었음을 알

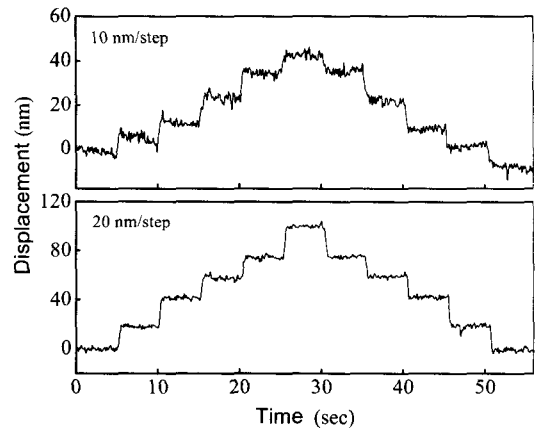


Fig. 9 Micro step response of guideway

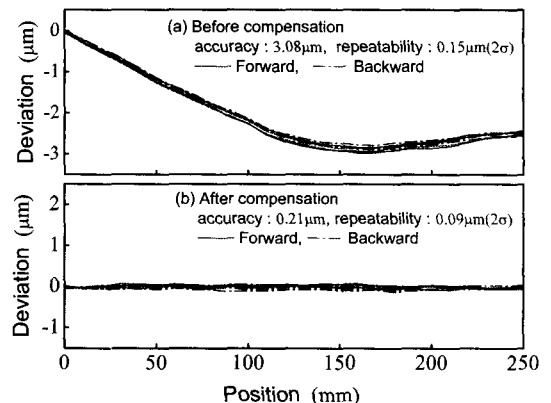


Fig. 10 Positioning error and its repeatability of guideway before and after the NC compensation

수 있다. 또한, 위치결정오차와 반복오차를 비교하면, 반복오차에 의해 위치결정오차가 더 이상 향상되지 못함을 알 수 있다. 반복오차는 유정압 안내면에 사용되는 윤활유의 온도특성에 의한 영향과 함께, 측정에 사용된 레이저간섭계의 주위 온도변화에 따른 공기굴절율 변화에 의한 영향도 매우 크다고 추정하고 있으며, 이들 요소가 위치결정오차 및 반복오차에 미치는 영향에 대해서는 추가적인 연구를 통해 정량적으로 분석하여 발표할 예정이다.

3.5 속도특성

Fig. 11 은 초정밀 절삭가공의 일반적인 절삭속도 범위인 30 mm/min 와 급속이송범위인 720 mm/min 에서의 유정압안내면의 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 0.2, 1.1 mm/min 를 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

- 1) 리니어모터로 구동되는 이송방향 정강성의 실험결과, 50 N 이하의 부하에 대해서 무한강성의 특성을 보임을 확인하였다.

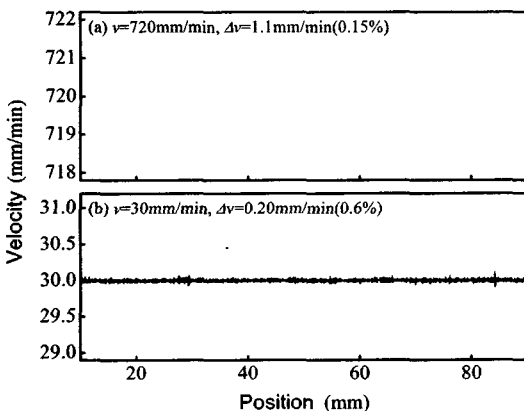


Fig. 11 Velocity variation of guideway in the range of ultra precision cutting

- 2) 능동제어모세관을 이용한 운동오차보정방법을 적용한 결과, 250 mm 의 이송구간에 대해 0.08 μm 의 직선운동오차 및 0.1 arcsec 의 각운동오차를 얻었다.
- 3) 미소분해능 실험결과, 안내면은, 실험에 사용한 레이저스케일의 최소분해능인 0.01 μm /step 의 분해능까지 정확히 추종하는 응답특성을 나타내었다.
- 4) Abbe 오차를 보정한 결과, 0.21 μm 까지의 위치결정오차를 얻었으며, 반복오차는 0.09 μm (2 σ)임을 확인하였다.
- 5) 유정압안내면은 초정밀 절삭가공의 일반적인 절삭속도영역에서 최대 0.6 %이내의 최대속도변동을 나타내었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 개발한 리니어모터구동형 유정압안내면은 초정밀가공기용 안내면으로써 매우 유효하게 적용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부에서 지원하는 “국가지정 연구실사업”의 “초정밀 위치결정기술개발”과제로 수행되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Rank Pneumo Co., “Nanoform 600: Catalog,” 1992.
2. Suzuki, H., Niino, Y., Murakami, S. and Namba, Y., “Development of ultra-precision grinding machine for grazing incidence X-ray mirrors,” JSPE, Vol. 60, No. 9, pp. 1309-1313, 1994.
3. Makinouchi, S., Hayashi, Y. and Kamiya, S., “New Stage System for Step-and-Repeat Scanning Stepper,” JSPE, Vol. 61, No. 12, pp. 1676-1680, 1995.
4. Wakui, S., “Current and Futures of Precision Positioning Stage Working in Stepper,” JSPE, Vol. 67, No. 2, pp. 202-206, 2001.
5. Park, C. H., Song, Y. C., Kim, S. T. and Lee, H., “Improvement of Motion Accuracy Using Active Controlled Capillary in Hydrostatic Table,” KSPE, Vol. 14, No. 12, pp. 114-120, 1997.