리니어모터를 이용한 초정밀 유정압안내면 개발

박천홍*, 황주호, 오윤진, 이찬홍 (한국기계연구원 공작기계그룹)

Development of a Hydrostatic Guideway Driven by the Linear Motor

Chun Hong Park, Joo Ho Hwang, Yoon Jin Oh, Chan Hong Lee (KIMM, Machine Tools Group)

ABSTRACT

In order to discuss the availability of the hydrostatic guideway 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 resulution of 10 nm 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 has 0.08 μm of linear motion error and 0.1 arcsec of angular motion error. It also has 0.21 μm of positioning error and 0.09 μm of repeatability, and it shows the stable response against the 10 nm resolution step command. The velocity variation of feeding system is less than 5%. 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

본 연구에서는 리니어모터를 초정밀선반에 적용하고자하는 요구에 대응하기 위해, 리니어모터를 이용한 유정압안내면을 설계/제작하고, 초정밀선반에의 적용에 필요한 기본적인 특성들을 실험적으로 분석함으로써 적용 가능성을 검토하고자 하였다. 이를 위해, 먼저, 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 가공형상정밀도를 0.1 μm 이내로 설정하면, 가공물의 형상정밀도와 안내면의 정강성의 관계를 고려할 때 기본적으로 100 N/μm 이상의 절삭계의 정강성을 필요로 한다. Fig. 1 의 일반적인 초정밀가공기의 구조를 고려하면, 절삭계의 정강성(루프강성)은 X 축 안내면의 수평방향 정강성, Z 축 안내면의 이송방향 정강성, 주축의 축방향 정강성 및 툴포스트의 정강성 등의 조합으로 이루어진다. 여기서, 툴포스트의 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 N/μm 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 폐루프 제어강성에 의존하게 된다. 리니어모터의 실제 추력은 제어계의 튜닝에 의해 변화하므로 최대 절삭력을 충분히 견딜수 있도록 선정되어야 하며, 또한 초정밀가공기에 적합하도록 발열특성도 좋아야한다. 본 연구에서는 이러한 요구 특성을 고려하여 156 N 의 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)를 사용하였다. Fig. 2 에 설계된 유정압안내면 개념도를 나타내었다.

한편, 형상정밀도 0.1 μm 이내의 초정밀가공을 위해서는 유정압안내면의 수평방향 운동오차를 최소한 같은 수준으로 유지할 필요가 있다. 본 연구에서는 저자등이 기제안한 바 있는 능동제어모세관(Active Controlled Capillary, 이하 ACC 로 약칭)을 이용한 운동오차 보정법[1]을 적용하여, Fig. 3 과 같이 수평방향 한 쪽 면의 양단 포켓에 ACC 를 설치하고 직선 및 각운동오차를 동시에 보정하도록 하였다. 또한 ±0.1°C 의 온도제어능력을 갖는 오일컨디셔너(AKS206, Daikin)를 윤활탱크에 연결하여 윤활유를 냉각함으로써 유온변화가 유정압안내면의 반복정밀도에 미치는 영향을 최소화하였다.

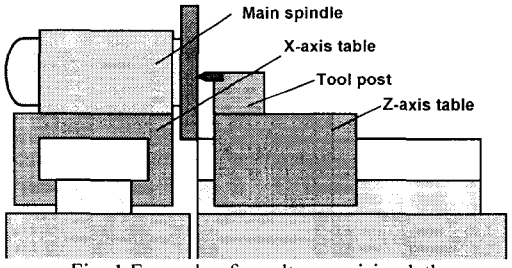

Fig. 1 Example of an ultra precision lathe

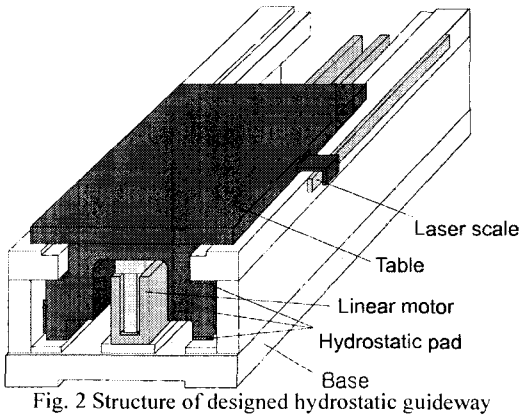

Fig. 2 Structure of designed hydrostatic guideway

2.2 안내면의 성능설계

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

3. 안내면의 성능실험 및 고찰

3.1 실험방법

정강성은 수직방향, 수평방향 및 이송방향에 각각 로드셀을 설치하고 스크류로 하중을 가했을 때의 테이블의 변위를, 전기마이크로미터(분해능 0.01 μm, Mahr)를 4 곳에 배치하여 측정하고 그 평균값으로부터 계산하였다. 운동정밀도, 위치결정정밀도 및 반복정밀도는 테이블 중앙에 반사경을 설치하고 레이저간섭계(5529A, HP)를 이용하여 측정하였다. 미소이송 특성은 테이블 끝단의 중앙부에 정전용량형 센서(Microsense 3401, ADE, 분해능 1 nm)를 설치하고 10, 20, 100 nm/ step 이송에 대한 응답특성을 측정하였다. 속도변동특성은 제어기(MEI)를 통해 구형파의 속도곡선을 입력하고, 이 때의 테이

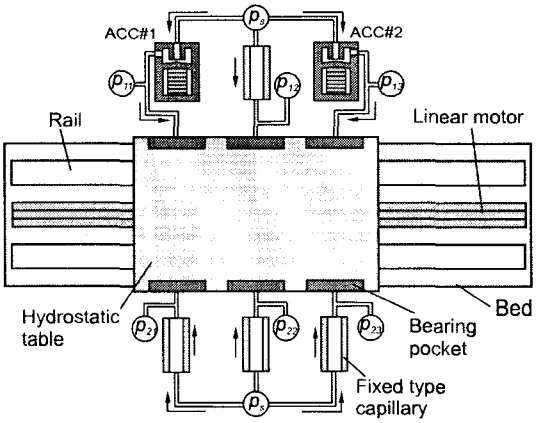

Fig. 3 Compensation method of horizontal motion errors using two ACCs

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 (ε=0.1)	2,110 N	4,220 N
Static stiffness (ε=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)		

블의 응답파형을 레이저간섭계를 이용하여 측정하였다.

3.2 안내면의 정강성

Fig. 4 에 수직방향 및 수평방향에 대한 정강성 측정결과를 이론치와 함께 비교하여 나타내었다. 수직방향 실험결과는 428 N/μm 를 보이고 있으며 이론치와 잘 일치하였다. 그러나 수평방향의 경우에는 설계치에 비해 다소 부족한 177 N/μm 를 나타내고 있다. 이것은, 수평방향 레일의 두께가 얇으므로, 유정압패드에 작용하는 면압에 의해 수평방향 레일이 탄성변형을 일으키게 되고 이에 따라 베어링간극이 커지기 때문이다. 실험결과 평균 4 μm 의 탄성변형이 있음을 확인하였으며, 이 변형값을 베어링간극의 증가로 간주하여 다시 계산한 이론치 (h_0=29 μm)는, 그림에서와 같이, 실험결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 5 은 안내면의 이송방향 정강성 실험결과를 나타낸 것이다. 이상적으로는 리니어모터의 연속추력 156 N 까지 무한강성을 기대할 수 있다. 그러나, 실제로는 제어게인, 특히 오차를 누적 보상하는 적분게인의 포화상태에 의해 약 50 N 까지의 하중에 대해서는 무한강성을 얻을 수 있지만, 그 이상의 하중이 작용할 경우에는 약 4.4 N/μm 로 정강성이 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 안내면의 경

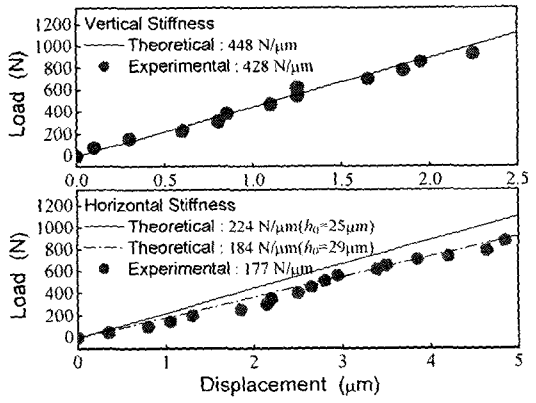

Fig. 4 Static stiffness of guideway in the vertical and horizontal direction

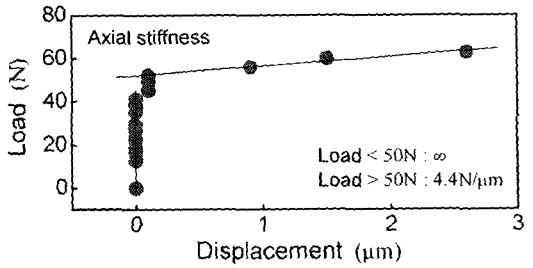

Fig. 5 Static stiffness of guideway in the feed direction

량화, 스케일 분해능의 저하 및 제어기의 제어성능 개선등을 통해 무한강성의 범위를 다소 확장하는 것은 충분히 가능하다고 예측되며, 본 연구에서는 최대 절삭력 10 N 을 기준으로 설계하였으므로, 50 N 까지의 무한강성 범위이면 초정밀가공기 안내면에 충분히 적용가능하다고 판단된다.

3.3 운동정밀도

Fig. 6 에 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 나타내었다. 조립된 안내면에 Fig. 3 의 직선 및 각운동오차 동시보정방법을 적용하여 운동오차를 보정한 결과, 직선운동오차는 0.08 μm, 각운동오차는 0.10 arcsec 로 향상되어, 초정밀가공에 충분히 적용할 수 있는 결과를 보이고 있다.

3.4 미소분해능 및 위치결정정밀도

유정압안내면의 미소이송에 따른 응답특성 실험결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 안내면은, 실험에 사용한 레이저스케일의 최소분해능인 10 nm/step 의 분해능까지 명확히 추종하고 있음을 보이고 있으며, 왕복운동에 있어서의 구조적 비대칭에 기인하는 비선형 변위특성이나 로스트모션 등은 발생하지 않음을 확인할 수 있다.

ISO 평가규격을 이용하여 유정압안내면의 위치결정오차 및 그 때의 반복오차를 측정한 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 측정결과는 5 회 반복 측정값으로부터 통계적으로 구한 것이다. 먼저, 조립된 상태 그대로에서의 위치결정오차 및 반복오차는 각각 3.08 μm 및 0.15 μm(2σ)를 나타내고 있다(Fig. 8(a)참조). 레이저스케일의 250 mm 이송에 대한 정밀도는 0.28 μm 이지만, 레이저스케일이 테이블의 측면에 설치되어 있으며, 측정은 테이블 중앙부에서 이루

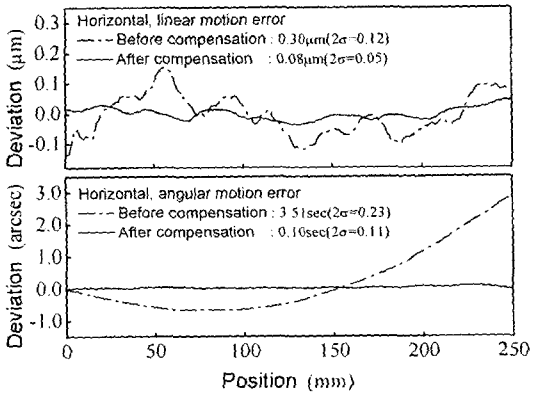

Fig. 6 Improvement of motion errors by the compensation method using the ACCs

어졌으므로 Abbe offset 오차에 의해 위치결정오차가 확대되어 나타나고 있다. 이 오차값을 이용하여 테이블중앙을 기준으로 소프트웨어적으로 오차보정을 수행한 결과를 Fig. 8(b)에 나타내었다. 위치결정오차 및 반복오차는 각각 0.21 μm 및 0.09 μm(2σ)로 향상되었음을 알 수 있다. 또한, 위치결정오차와 반복오차를 비교하면, 반복오차에 의해 위치결정오차가 더 이상 향상되지 못함을 알 수 있다. 반복오차는 유정압안내면에 사용되는 윤활유의 온도특성에 의한 영향과 함께, 측정에 사용된 레이저간섭계의 주위온도변화에 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. 9 는 초정밀 절삭가공의 일반적인 절삭속도 범위인 6 mm/min 와 30 mm/min 에서의 유정압안내면의 속도변동특성을 실험한 결과를 나타낸 것으로,

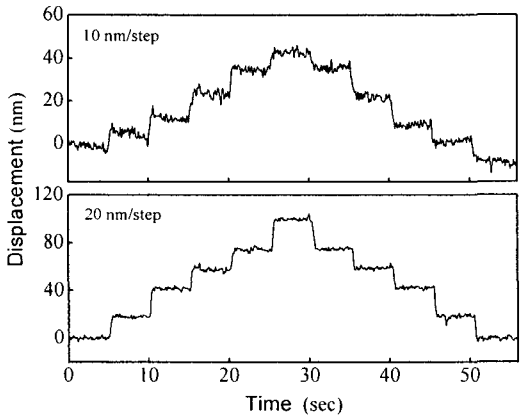

Fig. 7 Micro step response of guideway

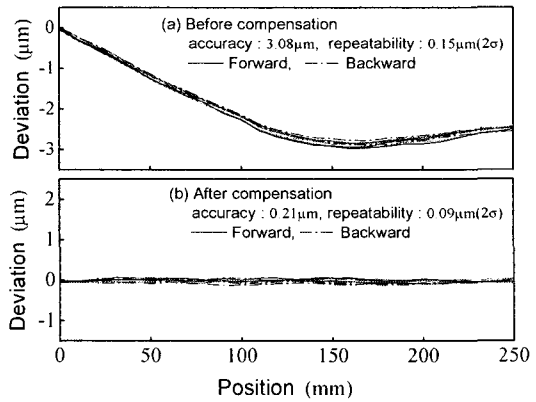

Fig. 8 Positioning error and its repeatability of guideway before and after the NC compensation

구형파에 대한 응답속도 측정결과로부터 안정된 정속구간인 50~200 mm 구간에 대한 측정값을 확대하여 나타낸 것이다. 이송속도는 지령속도와 정확히 일치하고 있으며, 속도의 최대변동값은 이송속도에 관계없이 0.3 mm/min 를 나타내고 있다. 이것은 각각의 이송속도에 대해 1 % 및 5 %에 해당하는 값이므로, 매우 안정적으로 초정밀가공에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

리니어모터로 구동되는 유정압안내면의 이송방향 정강성의 실험결과, 50 N 이하의 부하에 대해서 무한강성의 특성을 보였으며, 능동제어모세관을 이용한 운동오차보정방법을 적용한 결과, 250 mm 의 이송구간에 대해 0.08 μm 의 직선운동오차 및 0.1 arcsec 의 각운동오차를 얻었다. 미소분해능 실험결과, 안내면은, 실험에 사용한 레이저스케일의 최소분해능인 10 nm/step 의 분해능까지 정확히 추종하는 응답특성을 나타내었으며, 안내면은 0.21 μm 의 위치결정오차 및 0.09 μm(2σ)의 반복오차를 나타내었다. 또한, 안내면은 초정밀 절삭가공의 일반적인 절삭속도영역에서 최대 5%이내의 최대속도변동율을 나타내었다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 개발한 리니어모터구동형 유정압안내면은 초정밀가공기용 안내면으로써 매우 유효한 특성을 지니고 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 박천홍, 송영찬, 김수태, 이후상, "능동제어모세관을 이용한 유정압테이블의 운동정도향상," 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 12 호, pp114-120, 1997.

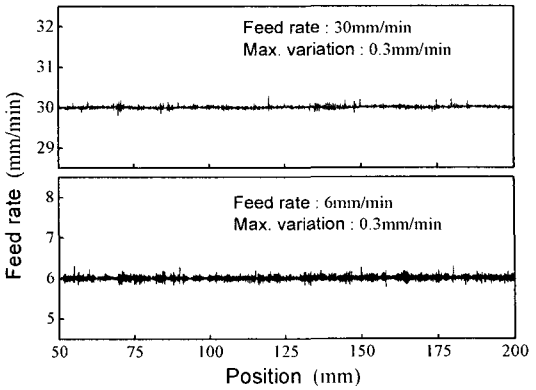

Fig. 9 Velocity variation of guideway in the range of ultra precision cutting