

공기정압 stage의 초정밀위치결정을 위한 기본특성

황주호* (한국기계연구원), 김종천, 이재형(삼익공업(주)), 박천홍(한국기계연구원)

A Study on the Ultraprecision Positioning Characteristic of Aerostatic Stage

J. H. Hwang(KIMM), J. C. Kim, J. H. Lee(Samick Industrial Co., LTD.), C. H. Park(KIMM),

ABSTRACT

An aerostatic stage has frictionless behavior, so it has a advantage of investigation into positioning characteristics. A one-dimensional aerostatic ceramic stage with ballscrew driven and laser scale feedback system is manufactured, aiming at investigating positioning characteristic of aerostatic stage, especially position error and repeatability, we analyze positioning behavior with other factors such as angular error, temperature.

Experimental results show that the aerostatic stage has a 10nm micro step response. Comparing experimental results and calculated abbe's error, we confirm that mean of position error is owing to angular error. And, also we confirm the temperature is dominant factor of repeatability in ten nm order.

Key Words : Aerostatic stage(공기정압 스테이지), positioning characteristic (위치결정 특성), micro step response (미소스텝 응답), position error (위치오차), repeatability (반복능)

1. 서론

위치결정기술은 산업 및 생활에서 활용되는 포괄적인 기술로 대형 크레인에서부터 전자제품, 프린터, 전자현미경에 이르기까지 수많은 분야에 활용된다. 이 중에서 서브미크론의 정밀도가 요구되는 초정밀 스테이지는 부가가치가 높은 핵심기술로서 1980년 후반부터 활발한 연구가 진행되고 있으며 전자부품의 가공과 연계하여 더 많은 분야에서 초정밀스테이지를 요하게 될 전망이다⁽¹⁾.

수십mm 이상의 스트로크가 요구되는 스테이지의 경우, 초정밀 위치결정에 큰 장애요인으로 작용하는 마찰력을 줄이는 목적으로 공기베어링을 대부분 사용하며, 전달 기구부로는 대상기계의 속도, 정밀도, 비용 등을 고려하여 볼나사⁽²⁾, 리니어모터⁽³⁾, 마찰 구동기⁽⁴⁾등을 활용하고 있다. 반도체장비등 높은 생산성을 요구하는 고속의 스테이지는 리니어모터를 사용하는 비중이 차츰 높아가고 있는 추세이나, 나머지 분야에선 가격적으로 유리한 볼나사를 많이 선호하는 추세이다.

본 연구에서는 실용성이 높은 초정밀 스테이지를 목적으로, 가이드는 공기베어링을, 구동기구는 볼나사를 사용하며 위치검출 장치는 레이저 스케일(Laser Scale)을 사용하는 스테이지의 위치결정 특성에 영향을 주는 원인에 대한 기초 연구를 목적으로 한다.

2. 공기정압 스테이지의 구조 및 실험장치

공기정압 스테이지의 구조는 Fig. 1과 같으며 카본 그라파이트 재료로 구성된 공기정압 패드를 사용하고 있고 더블패드방식으로 상하운동을 구속하고 있으며, 레일과 테이블은 알루미늄이나 세라믹을 사용하고 있다. 사용된 재료의 특징은 Table 1과 같다.

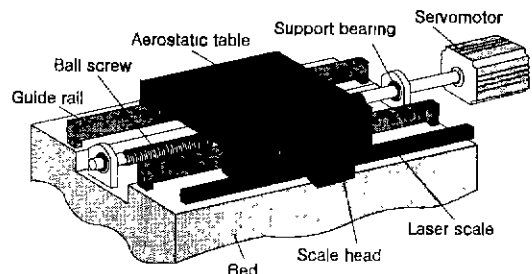


Fig.1 Schematic diagram of aerostatic stage

스테이지의 25 μ m이내의 미소한 운동은 정전용량형 변위계(ADE 3401)를 사용하였으며, 전체 스트로크에 대한 변위 및 각운동 오차는 레이저간섭계(HP 5529A)를 사용하였다. 실험환경의 온도변화의 측정은 T형의 열전대를 사용하였으며, 제작된 스테이지

는 $20 \pm 0.3^\circ\text{C}$, 상대습도 $50 \pm 3\%$ 로 제어되는 항온/항습실에서 실험을 수행하였다.

Table 1 Element of aerostatic stage

	제작사/모델명	특징
stage	KIMM/자체제작	Al ₂ O ₃ 세라믹 660× 360× 138 stroke:250mm
Controller	MEI/PCDSP	PID 제어 제어속도:1250Hz
볼나사	THK/ BNFN2505-2.5	C0급, 리드5mm 나사부:375mm
서보모터	Parker/NO703F	827w
레이저스케일	SONY/ BSA75A-310N	Accuracy:0.72μm 10nm 분해능 열팽창계수 : 0.7× 10 ⁻⁶ /°C

3. 위치결정특성

3.1 미송이송 및 위치오차

스테이지의 위치결정이 가능한 최소단위 테스트 수행을 위하여 위치검출의 최소단위인 10nm/step와 그의 두 배인 20nm/step으로 왕복 운동하였을 때의 응답을 정전용량형 변위계(ADE 3401)로 측정된 결과를 fig.2에 도시하였다. 두 가지 경우 모두 운동간의 구분이 명확하며 이로부터 스테이지의 분해능은 10nm임을 확인 할 수 있었다.

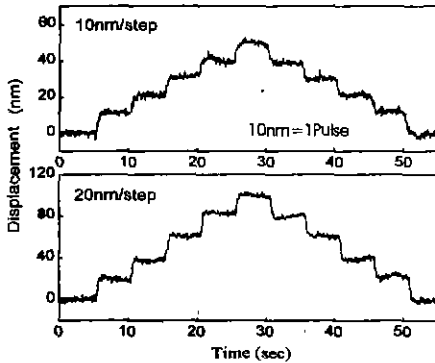


Fig. 2 Micro step response of stage

20nm/step, 10nm/step 모두 위치결정 후 약간의 위치변화가 있는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 최소 제어단위인 10nm 이하의 변위로 컨트롤러는 이러한 변위를 인식하지 못한 결과이며 따라서, 위치검출 장치의 분해능을 높이면 현재의 스텝간격에서 보다 안정적인 위치결정 특성을 보이리라 예상된다.

stage의 위치결정특성을 살펴보기 위하여 Fig. 1의 1, 2, 3 번 위치에 레이저간섭계의 반사경을 설치한 후 5회 왕복 운동에 대한 평균 위치오차를 측정하였다. 스케일 head의 측정점을 기준으로 반사경의

높이는 136mm로 세 가지 경우에 대하여 모두 같으며, 수평으로는 1번 44mm, 2번 167mm, 3번 188mm 떨어진 곳에 설치하였다. 반사경의 위치에 따라서 평균위치 오차의 경향과 크기가 달라짐을 확인 할 수 있었다.

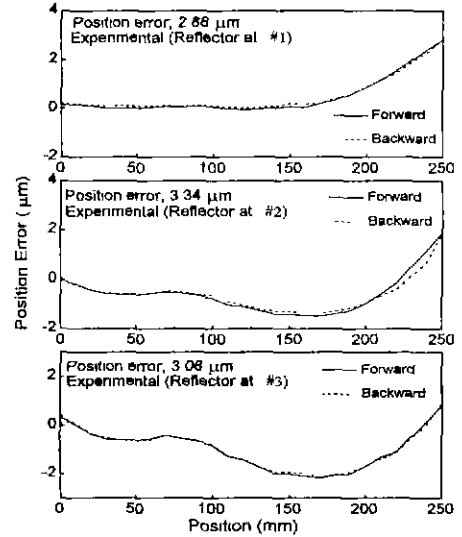


Fig. 3 Positioning error according to attaching point of reflector

이러한 결과의 원인을 살펴보기 위하여 각운동 오차(Fig. 4)를 측정하여, 위치검출 장치인 레이저 스케일 head를 테이블의 회전의 중심으로 하여 반사경의 위치에 따른 세 가지 경우에 대하여 Abbe 오차에 의한 오차를 식(1)에 의하여 계산하여 Fig. 5에 도시하였다.

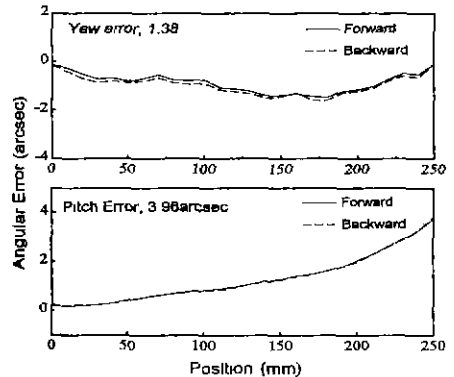


Fig. 4 Angular error of stage

$$error = l_h \times \sin \theta_y + l_v \times \sin \theta_p \quad (1)$$

여기서, l_h : 수평방향거리, l_v : 수직방향거리
 θ_y : yaw오차, θ_p : Pitch 오차, error: 위치오차 이다.
그림에서 보는 바와 같이 반사경위치 1, 2번에 대한 계산결과는 누적 오차의 형태 및 오차의 크기가 매우 유사하며, 3번의 경우도 그 형태는 유사하나

200mm 이후의 위치오차가 차이를 보이며 오차의 크기가 계산 결과와 약간의 차이를 보인다.

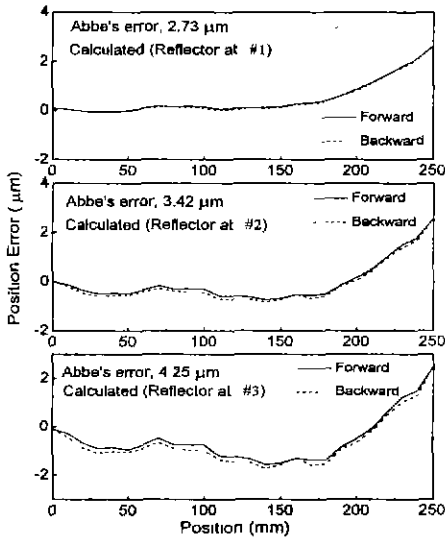


Fig. 5 Calculated position error from Abbe's principle

위의 계산결과로부터 각운동 오차가 스테이지의 위치오차에 미치는 영향이 매우 크음을 알 수 있으며, 각운동 오차에 의하여 생기는 위치오차는 측정지점의 위치에 따라 다르게 나타나기 때문에 수치보정을 통하여 위치오차를 보정 하더라도 테이블 전체에 대한 오차는 존재하게 된다. 따라서 테이블 전체의 오차정도를 요구 한도 이하로 줄이기 위하여 그에 맞게 각운동 오차를 줄여야만 가능함을 알 수 있다.

3.2 반복능

Fig. 6의 위의 그림은 반사경을 2번 위치인 테이블의 중앙에 설치한 후 ISO230-2의 규격에 의하여 5회 왕복운동 오차이며, 밑의 그림은 이로부터 얻은 평균위치오차를 기준으로 정방향 및 역방향에 대한 수치보정을 수행한 후의 위치오차를 측정한 결과이다.

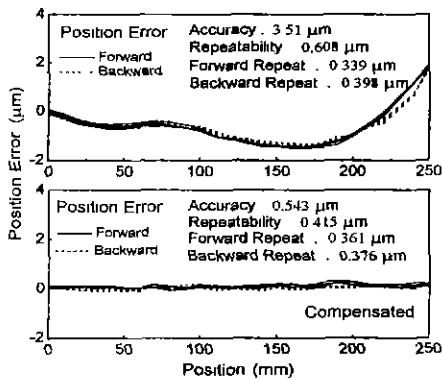


Fig. 6 Positioning accuracy of aerostatic stage

위치결정오차는 ISO230-2 규격에 의하여 Fig. 3의 평균위치오차(m)에 표준편차(σ)의 개념을 도입하여 $m \pm 2\sigma$ 로 그 크기를 결정한다. 이러한 분석을 통하여 실험결과를 살펴보면 위치결정정도는 향상되었으나, 정방향 및 역방향의 반복정도는 향상되지 않고 반전 오차의 감소에 의한 전체 반복정도도 단 향상되었다.

반복능에 영향을 미치는 요소를 찾기 위하여 0mm 위치에 위치결정 시 레이저간섭계와 정전용량형 변위계로 60분간 동시에 측정한 결과를 Fig 7에 나타내었다. 두 개의 측정결과는 최대-최소 크기비가 0.380/0.091로 레이저간섭계로 측정한 경우 4.18배가 크고 그 경향도 차이가 크음을 알 수 있다.

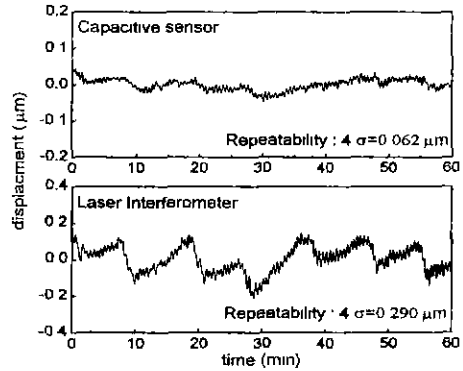


Fig. 7 Comparison of displacement of stage between capacitive sensor and laser interferometer

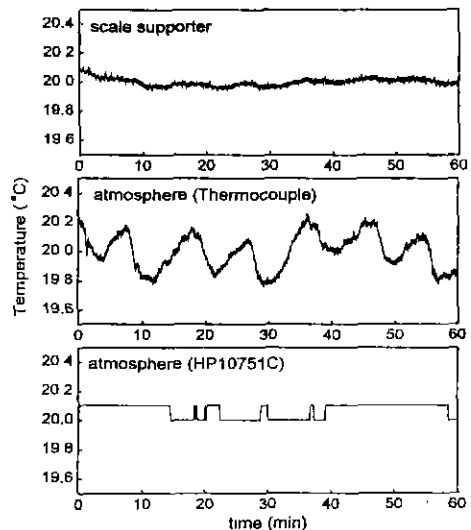


Fig. 8 Temperature of scale supporter and atmosphere

Fig. 8은 동일한 시간에 scale의 지지대 및 대기의 온도를 열전대로 측정한 것과 레이저간섭계의 Air-sensor(HP 10751C)의 온도측정 값을 비교한 것이다. 대기는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이내의 온도변화를 가지고 있으며 열 용량이 큰 베드와 연결되어 있는 scale 고정부의 온도는 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 이내의 온도변화를 가지고 있다. 한

편 레이저간섭계의 Air-sensor는 온도의 변화를 거의 감지하지 못하고 있음을 알 수 있다. 사용된 Air-sensor는 HP5529A 레이저간섭계 전용 센서로서 온도변화에 대한 시상수가 7분이고, 분해능이 0.1°C이어서 정확한 온도 측정이 불가능 한 것으로 보인다.

레이저간섭계는 원리상 대기의 온도변화에 민감하게 변하는 파장을 보정하는 목적으로 Air-sensor를 설치하여 수시로 변하는 온도를 보정하도록 되어있다. 하지만 대기온도의 변화에 대한 민감도가 떨어져서 Fig. 7에 보이는 바와 같이 레이저간섭계의 측정된 데이터가 대기 온도 변화와 유사한 형태로 흔들림을 관찰 할 수 있고, 반복능은 표준편차의 4배로서 0.29 μm 이다. 따라서 20~30분의 시간에 걸쳐 측정된 Fig. 6 결과의 0.3 μm 대의 반복능은 상당부분 레이저간섭계의 대기온도변화에 의한 측정상의 오차를 포함하고 있는 것으로 판단된다.

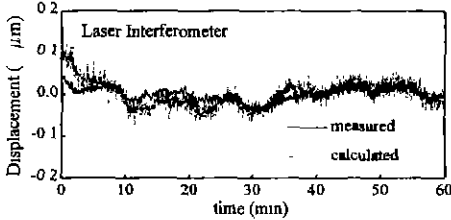


Fig. 9 Comparison of measured and calculated

Fig. 9는 정전용량형 변위계로 측정된 변위와 온도변화에 의하여 계산된 값을 비교한 것이다. 계산된 변위는 레이저 스케일 지지대와 베드 온도의 평균온도의 변화에 센서 고정부의 길이와 열팽창계수를 곱한 것이다. 두 개의 결과는 유사한 값을 보이고 있는 것으로 보이며 따라서, 측정된 변위는 센서 고정부의 온도변화에 의한 길이변화를 포함하고 있다고 생각된다.

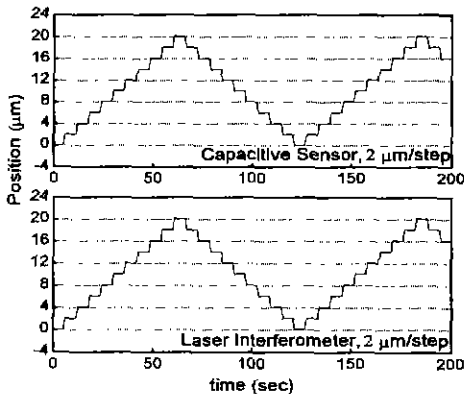


Fig. 10 2 $\mu\text{m}/\text{step}$ response of stage

Fig. 10은 정전 용량형 센서로 측정 가능한 20 μm step을 2 $\mu\text{m}/\text{step}$ 으로 5회 왕복 운동시 전체 610초 중 초기 200초를 정전용량형 변위계와 레이저간섭계로 측정된 결과를 도시한 것이다. 레이저간섭계의 측정 데이터는 4 μm 목표 위치 등에서 약간의 편차가 보이는 것을 확인 할 수 있다.

Fig. 10의 측정 데이터에서 위치결정 후 각 스텝의 측정값의 평균을 대표 값으로 하여 ISO230-2 규정으로 분석한 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 앞에서 기술한 대기온도 변화의 영향으로 레이저간섭계로 측정된 반복능은 0.211 μm 이며 정전용량형 변위계로 측정된 경우의 반복능은 0.062 μm 이다. 이는 정지시의 온도변화에 의한 Fig. 7의 반복능의 값과 같다. 따라서 20 μm 의 반복능 측정에도 스케일 지지대와 베드의 온도변화가 많은 영향을 준 것으로 판단된다.

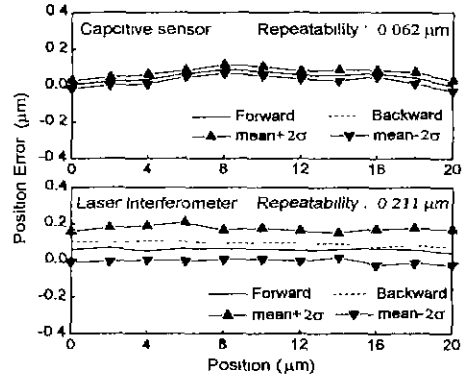


Fig. 11 Position error of stage (2 $\mu\text{m}/\text{step}$)

4. 결론

- 1) 제작한 공기정압 스테이지는 10nm 스텝의 미소이송분해능이 가능함을 확인하였으며, 평균위치오차는 주로 각운동 오차에 기인함을 알 수 있었다.
- 2) 레이저간섭계를 이용하여 20mm stroke에 대하여 측정된 반복능은 0.415 μm 이며, 이는 대기의 온도변화에 기인한 레이저간섭계의 측정 오차임을 확인하였다.
- 3) 20 μm 의 거리를 2 $\mu\text{m}/\text{step}$ 이송시 반복능은 0.062 μm 이며, 이는 주로 스테이지의 온도변화에 기인함을 확인하였다.

참고문헌

1. Norio Taniguchi, "The state of the art of nano technology for processing of ultraprecision and ultrafine product", Precision Engineering, Vol 16, No. 1, pp. 5-24, 1994
2. Jiro Otsuka, "Nanometer level positioning using three kinds of lead screws", Nanotechnology, Vol. 3, pp. 29-36, 1992.
3. Shigeru Futami, "Nanometer Positioning and its micro-dynamics", Nanotechnology, Vol. 1, pp. 31-37, 1990.
4. Hiroshi Mizumoto, Katsumi Nomura and Tomio Matsubara, "An ultraprecision positioning system using a twist-roller friction drive", Precision Engineering, Vol. 15, No. 3, pp. 180-184, 1993.