

# 초정밀스테이지의 위치결정정도 향상에 관한 연구

황주호\*, 송창규, 박천홍, 이찬홍(한국기계연구원)

## A Study on the Improvement of Positioning accuracy of ultra-precision stage

J. H. Hwang, C. K. Song, C. H. Park, C. H. Lee(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 ultra-precision stage. We confirm, this ceramic aerostatic stage has a 10nm micro step resolution, and can be reduced mean of position error by compensation of numeric control command.

By means of analyzing relationship of position error and change of temperature, we build a on-line compensation algorithm of position error from the measured temperature data. So we can improve repeatability of ultra-precision stage up to 34%(0.095 $\mu$ m) of the normal condition.

**Key Words** positioning characteristic (위치결정 특성), micro step response(미소스텝 응답), position error (위치 오차), on-line compensation(실시간 보정), 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<sup>(1)</sup>

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<sup>(2)</sup>, 리니이모터<sup>(3)</sup>, 마찰 구동기구<sup>(4)</sup>등을 활용하고 있다.

만도체장비등 높은 생산성을 요구하는 고속의 스테이지는 리니이모터를 사용하는 비중이 차츰 높아가고 있는 추세이나, 나머지 분야에선 가격적으로 유리한 볼나사를 많이 선호하는 추세이다.

위치검출 장치로는 높은 정밀도를 요구하는 초정

밀 가공기, Stepper등에선 레이저 간섭계를 사용하고 있으며, Probe, 검사장비, 고정밀가공기 등에서 리니어 스케일을 많이 사용한다. 최근에는 열팽창계수가 낮고 리니어스케일 보다 정밀도가 높은 레이저 스케일이 사용되기 시작했으며, 가격적인 면에서 레이저 간섭계보다 유리하다.

본 연구는 실용성이 높은 초정밀 스테이지를 목적으로, 가이드는 공기베어링을, 구동기구는 볼나사를 사용하며 위치검출 장치는 레이저 스케일(Laser Scale)을 사용하는 스테이지의 위치결정 특성 및 수치보정으로 오차를 줄이기 힘든 반복정밀도의 영향요인 분석과 이를 보정하는 방법 연구를 수행하였다.

### 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 알루미늄 세라믹을 사용하고 있다. 사용된 재료의 특징은 Table 1과 같다.

스테이지의 25 $\mu$ m이내의 미소한 운동은 정전용량

형 변위계(ADE 3401)를 사용하였으며, 전체 스트로크에 대한 측정은 레이저간섭계(HP 5529A)를 사용하였다. 제작된 스테이지는  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 상대습도  $50 \pm 3\%$ 로 제어되는 항습실에서 실험을 수행하였다

반복정밀도의 온도변화에 의한 영향 연구를 위하여 실험환경 및 스테이지의 온도변화를 T형의 열전대를 사용하여 측정하였으며, 이때 스테이지의 변위를 정전용량형 변위계를 사용하여 Straight edge(평판도  $0.064\mu\text{m}$ , 열팽창 계수  $0.2\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ )를 참조면으로 사용하였다.

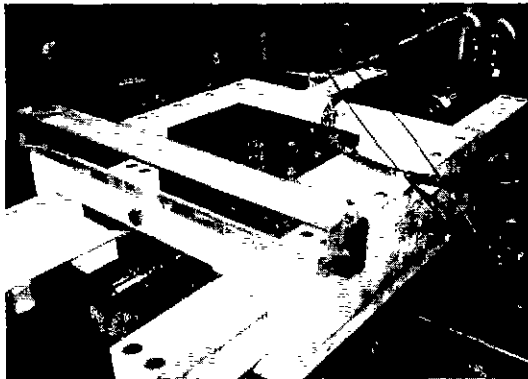


Fig.1 Photograph of aerostatic ceramic stage

Table 1 Element of aerostatic stage

	제작사/모델명	특징
stage	KIMM/자체제작	$\text{Al}_2\text{O}_3$ 세라믹 660×360×138 stroke:250mm
Controller	MEI/PCDSP	PID 제어 제어속도:1250Hz
볼나사	THK/ BNFN2505-2.5	C0급, 리드:5mm 나사부:375mm
서보모터	Parker/NO703F	827w
레이저스케일	SONY/ BSA75A-310N	Accuracy:0.72 $\mu\text{m}$ 분해능: 10nm 열팽창계수 : 0.7×10 <sup>-6</sup> /°C

### 3. 위치결정특성

#### 3.1 미소이송 및 오차보정

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 측정한 결과를 fig 2에 도시하였다. 두 가지 경우 모두 운동간

의 구분이 명확하며 이로부터 스테이지의 분해능은 10nm임을 확인 할 수 있다.

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

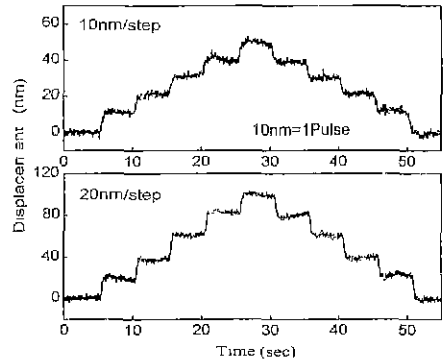


Fig. 2 Micro step response of stage

Fig. 3의 위그림은 레이저간섭계를 사용하여 10mm 간격으로 5회 왕복운동 시켰을때의 오차를 SO230-2의 규격에 의하여 분석한 결과이며, 밑의 그림은 이로부터 얻은 평균위치오차를 기준으로 정방향 및 역방향에 대한 수치보정을 수행한 후의 위치오차를 측정한 것이다.

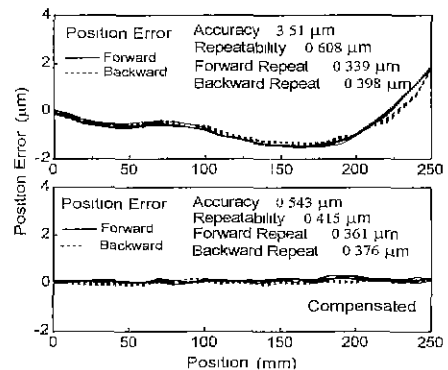


Fig. 3 Positioning accuracy of aerostatic stage

위치결정오차는 ISO230-2 규격에 의하여 Fig. 3의 평균위치오차(m)에 표준편차( $\sigma$ )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 반복정도만 향상되었다 따라서 수치 보정후의 위치결정정도는 주로 반복정밀도의 크기에 의하여 결정된다

#### 3.2 반복능

반복능에 영향을 미치는 요소를 찾기 위하여 원점에서부터 200mm 떨어진  $x=200\text{mm}$  위치를 유지하도록 위치제어를 수행하고 있는 상태에서, 레이저간섭계와 정전 용량형 변위계로 60분간 측정된 결과를 Fig 4에 나타내었다. 위치결정을 유지하는 상태에서도 실제의 변위는 계속하여 변동하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 두 개의 측정결과는 최대와 최소 크기가  $0.091/0.380\mu\text{m}$ 로 레이저간섭계로 측정된 경우 4.18배가 크고 그 경향도 차이가 큼을 확인할 수 있다. 사용된 레이저간섭계의 기술자료<sup>(5)</sup>에 의하면  $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 에서 광경로가 1m 떨어진 경우 약  $0.3\mu\text{m}$ 의 변동을 가지는 것으로 되어 있으므로, 스테이지의 요구정밀도를 측정하기에는 그 변동이 심하여 부적합하다.

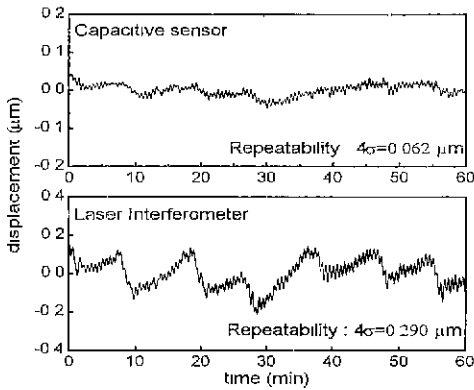


Fig. 4 Comparison of displacement of stage between capacitive sensor and laser interferometer

따라서 Fig. 3의 위치결정정도 측정시의 반복정밀도는 대부분이 레이저간섭계의 변동에 의하여 생긴 것으로 예상된다. 따라서 반복능의 실험에 있어, 정전용량형 변위계를 사용하여 일부지점을 대상으로 평가하였다.

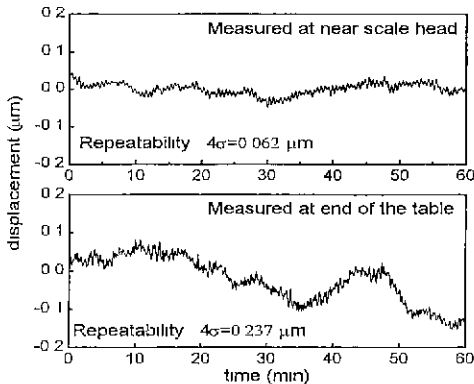


Fig. 5 Comparison of displacement of stage between near scale head and end of the table

Fig 5는 테이블의 위치를  $x=200\text{mm}$ 에 위치시킨 후 위치를 유지하도록 제어하였을 때 테이블 끝단의 변위를 측정된 결과이다. Fig. 5의 상단그림처럼 테이블의 중심인 스케일 헤드가 위치한 곳에서 변위를 측정할 경우 위치검출의 기준이 되는 지점으로  $0.062\mu\text{m}$ 의 양호한 반복정밀도를 보이는 반면, Fig.5의 테이블의 끝단에서 측정할 경우 위치검출장치로부터 150mm 가량 떨어져 있는 이유로 오차가 증가하여 반복정밀도가  $0.237\mu\text{m}$ 로 4배정도 커지게 된다.

오차의 원인을 살펴보기 위하여  $x=200$ 을 유지시키면서 9시간 동안 2초간격으로 테이블의 변위와 스테이지의 온도변화를 측정하였다. Fig 6의 상단은 측정된 변위를 하단은 온도변화로부터 스테이지의 각요소의 열팽창 계수를 고려하여 구한 결과이다. 그림에서 보이는 바와 같이 그 크기와 파형이 유사함을 알 수 있다. 따라서 스테이지의 온도변화가 스테이지의 반복능에 많은 영향을 줌을 확인할 수 있다 특히 가동하는 시간이 길수록 그 영향이 크리리 예상된다

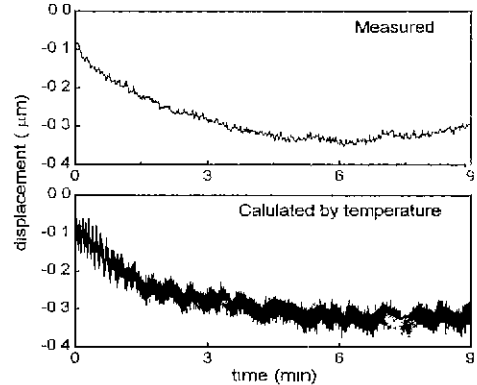


Fig 6 Comparison of measured and calculated displacement

### 3.3. 열적오차 보정에 의한 반복정밀도 향상

전 절에서 살펴본 바와 같이 온도변화를 통하여 위치오차를 예측하는 것이 가능하므로 실시간으로 온도를 측정하여 이로부터 위치오차를 예측하고 보정하도록 하였다. Fig. 6 하단의 온도측정을 통한 예측 값과 실제의 변위를 비교하여 보면 온도로부터 계산된 값 중 짧은 주기의 성분은 실제의 변위로 나타나지 않는 것을 알 수 있다 그리고 온도측정 분해능이  $0.001^\circ\text{C}$  이기 때문에 변동크기가  $0.2\text{--}0.3^\circ\text{C}$ 인 스테이지의 온도데이터에 측정상의 노이즈가 많이 존재하게 된다. 따라서 2초 간격으로 측정된 온도데이터로부터 계산된 위치 보정 값을 안정화하며 변위에 영향을 주는 성분을 실험을 통하여 초기 40sec 이후부터 400sec 이전에는 그때까지의 평균 값을 보정값으로 사용하였으며 이후에는 400sec의 이동 평균

을 보정 값으로 수행하였다 Fig 7은  $x=200$ 위치에 유지되도록 위치제어를 수행 중에 온도변화에 의한 오차를 실시간으로 보정을 수행한 결과이다. 위에서 부터 보정된 후의 오차를 측정 한 값, 오차 보정 값, 오차를 수행하지 않았을 때의 예상오차(측정 값-오차보정 값)을 나타낸 것이다. 보정하지 않았을 경우에 비하여 32.7%의 수준으로 감소하였다. 온도 변화의 측정을 통한 오차보정이 효과적임을 알 수 있다

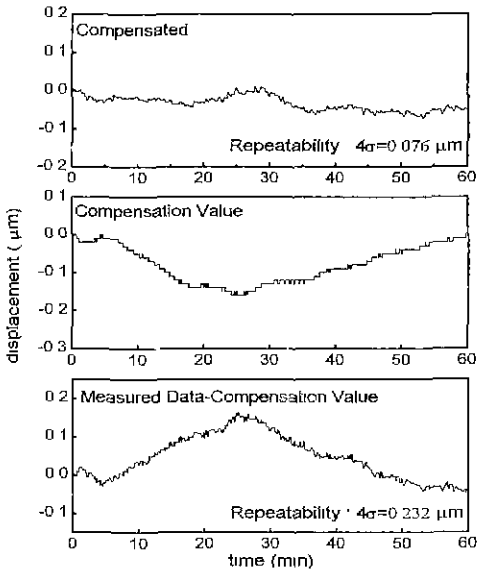


Fig. 7 On-line compensation of thermal error

스테이지가 200mm의 스트로크를 왕복20회 운동 하면서 200mm 지점에 정전 용량형 변위계를 앞의 실험과 마찬가지로 설치한 후 200mm에 도착한 후 측정장치를 트리거(trigger)하여 위치가 안정된 후의 2.5초간의 평균값을 위치오차로 나타내었다.

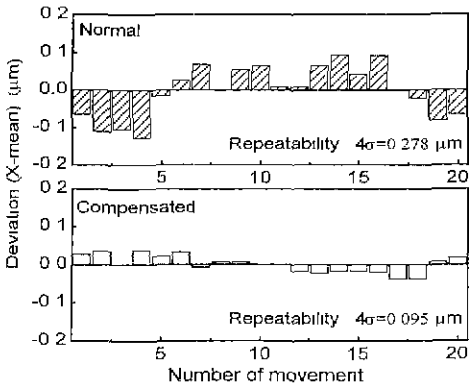


Fig. 8 Improvement of repeatability by compensating thermal error

실험을 수행하는 데 걸리는 시간은 30분이 소요되며 목표위치인 200mm 지점에 도달하였을 때 그때

의 온도변화에 의한 오차를 보정하도록 하였다. 보정을 수행하지 않은 경우에 비하여 약 34.1% 수준인  $0.095\mu\text{m}$ 으로 반복정밀도가 향상되는 효과가 있음을 확인하였다. 스테이지를 실제 왕복 운동하였을 때의 반복정밀도는 고정시켰을 때의 열변위에 의한 값보다 보정전후 모두 크게 나타나는데 이는 반복 운동에 의한 스테이지의 자세오차 등이 포함되어 있기 때문이라고 생각된다. 또한 현재의 열적 오차 예측 기법을 향상시키면 반복정밀도가 더욱 향상되리라 예상된다.

#### 4. 결론

초정밀공기정압 스테이지를 제작하이 위치결정 특성을 분석하고 오차를 보정하는 기법을 연구하여 다음과 같은 결론을 내렸다

- 1) 제작한 공기정압 스테이지는 10nm 스텝의 미소분해능이 가능함을 확인하였으며, 평균위치오차는 수치 보정을 통하여 향상시킬 수 있었음을 확인하였다
- 2) 반복정밀도가 스테이지의 온도변화에 의하여 기인하는 것을 알 수 있었으며, 이를 예측하는 모델을 수립하였다
- 3) 온도변화에 의한 오차보정을 통하여 오차가 가장 크게 나타나는 이송테이블의 끝단에서 반복정밀도를 오차보정전의 34.1% 수준인  $0.095\mu\text{m}$ 로 향상되었다.

#### 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.
5. HP5529A Dynamic Calibrator Technical Data, Hewlet Packard. p2