

유정압테이블의 위치결정오차요인 분석

오윤진*, 박천홍(한국기계연구원 공작기계그룹), 이득우(부산대학교 나노과학기술학부)

Analysis of Positioning Error Factors in the Hydrostatic Tables

Y. J. Oh, C. H. Park (KIMM), D. W. Lee (Pusan National Univ.)

ABSTRACT

In this paper, For improving the positioning accuracy of hydrostatic table, relationship between temperature of atmosphere and thermal characteristics of hydrostatic table is analyzed, and influence of thermal characteristics on positioning accuracy is also analyzed experimentally. From the experimental results, it is confirmed that positioning error and repeatability is 0.21 μ m and 0.18 μ m when the laser scale which has 0.01 μ m of resolution is used as feed-back unit. and also confirmed that thermal deformation of scale and supporter, which occurs by the temperature variation of atmosphere, works as limit of repeatability in long time operation.

Key Words : Hydrostatic table(유정압테이블), Positioning error(위치결정오차), Thermal characteristics(온도특성), Thermal deformation(열변형), Repeatability(반복정밀도)

1. 서론

유정압안내면은 비접촉, 저마찰에 따른 미소분해능 및 반복정밀도 향상 효과등을 기대할 수 있어, 비교적 낮은 이송속도에서 고강성이 요구되는 초정밀공작기계, 고정밀연삭기등의 이송계에 활발히 응용되고 있다^{1,2)}.

유정압안내면을 고정밀 이송계에 적용하는 경우, 마찰저항의 변동이 매우 작으므로, 기본적으로 이송시의 위치결정정밀도는 테이블 구동용 모터, 이송기구, 피드백유니트 등 이송계를 구동/제어하는 요소(이하 구동요소)의 정밀도특성에 대부분 의존한다. 따라서 레이저스캐일이나 레이저간섭계 등을 피드백유니트로 이용하는 경우, 테이블도 그 유니트가 갖는 정밀도만큼의 위치결정정밀도를 기대하게 된다. 그러나 서보미크론대 이내의 정밀도를 목표로 하는 경우에는, 항온실내에서 구동하는 환경을 갖추더라도, 미소한 마찰에 의한 빨연이나 공급유온의 온도변화, 대기온도의 변화등의 열원으로 인한 구조적인 열변형이, 시스템의 구성요소들이 갖춘 정밀도와 같은 수준이나 또는 그 이상의 오차요인으로 작용하므로 이에 대한 충분한 대책을 강구할 필요가 있다.

현재 Rank Pneumo 사를 필두로 하여 비교적 많은 기업들이 유정압안내면을 이용한 다양한 모델의 초정밀공작기계를 상용화하고 있으나³⁾ 이러한 열특성을 고려하여 정밀도를 안정화시키는 대책에 대한 자료들은 공개되지 않고 있으며, 실험적으로 규명한 결과들이 발표된 사례도 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는, 레이저스캐일을 피드백유니트로 사용하는 유정압안내면에 있어서, 위치결정정밀도의 안정적인 구현을 위해, 공급유온 변화에 따른 이송시스템 각부의 온도특성 및 구조적인 열변형특성을 실험적으로 검토하고 이를 특성이 위치결정오차에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 실험장치의 구성 및 예비실험

2.1 실험장치 및 실험방법

그림 1에 실험에 사용한 유정압안내면의 개략도와 실험을 위한 셋업을 나타내었다. 유정압안내면의 수직, 수평방향 패드는 모두 양면지지형으로 되어있으며, 길이 방향으로 3 개의 패드가 대향되어 배치되어 있다. 유정압안내면의 강성은 공급압력 100N/cm^2 에서 수평방향 $400\text{N}/\mu\text{m}$, 수직방향 $450\text{N}/\mu\text{m}$ 이며, 간극은 $25\mu\text{m}$ 로 구성되어 있다. 테

이들은 무침심형 리니어모터(LEA-S-4-S, Anorad)와 운동제어기(MEI)를 이용하여 PC로 구동되며, 레일측면에 부착되어있는 레이저스케일(BSA75A, 정밀도 0.72㎚ /300mm, Sony)의 피드백 신호를 이용하여 0.01μm 까지의 분해능으로 구동된다.

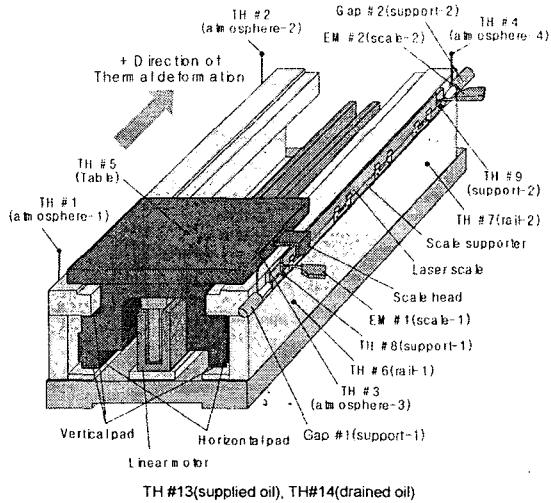


Fig. 1 Experimental setup of hydrostatic table

유정압안내면에 공급되는 윤활유는 윤활라인과는 별도로 윤활탱크와 연결되어있는 냉각장치(AKZ206, Daikin)를 이용하여 일정한 온도로 조절되며, 이 때의 설정온도는 대기온도를 기준으로 ±0.1°C 이내에서 특정온도를 설정할 수 있도록 되어 있다.

유정압안내면에는 그림 1과 같이, 실험장치주위의 4 곳에서의 대기온도, 테이블, 레일 및 스케일지지대 전후부 2 곳, 급유, 배유의 온도변화를 측정하기 위한 11 개의 열전대(T type)를 설치하였다. 또한 이 때의 열변위를 측정하기 위해 스케일지지대 전후에는 정전용량형센서(Micro sense3401, ADE)를, 레이저스케일 전후에는 전기마이크로미터(M401, Mitutoyo)를 설치하였다.

실험에 사용된 모든 측정기들은 A/D converter를 통해 데이터를 PC에 저장하도록 되어있으며, 20±0.6°C로 유지되는 항온실에서 실험을 수행하였다.

2.2 온도측정용 열전대의 보정

먼저, 실험에 사용한 열전대의 측정값 상대편차를 보정하기 위해 8 개의 열전대를 냉동실에 하루동안 집어넣은 상태에서의 측정결과를 그림 2에 나타내었다. 8 개의 열전대의 측정값은 모두 0.2°C 범위에 있었으며, 평균값을 기준으로 한 각 열전대의 편차를 0.1°C 단위로 보정하여 사용하였다.

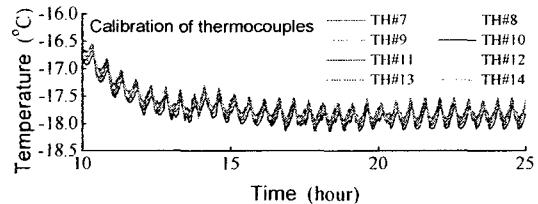


Fig. 2 Calibration of thermocouples used in experiment

2.3 열변위측정용 전기마이크로미터 및 정전용량형센서의 보정

열변위 측정을 위해 사용된 전기마이크로미터(이하, EM)와 정전용량형센서(이하, Gap sensor)의 항온실내에서의 열변위를 온도와 함께 측정하여 그림 3에 나타내었다. 두 센서 모두 실험에 사용될 고정용 치구에 설치하고, 제로들 재질의 스트레이트 에지(Straight edge)를 피측정면으로 하여 2 시간 동안의 변화를 측정한 결과로 항온실의 온도변화에 동기하여 열변위가 발생함을 알수 있다. 센서와 고정용 치구의 열변위는 항온실 온도편차 ±0.6°C에 대해 정전용량형센서의 경우, ±0.02㎚의 열변위로 측정하고자 하는 범위이하 영역이나, 전기마이크로미터의 경우는 열변위 수준이 ±0.3㎚로 측정대상의 변위값 이상이 될 가능성이 있다.

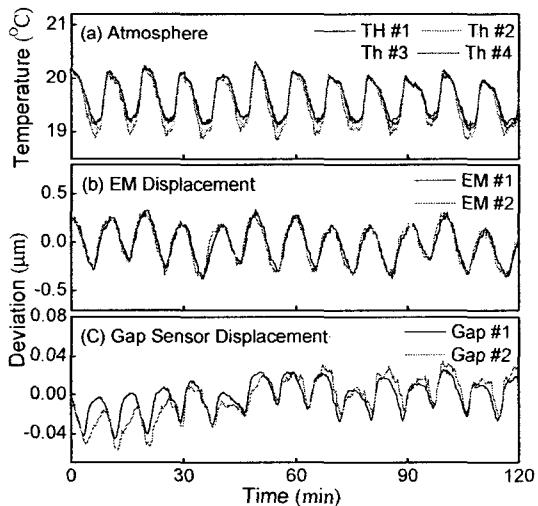


Fig. 3 Displacement of EM and Gap sensor by temperature variation

따라서, 본 실험에서는 측정치에 포함되는 전기마이크로미터의 열변위오차를 최소화하기 위해, 마이크로미터의 열변위와 항온실 온도주기와의 편차에 대한 비에 따라 계인값을 산출하여 열변위오차를 보정하고자 하였다. 따라서, 이후의 실험에서는 항온실 온도변화에 따라 산출된 계인값 0.48㎚/°C

를 적용하여 센서의 열변위를 구하고, 측정치로부터 계산된 센서 열변위를 소거하는 방법에 의해 실험을 수행하였다.

2.4 유정압안내면의 이송분해능

그림 4는 실험용 유정압안내면의 미소이송분해능을 나타낸 것으로, 레이저스케일의 최소분해능인 0.01 μm 까지 안정적으로 구동됨을 알 수 있다.

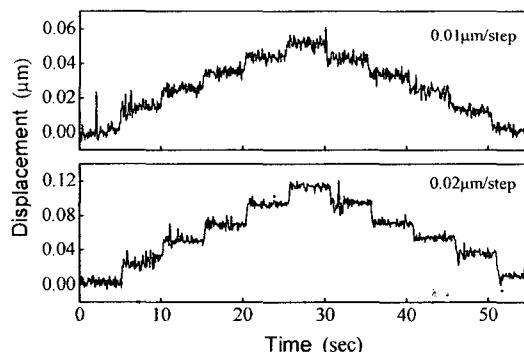


Fig. 4 Micro step characteristics of hydrostatic table

3. 유정압안내면의 위치결정오차 측정

3.1 레이저간섭계의 온도특성 보정

실험용 유정압안내면의 위치결정정밀도를 측정하기 위해 사용한 레이저간섭계의 온도특성을 측정하여 그림 5(a)에 나타내었다. 인터페로미터와 리플렉터를 모두 제로풀위에 250mm 간격으로 설치하고 정지상태에서 한 시간동안의 변화를 측정한 결과로, 항온실의 온도변화에 동기하여 0.17 μm (2σ 기준)의 반복오차를 나타냄을 알 수 있다. 이것은 온도변화에 따른 레이저의 파장변화로 굴절율이 변화하기 때문이며, 본 측정에서는 이러한 굴절율변화를 Edlen의 보정식⁴⁾을 이용하여 보정하였다.

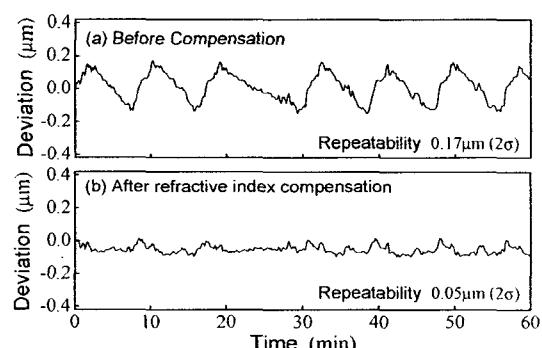


Fig. 5 Effect of refractive index compensation in measured data using laser interferometer

그림 5(b)는 그림 5(a)의 측정값을 보정한 후의

결과로, 반복정밀도는 0.05 μm (2σ 기준)까지 향상됨을 알 수 있다. 습도에 대한 보정의 어려움 및 밀리 고정용 치구들의 미세한 변화등으로 이 이상의 보정은 어려웠으며, 따라서 본 실험에 있어 위치결정정밀도 측정값의 오차범위는 $\pm 0.05\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

3.2 유정압안내면의 위치결정오차

그림 6은 실험용 유정압안내면의 위치결정정밀도를 ISO230-2 규격에 의하여 측정한 결과로, 초기의 위치결정오차 및 아에 대한 소프트웨어적인 오차보정(이하, NC 보정)과 굴절률오차보정을 수행한 결과도 같이 나타내었다. 이때, 위치결정오차는 3.08 μm 에서 0.21 μm 로 크게 향상됨을 알 수 있으나, 반복오차는 각각 0.29 μm (4σ), 0.18 μm (4σ)로 위치결정정밀도에 비해 크게 향상되지 않음을 알 수 있다. 또한, 보정후의 위치결정정밀도는 반복오차와 거의 같은 크기로 나타나고 있어 반복오차에 의해 위치결정정밀도가 더 이상 개선되지 않을 수 있다.

이러한 오차값은 피드백센서로 사용하는 레이저스케일 정밀도의 수십배에 달하는 수준으로, 초정밀 위치결정을 위해서는 이에 대한 원인규명이 필요하다. 그림 5(c)는 보정후의 위치결정정밀도에 대해 하나의 프로파일을 나타낸 것으로, 위치결정정밀도 0.1 μm 보이고 있다.

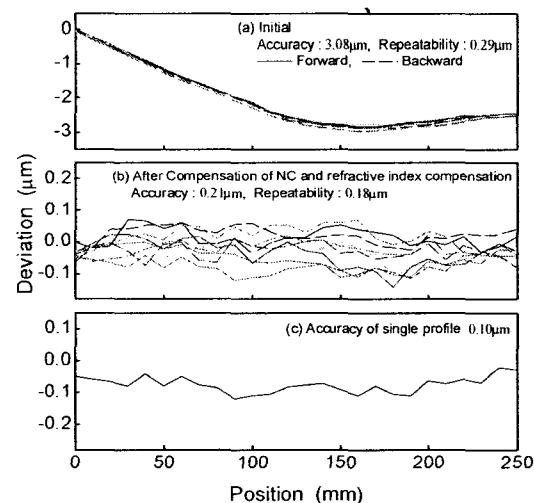


Fig. 6 Positioning error of hydrostatic table before and after compensation

4. 열변형에 따른 위치결정오차요인 분석

레이블의 구조적인 열변형이 위치결정오차에 미치는 영향을 확인하기 위해, 피드백요소인 스케일 양단과 이를 지지하는 지지대 양단의 열변위를 온

도와 함께 측정하였다. 그림 7(a)는 테이블 주변 4 곳의 대기온도를 평균하여 편차를 구해서 나타낸 것이며, 동시에 측정한 스케일 지지대와 스케일의 변위는 그림 7(b)에 나타내었다. 항온실 온도변화 $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ 에 대해 정전용량형센서는 각각 $\pm 0.04\text{ppm}$, $\pm 0.15\text{ppm}$ 를 보이고 있으며, 전기마이크로미터는 두 센서 모두 최대 $\pm 0.5\text{ppm}$ 의 변위를 보이고 있다. 한편, 센서의 예비실험에서 알 수 있듯이 항온실내의 온도주기와 동기화하지 않는 변위파형과 사용된 두 정전용량형센서의 변위차로 부터, 항온실 온도변화에 따라 스케일과 스케일 지지대에 변위가 발생되어 측정되고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 각각의 파형들은 온도의 변화주기와 같은 주기의 성분으로, 항온실 온도변화에 따라 피드백요소가 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다.

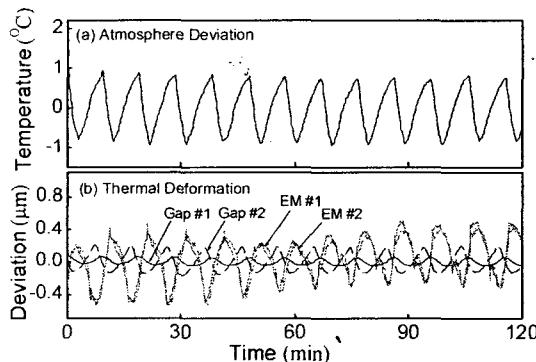


Fig. 7 Displacement of scale and scale supporter by thermal deformation

그림 8은 그림 7(b)로부터 스케일 양단과 스케일 지지대 양단에 설치된 센서의 검출 변위를 차감하여 열변형에 의한 각각의 절대위치 변화를 구해서 나타낸 것이다. 항온실의 온도 변화주기에 따라 스케일과 스케일 지지대의 위치가 각각 0.21ppm , 0.37ppm 변하고 있음을 보이고 있다.

한편, 제로들 재질로 만들어진 스케일의 열팽창계수는 $0.7 \times 10^{-6}^{\circ}\text{C}^{-1}$ 이므로, 스케일의 위치변화는 스케일 지지대의 열변위에 따라 고정을 위한 체결력에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

또한, 겹증을 위해 동시에 측정한 레이저간섭계에 의한 테이블의 위치결정밀도도 같이 나타내었으며, 오차의 차이는 있으나, 주기적으로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. 열변형에 의한 스케일 위치오차와 레이저간섭계에 의한 측정위치오차의 정량적인 차이는, 레이저 간섭계의 경우 테이블 중앙에서 측정을 수행하고, 열변위의 측정은 스케일이 설치된 테이블 측면에서 수행함에 따른 오차의 영향으로 판단된다.

스케일의 위치변화는 이송테이블의 위치결정밀도의 한계로 작용하게 되므로, 위치결정밀도를 보다 향상시키기 위해서는 그라나이트나 세라믹과 같은 저열팽창재료를 사용하여 스케일 지지대를 제작하는 것이 필요하다고 판단된다

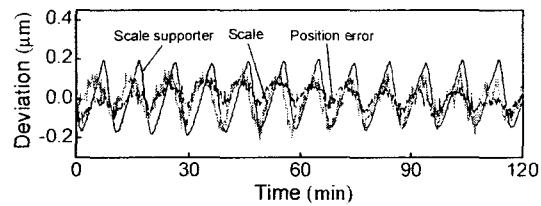


Fig. 8 Positioning error of hydrostatic table by thermal deformation

5. 결론

본 논문에서는 -레이저스케일을 이용한 초정밀 위치결정용 유정압안내면에 있어서, 대기온도 변화에 따른 테이블의 열변형 특성을 실험적으로 검토하고 이를 특성이 위치결정오차에 미치는 영향을 분석하였다. 실험결과로부터, 대기온도의 변화주기와 동조하여 스케일 지지대의 열변형이 발생하며, 이에 따른 스케일의 위치오차에 의해 테이블의 위치결정오차가 변하고 있음을 실험적으로 확인하였다. 또한, 공급유온의 변화에 따른 유정압테이블과 테이블이나 스케일지지대 등과의 온도차에 의한 열변형이 유정압테이블의 반복정밀도를 악화시키는 요인인 될수 있음을 판단할 수 있었다.

참고문헌

1. 대우중공업(주) 공작기계연구소, "초정밀비구면가공기 기술개발에 관한 연구," 첨단생산시스템개발사업보고서, 1995.
2. 武野伸勝, "最近の海外の研削盤の趨勢," 日本砥粒學會誌, Vol. 39, No. 6, pp.289-292, 1995.
3. Nanoform 600 Catalog, Rank Pneumo Co., 1992.
4. HP5528A Laser Measurement System User's Guide, pp.19-1~pp.19-7, 1984.