

초정밀위치결정을 위한 유정압안내면의 온도특성 분석

박천흥*, 오윤진, 황주호(한국기계연구원공작기계그룹), 이득우(부산대 기계공학과)

Thermal Characteristics of Hydrostatic Guideway in Ultra Precision Positioning

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

ABSTRACT

Thermal characteristics of hydrostatic guideway is largely depended on the temperature of supplied oil. For improving the positioning accuracy of hydrostatic guideway, relationship between setting temperature of oil cooler and thermal characteristics is analyzed, and influence of thermal characteristics on positioning accuracy is also analyzed experementally in this paper. Laser scale which has 0.01 μ m of resolution is used as feed-back unit. From the experimental results, it is confirmed that positioning error and repeatability is minimize upto 0.21 μ m and 0.18 μ m when the temperature of supplied oil is setting equal to temperature of atmosphere, and also confirmed that thermal deformation, which occurs by the temperature deviation between table and rail or scale supporter, works as limit of repeatability in long time operation.

Key Words : Hydrostatic guideway(유정압안내면), Ultra precision positioning(초정밀 위치결정), Thermal characteristics(온도특성), Thermal deformation(열변형), Repeatability(반복정밀도)

1. 서론

유정압안내면은 비접촉구동에 따른 높은 운동정밀도와 더불어, 저마찰에 따른 미소분해능 및 반복정밀도 향상 효과등을 기대할 수 있어, 비교적 낮은 이송속도에서 고강성이 요구되는 초정밀공작기계, 고정밀연삭기등의 이송계에 활발히 응용되고 있다¹⁾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 레이저스케일이나 레이저간섭계 등을 피드백유니트로 이용하는 경우, 테이블도 그 유니트가 갖는 정밀도만큼의 위치결정정밀도를 기대하게 된다. 그러나 서브미크론대 이내의 정밀도를 목표로 하는 경우에는, 항온실내에서 구동하는 환경을 갖추더라도, 미소한 마찰에 의한 발열이나 공급유온의 온도변화, 대기온도의 변화등의 열원으로 인한 구조적인 열변형이, 시스템의 구성요소들이 갖는 정밀도와 같은 수준이나 또는 그 이상의 오차

요인으로 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 열특성들을 고려하여 정밀도를 안정화시키는 대책에 대한 자료들은 공개되지 않고 있으며, 실험적으로 규명한 결과들이 발표된 사례도 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는, 레이저스케일을 피드백유니트로 사용하는 유정압안내면에 있어서, 위치결정정밀도의 안정적인 구현을 위해, 테이블에 공급되는 윤활유의 온도특성을 좌우하는 오일냉각장치의 기준온도 설정방법에 따른 이송시스템 각부의 온도특성 및 열변형특성을 실험적으로 검토하고 이들 특성이 위치결정오차에 미치는 영향을 분석하고자 하였다.

2. 실험장치의 구성 및 예비실험

2.1 실험장치 및 실험방법

그림 1 에 실험에 사용한 유정압안내면의 개략도를 나타내었다. 유정압안내면의 수직, 수평방향 패드는 모두 양면지지형으로 되어있으며, 길이 방

향으로 3 개의 패드가 대향되어 배치되어 있다. 유정압안내면의 강성은 공급압력 $100\text{N}/\text{cm}^2$ 에서 수평방향 $400\text{N}/\mu\text{m}$, 수직방향 $450\text{N}/\mu\text{m}$ 이며, 간극은 $25\mu\text{m}$ 로 구성되어 있다. 테이블은 무철심형 리니어 모터(LEA-S-4-S, Anorad)와 운동제어기(MEI)를 이용하여 PC 로 구동되며, 레일 측면에 부착되어있는 레이저스케일(BSA75A, 정밀도 $0.72\mu\text{m}/300\text{mm}$, Sony)의 피드백 신호를 이용하여 $0.01\mu\text{m}$ 까지의 분해능으로 구동된다.

유정압안내면에 공급되는 윤활유는 윤활라인과는 별도로 윤활탱크와 연결되어있는 냉각장치(AKZ206, Daikin)를 이용하여 일정한 온도로 조절되며, 이 때의 설정온도는 대기온도를 기준으로 $\pm 10^\circ\text{C}$ 이내에서 특정온도를 설정할 수 있도록 되어 있다.

유정압안내면에는 그림 1 과 같이, 실험장치주위의 2 곳에서의 대기온도, 레일, 테이블, 스케일지지대 전후부 2 곳 및 급유, 배유의 온도변화를 측정하기 위한 8 개의 열전대(T type)를 설치하였으며 A/D converter 를 통해 온도데이터를 PC 에 저장한다. 또한 이 때의 열변위를 측정하기위해 레일전후, 스케일지지대 전후에 4 개의 정전용량형센서(Micro sense3401, ADE)을 설치하였다. 또한 모든 실험은 항온실내에서 수행하였다.

2.2 온도측정용 열전대의 보정

먼저, 실험에 사용한 열전대의 측정값 상대편차를 보정하기위해 8 개의 열전대를 냉동실에 하루동안 집어넣은 상태에서의 측정결과를 그림 2 에 나타내었다. 8 개의 열전대의 측정값은 모두 0.2°C 범

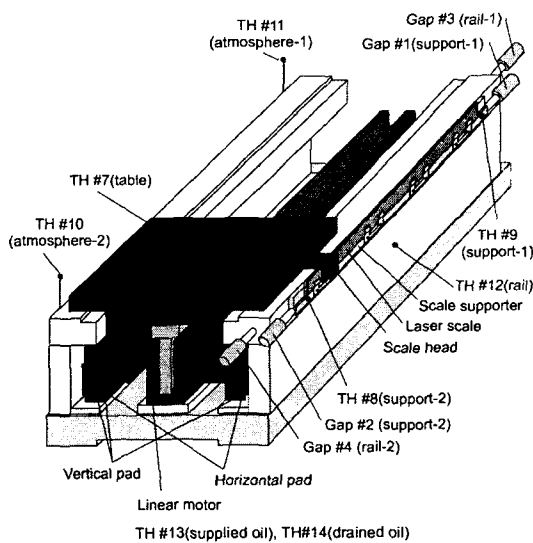


Fig. 1 Experimental setup of hydrostatic table

위에 있었으며, 평균값을 기준으로한 각 열전대의 편차를 0.1°C 단위로 보정하여 사용하였다.

2.3 레이저간섭계의 온도특성 보정

실험용 유정압안내면의 위치결정정밀도를 측정하기 위해 사용한 레이저간섭계의 온도특성을 측정하여 그림 3(a)에 나타내었다. 인터페로미터와 리플렉터를 모두 계로돌위에 250mm 간격으로 설치하고 아무 움직임없이 한 시간동안의 변화를 측정 한 결과로, 항온실의 온도변화에 동기하여 $0.17\mu\text{m}$ (2σ 기준)의 반복오차를 나타냄을 알 수 있다. 이것은 온도변화에 따른 레이저의 파장변화로 굴절율이 변화하기 때문이며, 본 측정에서는 이러한 굴절율변화를 Edlen 의 보정식⁴⁾을 이용하여 보정하였다. 그림 3(b)는 그림 3(a)의 측정값을 보정한 후의 결과로, 반복정밀도는 $0.05\mu\text{m}$ (2σ 기준)까지 향상됨을 알 수 있다. 습도에 대한 보정의 어려움 및 밀러 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.

2.4 유정압안내면의 이송분해능

그림 4 는 실험용 유정압안내면의 미소이송분해능을 나타낸 것으로, 레이저스케일의 최소분해능인 $0.01\mu\text{m}$ 까지 안정적으로 구동됨을 알 수 있다.

3. 윤활유온 설정에 따른 온도특성 분석

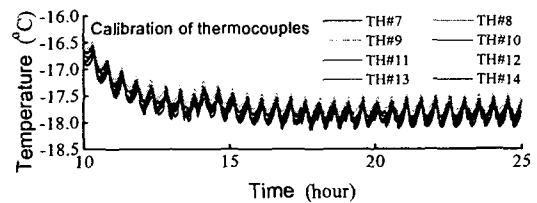


Fig. 2 Calibration of thermocouples used in experiment

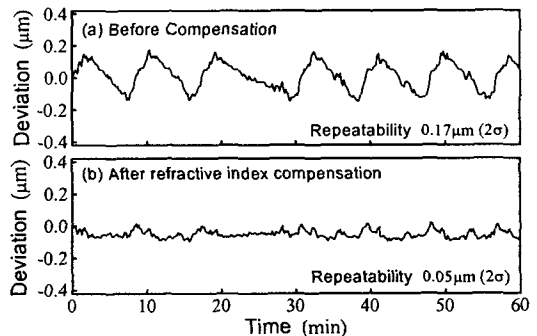


Fig. 3 Effect of refractive index compensation in measured data using laser interferometer

3.1 냉각장치 기준센서 설정에 따른 특성

실험에 사용한 윤활유 냉각장치는 대기온도, 냉각기 구조물, 냉각장치에 유입되는 윤활유 온도 및 유출되는 윤활유 온도 등 4 개의 온도를 측정할 수 있는 센서가 부착되어 있으며, 이 가운데 하나의 센서를 선택하여 냉각대상 기준센서로 설정할 수 있도록 되어 있다. 이 가운데 윤활유온도를 직접 제어할 수 있는 유입윤활유 및 유출윤활유 온도 측정용 센서를 각각 기준센서로 설정했을 때, 유정압 안내면에 공급되는 공급유온도, 배유온도 및 테이블의 온도를 각각 측정하여 그림 5 에 나타내었으며, 냉각설정온도는 두 경우 모두 20°C로 하였다.

먼저, 두 경우 모두 안내면으로 공급되는 유온은 $\pm 0.15^\circ\text{C}$ 내에서 제어됨을 보이고 있으며, 항온실의 온도는 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 내에서 제어됨을 보이고 있다. 한편, 냉각장치에 유입되는 유온을 대상으로 냉각하는 경우, 공급유온은 대기온도와 냉각장치의 냉각주기의 합성파형으로 나타나는 반면, 유출유온을 대상으로 냉각하는 경우에는 냉각장치의 냉각주기가 주도적인 파형으로 됨을 보이고 있으며, 테이블과 배유온도도 이러한 특성의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 유정압안내면 전체의 열변형에 따른

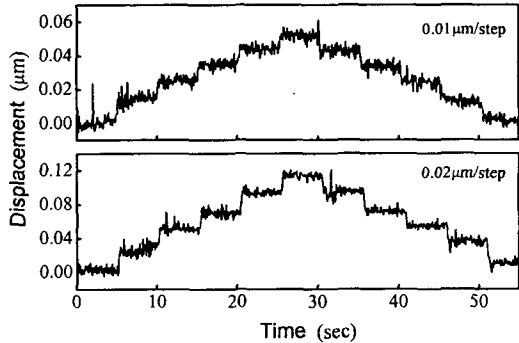


Fig. 4 Micro step characteristics of hydrostatic table

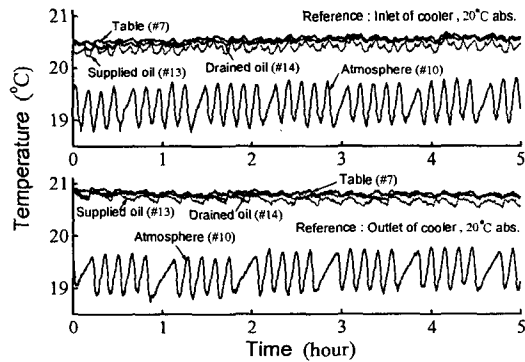


Fig. 5 Temperature variations in hydrostatic table by the reference point of oil temperature control in cooler

정밀도 측면을 고려하는 경우, 유온과 대기온도가 동기화되는 것이 열변형오차를 최소화할 수 있으며 따라서 이후 본 실험에서는 냉각장치에 유입되는 유온을 측정하는 센서를 기준센서로 설정하여 실험을 수행하였다.

3.2 냉각온도 설정에 따른 특성

유정압안내면에 공급되는 윤활유의 온도와 대기온도와의 관계에 따른 유정압안내면 각 부에서의 온도특성의 변화를 분석하기위해, 공급유온이 대기온도보다 높을 경우, 같을 경우 및 낮을 경우에 대한 실험결과를 그림 6 및 그림 7에 정리하였다.

그림 6 은 각 경우에 있어, 워밍업 초기 1 시간에 해당하는 공급유온 및 배유유온의 변화를 비교한 것으로, 냉각온도를 대기온도와 같거나 높게 설

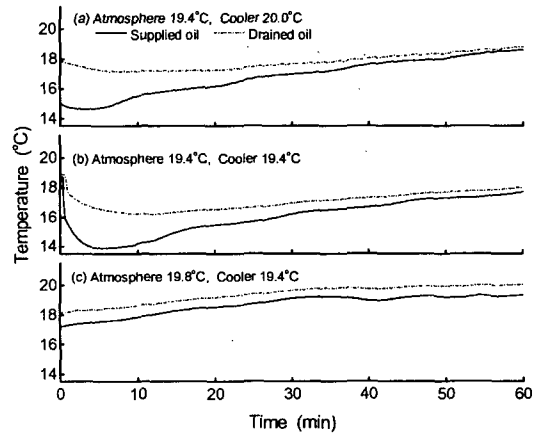


Fig. 6 Variations of oil temperature in warm-up state by setting temperature of cooler

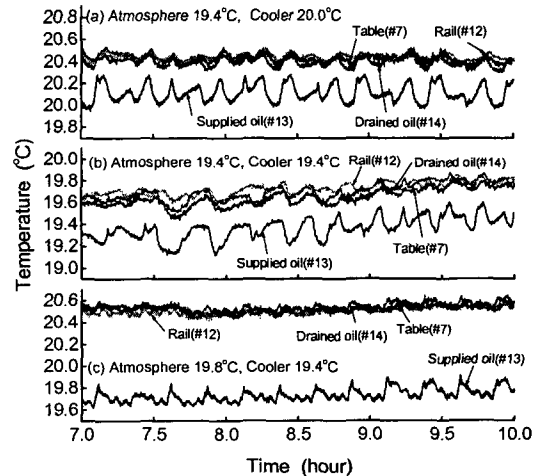


Fig. 7 Temperature variations of hydrostatic table in steady state by setting temperature of cooler

정하는 경우보다, 낮게 설정하는 것이 워업시간이 빨라짐을 보이고 있다.

그림 7 은 각 경우에 있어, 충분히 워업이 끝난 7 시간 이후의 상태에서 유정압안내면 각 부의 온도변화를 측정된 결과이다.

먼저, 세 경우에 있어 테이블, 레일 및 배유온도를 보면 어느 경우에도 충분한 워업이 됨에 따라 세 부위의 온도는 거의 동일하게 평형상태가 됨을 알 수 있다. 또한, 배유온도를 포함한 각 부의 온도는 공급유온에 비해 약간 높아짐을 보이고 있다. 이것은 유정압안내면에 사용되는 모세관 및 간극내에서의 저항에 의해 테이블내를 통과하는 윤활유의 온도가 상승하게 되고, 테이블과 테이블 부근의 레일의 온도가 그에 맞추어 평형이 되기 때문이다. 한편, 설정온도를 대기온도보다 낮게 한 그림 7(c)의 경우에는 다른 경우에 비해 공급유온과 배유온도의 차이가 커지게 됨을 보이고 있는데, 이것은 위에서의 저항효과 이외에도 대기온도보다 낮은 공

급유온이 공급배관등을 통과하는 과정에서 대기로 부터의 열전도로 인해 갖는 온도상승효과가 포함되기 때문으로 추정된다.

그림 8 은 각 경우에 있어서 유정압안내면의 위치결정정밀도를 5 회 반복 측정된 결과를 나타낸 것으로, 공급유온을 대기온도와 같도록 설정한 경우가 위치결정오차 및 반복정밀도가 가장 향상됨을 보이고 있다. 이것은 그림 8(b)의 경우가, 각 부의 온도와 대기온도와의 차가 가장 적어 열변형의 영향이 가장 적었기 때문으로 판단된다.

그림 9(a)는 그림 8(b)의 측정결과를 이용하여 오차값을 소프트웨어적으로 보정한 후 다시 측정된 결과로, 위치결정정밀도는 반복정밀도와 같은 수준인 $0.21\mu\text{m}$ 까지만 개선됨을 보이고 있다. 그림 9(b)는 그 때의 임의의 1 회 측정값만을 나타낸 것으로, 각각의 1 회 측정된 결과는 $0.10\mu\text{m}$ 까지의 위치결정오차가 얻어지나, 5 회 반복측정결과를 중복해 나타내면, 측정시간(약 20 분)동안의 열변형으로 반복정밀도가 악화되는 것을 알 수 있다.

4. 테이블의 이송에 따른 열변형 분석

열변형이 위치결정오차에 미치는 영향을 확인하기 위해, 테이블이 250mm 구간을 반복 이동할 때, 스케일을 지지하는 지지대 양단과 레일 양단의 변위를 측정하였다. 그림 10 은 양단의 측정결과를 평균하여 지지대와 레일의 중심점의 변위를 구해서 나타낸 것이다. 지지대와 레일의 중심은 테이블이 1 번 왕복함에 따라서 각각 약 $0.4\mu\text{m}$ 및 $0.2\mu\text{m}$ 의 탄성변위 형태를 보이고 있으며, 3 시간에 걸쳐 절대위치를 기준으로 각각 약 $0.3\mu\text{m}$ 의 변위를 보이고 있다. 테이블의 왕복에 따른 중심점의 변위는 상대적으로 레일보다 높은 온도를 갖는 테이블내 윤활유에 의한 열변형과 함께, 유막압력에 따른 탄성변형도 그 원인으로 추정할 수 있으나, 어느 경우라도 탄성변위이므로 위치오차보정시에 함께 보정되어 그림 9 와 같이 보정후의 측정결과에는 영

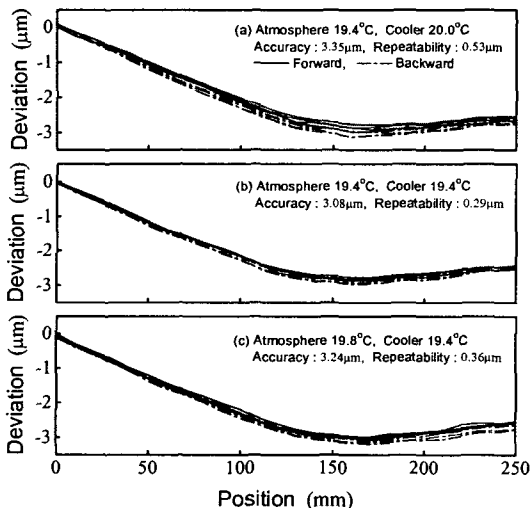


Fig. 8 Positioning errors and repeatabilities of hydrostatic table by setting temperature of cooler

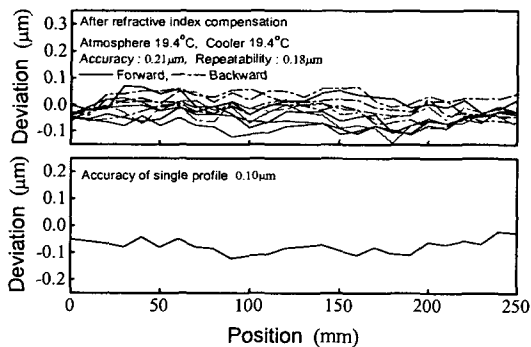


Fig. 9 Compensated positioning error of hydrostatic table

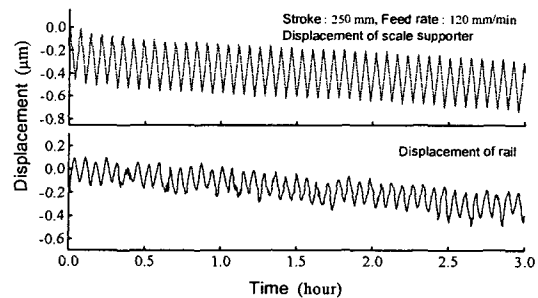


Fig. 10 Displacement of scale supporter and rail when the hydrostatic table is fed

향을 미치지 않을 것으로 추정된다. 그러나 장시간에 따른 중심점의 변위는, 테이블로부터 전달되는 열에 의한 열변형이 주원인이 되며, 이 경우에는 보정후에도 남게되므로 궁극적으로 위치결정오차 및 반복오차에 영향을 미치게 된다. 유정압안내면에 있어서 모세관, 간극등의 저항에 따른 윤활유의 온도상승은 불가피하며, 따라서 이러한 장시간의 열변형에 의한 오차를 최소화하고 위치결정오차를 보다 향상시키기 위해서는 그라나이트나 세라믹과 같은 저열팽창재료의 사용이 필요하다고 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는, 레이저스케일을 이용한 초정밀 위치결정용 유정압안내면에 있어서, 테이블에 공급되는 윤활유의 온도특성을 좌우하는 오일냉각장치의 기준온도 설정방법에 따른 안내면 각 부의 온도 특성 및 열변형특성을 실험적으로 검토하고 이들 특성이 위치결정오차에 미치는 영향을 분석하였다. 실험결과로부터, 냉각장치에 유입되는 윤활유의 온도를 기준으로 유온을 제어하는 것이 대기온도와 동조된 공급유온을 설정할 수 있어 열적 안정화에 유리함을 알 수 있었다. 한편, 공급유온을 대기온도와 동일하게 설정함으로써 테이블의 위치결정오차와 반복정밀도를 최소화할 수 있음을 확인하였다. 또한 테이블과, 레일이나 스케일지지대 등과의 온도차에 의한 열변형이, 장시간 구동시, 유정압안내면의 반복정밀도를 악화시키는 요인임을 실험을 통해 확인하였다.

참고문헌

1. 대우중공업㈜ 공작기계연구소, "초정밀비구면가공기 기술개발에 관한 연구," 첨단생산시스템개발사업보고서, 1995.
2. 武野仲勝, "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.