

능동제어모세관을 이용한 초정밀 유정압테이블의 5 자유도 운동 오차 보정

박천홍*, 오윤진, 이 후상(한국기계연구원), 이득우(부산대학교)

Compensation of Five DOF Motion Errors in a Ultra Precision Hydrostatic Table Using the Active Controlled Capillaries

C. H. Park, Y. J. Oh, H. Lee(Machine Tools Group, KIMM), D. W. Lee(Nano Eng. Faculty, PNU)

ABSTRACT

Five DOF motion errors of a hydrostatic bearing table driven by the coreless type linear motor were compensated utilizing the active controlled capillaries in this study. Horizontal linear motion and yaw error were simultaneously compensated using two active controlled capillaries and vertical linear motion, pitch and yaw error were also simultaneously compensated using three active controlled capillaries. By the compensation, horizontal linear motion accuracy and yaw were improved from 0.16 μm and 1.96 arcsec to 0.02 μm and 0.03 arcsec. Vertical linear motion accuracy, pitch and roll were also largely improved from 0.18 μm , 2.26 arcsec and 0.14 arcsec upto 0.03 μm , 0.07 arcsec and 0.02 arcsec. The compensated motion errors were within the range of measuring repeatability which was $\pm 0.02 \mu\text{m}$ in the linear motion and ± 0.05 arcsec in the angular motion. From these results, it is found that the motion error compensation method utilizing the active controlled capillaries are very effective to improve the five motion accuracies of the hydrostatic bearing tables.

Key Words : 5DOF motion error(5 자유도 운동오차), Compensation(보정), Hydrostatic table(유정압테이블), Active controlled capillary(능동제어모세관), Sequential two point method(축차 2 점법)

1. 서론

본 논문에서는, 압전소자를 이용한 능동제어모세관(Active Controlled Capillary, 이하 ACC 로 표기)을 이용하여 5 자유도 운동오차를 보정함으로써, 직선운동오차 0.1 μm , 각운동오차 0.1 arcsec 이내의 운동정밀도를 갖는 초정밀 유정압테이블을 구현하고자 하였다. 이를 위해 5 자유도 운동오차 가운데 수평방향의 운동오차(직선운동오차 및 요오차)에 대해서는 2 개의 ACC 를, 수직방향의 운동오차(직선운동오차, 피치 및 롤오차)에 대해서는 3 개의 ACC 를 이용하여 5 자유도 운동오차를 동시에 보정할 수 있는 시스템을 구성하였다.

보정상의 정밀도를 높이기 위해 먼저 5 개의 ACC 에 대한 개인조정을 수행하였으며, 보정 과정의 효율화를 위해 5 자유도 운동오차 성분에 대한 각각의 보정계수를 예비실험을 통해 설정하였다.

또한, ACC 에 사용되는 압전소자의 비선형성, ACC 개인의 설정오차 등에 의해 1 회의 보정만으로는 목표정밀도를 얻을 수 없으므로, 반복제어법을 적용하여 목표정밀도가 얻어질 때 까지 각 ACC 에의 인가전압을 누적시켜가며 반복 보정을 수행하였다.

2. 능동제어모세관의 구조 및 보정원리

Fig. 1 에 ACC 의 구조를 나타내었다. 외형구조는 원통형으로 되어 있으며 상, 하측 구조부와 그 중간에 삽입되는 판스프링의 세 부분으로 구성되어 있다. 상측 구조 중앙부와 판스프링 사이에는 수십 μm 의 간극이 있어 원판형의 모세관 역할을 하도록 되어 있다. 이 간극은 하측 구조의 내부에 조립되어 있는 압전소자의 구동력변화에 의한 판스프링의 탄성변위에 의해 조절된다. 즉, 압전소자에 가해지는 입력전압의 조절에 의해 모세관간극이 능동적으

로 제어될 수 있는 구조로 되어 있다. 또한 압전소자에 대한 초기예압은 하부에 설치된 스크류에 의해 설정된다.

ACC 를 이용한 양면지지형 유정압테이블의 오차보정 원리를 Fig. 2 에 나타내었다. Fig. 2(a)와 같이 모세관간극 h_{c1} 과 이에 상응하는 베어링간극 h_{11}, h_{21} 에서 평형상태가 되어있는 테이블에 있어, ACC 내 압전소자에 전압 $E(x)$ 를 인가하면 모세관간극은 h_{c2} 로 변하게 되며, 이 때의 모세관간극의 변화분 $\Delta h_c (= h_{c1} - h_{c2})$ 에 비례하여 테이블내 유정압베어링 포켓에 유입되는 유량은 변화하게 된다. 이 유량변화에 의해 포켓압력이 변화하게 되며, 테이블은 Fig. 2(b)와 같이 상, 하 패드의 힘의 평형이 이루어지는 새로운 평형위치로 Δh 만큼 이동하게 된다. 테이블의 이송방향 위치 x 에 따른 운동오차 $e(x)$ 에 대해 위의 과정을 연속적으로 수행함으로써 운동오차를 능동적으로 보정할 수 있게 된다.

3. 실험장치의 구성 및 기본특성실험

3.1 실험장치 및 실험방법

유정압테이블은 수직, 수평 모두 양면지지형으로 되어있고 무철심형 리니어모터(LEA-S-4, Anorad)와 제어기(PC/DSP, MEI)를 이용하여 PC 로 구동되며 250 mm 의 스트로크를 갖는다. 유정압테이블에 공급되는 윤활유는 윤활탱크와 연결되어 있는 냉각장치(AKZ206, Daikin)를 이용하여 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 의 온도로 제어된다.

유정압테이블에는 모두 5 개의 ACC 가 설치되며, 그 가운데 2 개는 수평방향의 오차보정을 위해

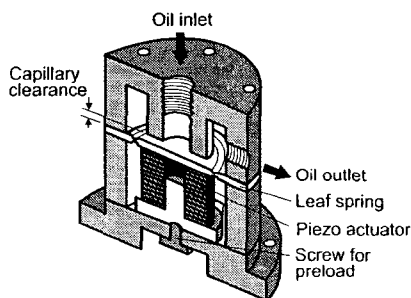


Fig. 1 Structure of an active controlled capillary

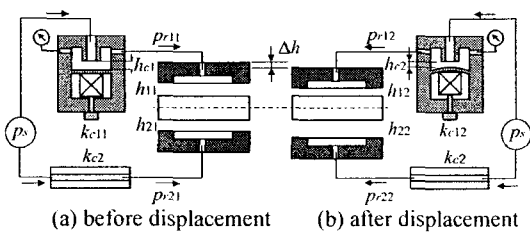


Fig. 2 Operating principle of the ACC

3 개는 수직 방향 오차보정을 위해 사용된다.

수평방향의 경우에는 한 쪽 양단의 포켓에 각각 1 개의 ACC 를 설치하였다. 유정압테이블 중심의 이송방향 좌표가 x 일 때의 직선운동오차를 $e_h(x)$, 각운동오차(요오차)를 $\theta_y(x)$ 라고 하면, 오차보정을 위해 양단에 설치된 ACC#1 및 ACC#2 에 입력할 전압 $E_i(x)$ 는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 a 는 이송방향으로 테이블의 중심에서 ACC 가 설치된 포켓의 중심까지의 거리를 나타내며, G_i ($V/\text{턴}$)는 각 ACC 의 게인값으로 실험을 통해 구하게 된다.

$$\begin{pmatrix} E_1(x) \\ E_2(x) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & a \\ 1 & -a \end{bmatrix} \begin{pmatrix} e_h(x) \\ \theta_y(x) \end{pmatrix} \quad (6)$$

수직방향의 경우에는 직선운동오차 $e_v(x)$, 각운동오차(피치오차) $\theta_p(x)$ 와 함께 롤오차 $\theta_r(x)$ 도 보정할 필요가 있으므로 Fig. 3 과 같이 3 개의 ACC 를 설치하였다. 보정을 위해 각 ACC 에 가할 입력전압은 식(2)와 같이 구할 수 있으며, 여기서 b 는 테이블 중심에서 폭방향으로 포켓까지의 거리를 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} E_3(x) \\ E_4(x) \\ E_5(x) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} G_3 & 0 & 0 \\ 0 & G_4 & 0 \\ 0 & 0 & G_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & a & b \\ 1 & -a & b \\ 1 & 0 & -b \end{bmatrix} \begin{pmatrix} e_v(x) \\ \theta_p(x) \\ \theta_r(x) \end{pmatrix} \quad (2)$$

실험에 있어 오차의 보정은 개회로 형태로 이루어지므로 히스테리시스 및 ACC 게인의 설정오차 등에 기인하는 보정오차가 존재하게 된다. 따라서, 반복제어법을 적용하였으며 반복제어의 효과적인 수렴을 위해 보정계수들을 설정하고 예비실험을 통해 최적의 보정계수를 결정하였다.

3.2 능동제어모세관의 게인설정

Fig. 4 는 게인값을 조정하기 위해, 유정압테이블을 레일 중앙($x=125 \text{ mm}$)에 위치시킨 상태에서 5 개

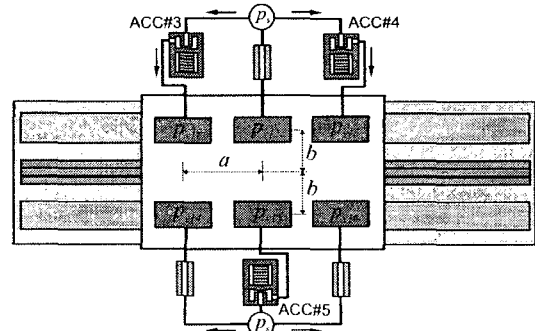


Fig. 3 Arrangement of ACCs in the vertical direction

의 ACC 에 대해 스텝응답특성을 실험한 예를 나타낸 것이다. ACC 마다 미소한 차이를 나타내고 있다. 보다 효과적인 계인의 설정을 위해 테이블의 위치가 레일 양쪽 끝 단일 경우에 대해서도 응답특성을 얻은 후 그 평균값으로부터 $G1=2.874$ V/탈, $G2=02.336$ V/탈, $G3=2.833$ V/탈, $G4=2.882$ V/탈, $G5=6.410$ V/탈 로 계인을 설정하였다.

3.3 유정압테이블의 5 자유도 운동오차 측정

본 연구에서는 여러 가지 측정센서 및 측정알고리즘을 혼합하여 사용하는 혼합측정법을 적용함으로써 측정정밀도를 최대한 향상시키고자 하였다.

혼합측정법에 있어 요오차 θ_y 및 피치오차 θ_p 는 레이저간섭계(ML10, Renishaw)를 이용하여 측정하고 롤오차 θ_r 은 반전법을 이용하며, 수평 및 수직방향 직선운동오차 e_h, e_v 는 축차 2 점법(이하, STPM)을 이용하여 측정하였다.

축차 2 점법² 및 반전법에서는 정전용량형센서(Micro sense 3401, ADE)와 제로돌위에 알루미늄이 코팅된 참조면(straight edge, Nikon, 평탄도 0.05 탈 / 340 mm)을 이용하였다. 항온실의 온도변화($20 \pm 0.6^\circ\text{C}$) 및 공급유탄유의 온도변화($\pm 0.15^\circ\text{C}$)의 영향을 가능한한 억제하기위해 센서의 치구는 세라믹재질을 이용하여 제작하였으며, 항온실의 온도변화 주기(12 분)마다 1 회의 측정을 수행하는 것에 의해 온도변화의 영향을 최소화하고자 하였다. 모든 운동오차는 250 mm 이송 구간에 대해 5 회 반복 측정하여 평균값으로 나타내었으며, 표준편차를 이용하여 반복오차($\pm 2\sigma$)도 같이 표시하였다.

Fig. 5 에 이상의 측정방법을 사용하여 유정압테이블의 초기(보정전)상태에서의 5 자유도 운동오차를 측정한 결과를 나타내었다. 직선운동오차의 경우 최대 $\pm 0.02 \mu\text{m}$, 각운동오차의 경우 최대 $\pm 0.05 \text{ arcsec}$ 의 반복오차를 보이고 있다.

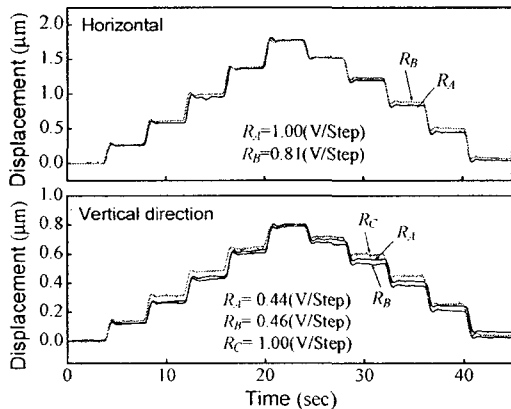


Fig. 4 Step response of each ACC

4. 유정압테이블의 5 자유도 운동오차 보정

4.1 수평방향 운동오차의 보정

Fig. 6 은 직선보정계수 K_h 를 0.8 에서 1.0 까지 변화시켜가며 Fig. 6(a)의 직선운동오차 $e_h(x)$ 만을 보정한 결과를 나타낸 것으로, 보정계수에 관계없이 $\pm 0.01 \sim \pm 0.02 \mu\text{m}$ 의 반복오차를 보이고 있으며 그이상 운동정밀도를 향상시킬 수 없음을 알 수 있다. 한편, 보정계수에 따른 운동정밀도의 보정특성은 크게 차이가 없으나 $K_h = 1$ 의 경우, 즉, 측정된 직선운동오차를 그대로 보정량으로 환산한 경우가 가장 적은 반복회수에서 안정된 운동정밀도를 보이고 있어 이하의 보정에 있어 $K_h = 1$ 로 설정하였다.

각운동오차에 대해서도 같은 과정의 실험을 통해 $K_y = 0.8$ 로 설정하였다.

4.2 5 자유도 운동오차의 동시보정

5 자유도 운동오차를 동시에 보정한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 3 회의 보정으로 5 자유도 운동정

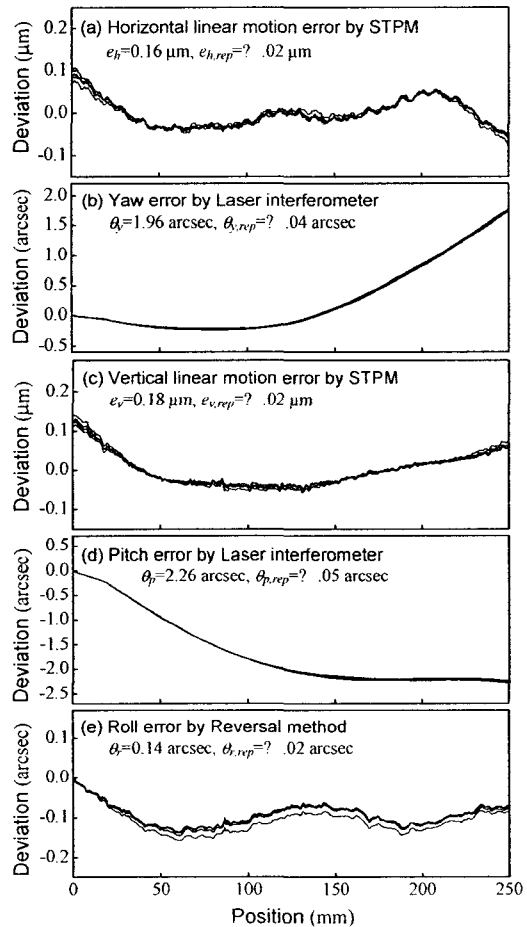


Fig. 5 Measured initial motion errors of tested hydrostatic table

밀도 모두에 있어 반복오차 이내의 값을 얻을 수 있었다.

수평방향의 보정결과를 Fig. 5(a) 및 Fig. 5(b)의 보정전 운동오차와 비교하면, 3 회의 보정에 의해 직선운동오차의 경우 0.16 μm 에서 0.02 μm 로, 각 운동오차의 경우 1.96 arcsec 에서 0.03 arcsec 로 각각 향상됨을 보이고 있으며, 측정에서의 반복정밀도의 한계($\pm 0.02 \mu\text{m}$ 및 $\pm 0.05 \text{ arcsec}$)에 의해 더 이상 보정회수를 증가시켜도 운동정밀도는 향상되지 않는다.

수직방향에 있어서도 직선운동오차의 경우 0.18 μm 에서 0.03 μm 로, 각운동오차의 경우 2.26 arcsec 에서 0.07 arcsec 로 롤오차의 경우 0.14 arcsec 에서 0.02 arcsec 까지 크게 향상됨을 보이고 있다. 또한 수평방향에서와 마찬가지로, 보정된 운동오차는 측정에서의 반복정밀도($\pm 0.02 \mu\text{m}$ 및 $\pm 0.05 \text{ arcsec}$)이 내의 값이므로 측정정밀도를 향상시킬 경우 운동정밀도는 더욱 향상될 가능성이 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는, 수평방향 직선운동오차 및 요오차에 대해서는 2 개의 능동제어모세관을, 수직방향 직선운동오차, 피치오차 및 롤오차에 대해서는 3 개의 능동제어모세관을 이용하여 5 자유도 운동오차를 보정할 수 있는 메커니즘을 제안하였다. 또한, 리니어모터로 구동되는 유정압테이블에 대한 동시 보정실험을 통해 수평방향의 경우, 직선운동오차는 0.16 μm 에서 0.02 μm 로 요오차는 1.96 arcsec 에서

0.03 arcsec 로 각각 향상되는 결과를 얻었으며, 수직 방향의 경우, 직선운동오차는 0.18 μm 에서 0.03 μm 로, 피치오차는 2.26 arcsec 에서 0.07 arcsec 로, 롤오차는 0.14 arcsec 에서 0.02 arcsec 로 향상되는 결과를 얻었다. 이상의 결과로부터 5 개의 능동제어모세관을 이용한 운동오차 보정방법은 유정압테이블의 5 자유도 운동오차 향상에 매우 유효하게 적용될 수 있음을 확인하였다

참고문헌

1. Park, C. H., Song, Y. C., Kim, S. T., and Lee, H., Improvement of Motion Accuracy Using Active Controlled Capillary in Hydrostatic Table, J. of KSPE Vol. 14, No. 12, pp. 114-120, 1997.
2. Kiyono, S., Profile Measurement Using Software Datums, J. of JSPE, Vol. 61, No. 8, pp. 1059-1063, 1995.

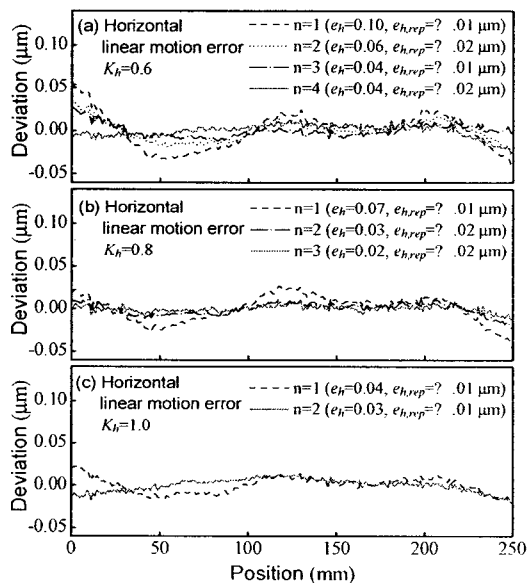


Fig. 6 Compensated linear motion error according to the variation of linear compensation coefficient

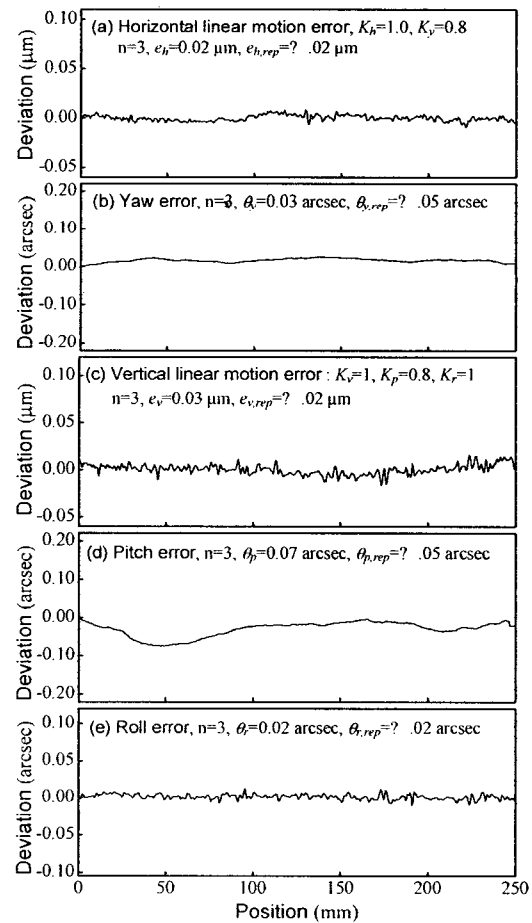


Fig. 7 Simultaneously compensated 5 DOF motion errors