

능동제어모세관을 이용한 유정압테이블의 운동정도 향상

박 천 홍*, 송 영 찬*, 김 수 태**, 이 후 상*

Improvement of Motion Accuracy Using Active Controlled Capillary in Hydrostatic Table

Chun-Hong Park*, Yong-Chan Song*, Soo-Tae Kim**, Hu-Sang Lee*

ABSTRACT

For compensating the error motion of hydrostatic tables, we have introduced a way that the clearance of table is controlled corresponding to the amount of error with the actively controlled variable capillary, named as ACC. In previous paper, through the basic test, it was confirmed that by the use of ACC, the error motion within 2.7 μ m of a hydrostatic table could be compensated with the resolution of 27nm, 1/100 controllable range, and with the frequency bandwidth of 5.5Hz, structurally. In this paper, we performed practical compensation of the linear and angular motion error of hydrostatic table using ACC. For improving the compensated motion accuracy, iterative control method is put into the control system. The experimental results show that by the simultaneous compensation of error, the linear and angular motion error are improved upto 0.25 μ m and 0.4arcsec, which are about 1/10 and 1/3 of the non-compensated motion errors respectively.

Key Words : active controlled capillary(능동제어모세관), hydrostatic table(유정압테이블), linear motion error(직선운동오차), angular motion error(각운동오차), motion error compensation(운동오차보정)

1. 서 론

공작기계용 이송테이블은 공구와 공작물사이의 상대위치를 설정해주고 그 운동특성을 공작물에 전사시키는 중요한 역할을 한다. 특히 이송테이블의 운동정도는 공작물의 형상정도와 표면조도를 결정하므로 정밀가공을 위해

서는 그에 상응하는 이송테이블의 운동정도가 뒷받침되어야 한다.

유정압베어링은 유막의 평균화효과에 의해 안내레일로부터 전달되는 저주파의 오차성분을 감소시키고 고감쇠특성에 의해 고주파의 진동까지 차단해주므로 정밀공작기계용 이송테이블에 적합한 특성을 지니고 있다. 그러나

* 한국기계연구원 공작기계그룹
** 창원대학교 기계공학과

정밀 유정압테이블의 제작을 위해서는 최소한 2개의 안내 레일에 대해 각각의 직각도, 평면도, 직각도 및 두 레일의 상대적인 평행도, 직각도 등의 가공정도를 얻어야 하므로 구멍의 평균화효과를 기대하더라도 서브미크론의 운동정도를 내기는 쉽지 않다. 또한 이러한 레일의 가공오차에 기인하는 운동오차는 위치결정오차와 같이 비교적 간단히 보정되지 않는다.

저자 등은 운동오차를 보정하기 위한 한 가지 방법으로, 유정압테이블에 강성을 주기위해 설치되는 모세관 보상요소를 가변화하여 테이블의 각 위치에서의 운동오차량에 상응하는 상대변위를 보상요소의 저장변화를 이용하여 보정해줄 수 있는 능동제어모세관(ACC, Active Controlled Capillary)을 제안하고 그에 대한 이론적인 설계법 및 시험제작된 ACC의 구조적 특성 실험 결과를 제시한 바 있다¹⁾. 그 실험결과에 의하면, 보정하고자하는 운동오차량과 유정압테이블의 베어링간극을 변수로하여 설계, 제작된 ACC는 이론치와 잘 일치하는 성능을 보임이 확인되었다. ACC자체는 구조적으로 보정값을 입력하기 위해 사용된 D/A컨버터의 분해능인 2.5mV/step까지의 분해능이 가능하고 4kHz까지의 주파수대역폭을 가짐이 확인되었다. 한편 유정압테이블에 ACC를 실제로 적용할 경우 오차보정이 가능한 분해능은 최대오차보정범위의 약 1/100인 27nm, 주파수대역폭은 5.5Hz임이 확인되었다.

본 논문에서는 이와 같은 기초실험결과를 토대로, 2개의 ACC를 유정압테이블의 양단에 설치하여 각 ACC의 보정값을 조절함으로써 테이블의 직선운동오차 및 각운동오차를 동시에 향상시킬 수 있는 운동오차보정시스템(이하 오차보정시스템)을 구성하고 직선운동오차의 보정 및 각운동오차를 포함한 동시보정 등의 실험을 수행하였으며 이 때 보정데이터의 간격, 반복제어를 위한 보정계수와 보정회수 및 이송속도가 미치는 영향 등을 검토하였다. 오차보정시스템은 기존의 유정압테이블의 운동오차 보정에도 쉽게 적용이 가능하도록 개회로(open loop)로 구성하였으며, 개회로의 적용에 의한 보정시의 오차를 감소시키기 위해 전회의 측정된 오차량을 새로운 오차보정 입력값으로 사용하는 반복제어법을 도입하였다.

2. ACC의 구조 및 운동오차 보정방법

Fig. 1에 ACC의 구조를 나타내었다. 외형구조는 원통형으로 되어 있으며 상, 하측 구조부와 그 중간에 삽입되는 판스프링의 세 부분으로 구성되어 있다. 상측 구조 중

양부와 판스프링사이에는 수십 μ m의 간극이 있어 모세관 역할을 하도록 되어 있으며 이 간극은 하측 구조의 내부에 조립되어 있는 압전소자의 구동력변화에 의한 판스프링의 탄성변위에 의해 조절된다. 즉 압전소자에 가해지는 인가전압의 조절에 의해 모세관간극이 능동적으로 제어될 수 있는 구조로 되어 있다. 또한 압전소자에 대한 초기 예압은 하부에 설치된 스크류에 의해 설정된다.

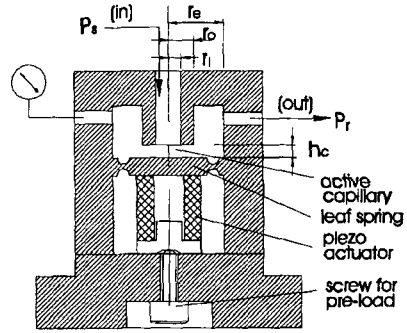


Fig. 1 Structure of ACC

Fig. 2는 ACC를 이용한 테이블의 오차보정 방법을 나타낸 것으로, ACC를 한 쪽 패드의 양단에 설치한 유정압테이블의 임의의 점 x 에서의 직선운동오차를 $\delta_0(x)$, 각운동오차를 $\theta(x)$ 라고 하면 양단에 설치된 ACC를 통해 보정해야할 오차량 $\delta_1(x)$, $\delta_2(x)$ 는 식(1)과 같이 되며 여기에서 b 는 테이블의 중심에서 ACC가 설치된 포켓의 중심까지의 거리를 나타낸다.

$$\begin{pmatrix} \delta_1(x) \\ \delta_2(x) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -b & 1 \\ b & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sin\theta(x) \\ \delta_0(x) \end{pmatrix} \quad (1)$$

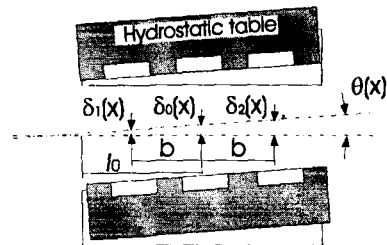


Fig. 2 Calculation method of compensation value

한편 보정에 사용되는 두 개의 ACC는 가공오차 및 예압에 차에 의해 서로 다른 게인(gain)값을 갖게 되며

실험을 통해 구해진 각 ACC의 계인을 $G_i(V/\mu m)$ 라고 하면 실제 보정시에 각 ACC에 가해지는 인가전압 $E_i(x)$ 는 식(2)와 같이 된다.

$$E_i(x) = G_i \times \delta_i(x), \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치의 구조

실험용 유정압테이블의 구조 및 실험장치의 개략도를 Fig. 3에 나타내었다. 테이블은 양면패드방식이고 수직(상하)방향으로는 1열당 3쌍의 대향된 포켓이 2열로 배치되어 있으며 수평(좌우)방향으로는 1열로 배치되어 있다. 본 실험에서는 이 가운데 수평방향의 패드를 대상으로 하여 한 쪽 패드의 양단 포켓에 ACC를 설치하였으며 상대측 패드에는 일반적인 고정형 모세관을 설치하였다. 유정압테이블의 수평방향 간극은 $49\mu m$ 로 제작되어 있으며 수평방향 정강성은 공급압력 $10^6 N/m^2$ 에서 $50 N/\mu m$ 로 측정되었다. 또한 유정압테이블에 공급되는 윤활유의 급유온도는 오일컨디셔너(oil conditioner, 실 운동조형)에 의해 $\pm 0.5^\circ C$ 이내로 제어되고 있다.

테이블은 볼스크류(C0급, 리드 5mm)와 AC서보모터(1.5kW) 및 PC구동형 컨트롤러(MEI)에 의해 구동되며, 볼스크류의 가공오차, 조립오차에 의해 발생하는 구동오차 및 외란이 테이블에 주는 영향을 감소시키기 위해 유정압베어링과 탄성힌지를 이용한 복합형 체결기구⁽²⁾가 볼스크류너트와 테이블 사이에 삽입되어 있다.

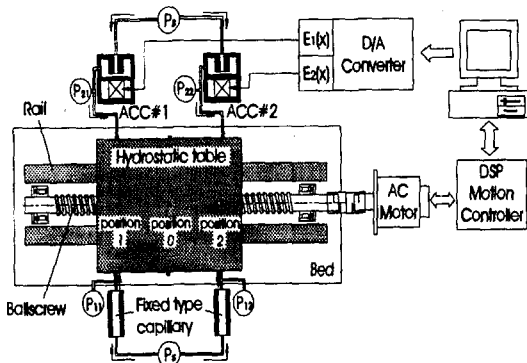


Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

3.2 ACC의 계인조정

2개의 ACC를 이용하여 테이블에 직선변위 및 각변위를 주기 위해서는 각 ACC의 계인값(D/A컨버터 입력전압/테이블 변위)을 실험적으로 미리 구할 필요가 있다. 본 실험에서는 먼저 인가전압을 가하지 않은 상태에서의 ACC의 모세관계수가 고정형 모세관의 모세관계수와 같아지도록 예비실험을 통해 ACC의 초기 예압을 설정한 후, 2개의 ACC에 동시에 입력전압을 단계적으로 가했을 때의 테이블의 수평방향 변위를, 테이블 중앙부 및 양단 포켓중앙부 등 3곳(Fig. 3의 position 0, 1, 2)에 용량형 센서(Microsense 3401, $0.25\mu m/V$)를 설치하여 측정하였으며 측정된 변위량으로부터 각각의 ACC의 계인을 구하였다. 한편 용량형 센서에 의한 변위 측정시에는 레이저간섭계에 의해 측정되는 테이블의 운동정도와 측정점을 일치시키기 위해 테이블 뒷면 중앙에 길이방향으로 스트레이트지(straight edge)를 설치하고 그 수평면을 용량형 센서의 피측정면으로 사용하였다.

3.3 운동오차의 보정

먼저 ACC를 작동시키지 않은 상태에서 레이저간섭계(HP5528A)에 의해 측정된 직선운동오차 $\delta_0(x)$ 및 각운동오차 $\theta(x)$ 를 GPIB보드(샘플링주파수 4.5Hz)를 통해 PC로 읽어들이고 후 식(2) 및 식(3)을 이용하여 각 ACC에서의 보정을 위한 인가전압 $E_i(x)$ 를 구한다. DSP 보드로부터 PC에 전달되는 위치정보에 따라 각 보정위치 x 에 따른 인가전압은 D/A컨버터(12bit)를 통해 ACC에 가해지게 된다.

본 실험에서 사용된 오차보정시스템은 개회로형태이므로 ACC에 사용된 압전소자의 히스테리시스, 테이블 및 레일의 가공오차 등에 주로 기인하는 보정오차가 존재하게 되며 이에 따라 1회의 보정으로 충분한 오차보정을 기대하기는 어렵다. 이러한 보정오차요인을 제거하기 위해 보정시스템내에, 유정압테이블의 운동정도와 같이 반복성이 있는 오차의 보정에 유리하다고 알려진⁽³⁾ 반복제어 블럭을 삽입하였으며 반복제어의 효과적인 수렴을 위해 각 ACC에 인가되는 입력전압에는 식(3)과 같이 직선보정계수 K_δ 및 각보정계수 K_θ 를 첨가하였다.

$$\begin{pmatrix} E_1(x) \\ E_2(x) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -b & 1 \\ b & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} G_1 K_\theta \sin \theta(x) \\ G_2 K_\delta \delta_0(x) \end{pmatrix} \quad (3)$$

Fig. 4는 위에서 설명된 오차보정시스템의 블록선도를 나타낸 것이다.

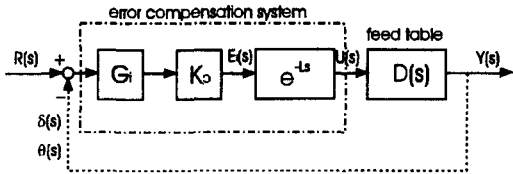


Fig. 4 Block diagram of iterative control system

4. 실험결과 및 고찰

4.1 ACC의 개인조정

본 실험에 사용된 2개의 ACC는 동일한 설계조건에 의해 제작되었고, 같은 모세관계수를 갖도록 초기예압이 설정되어 있으나, 가공오차나 사용된 압전소자의 특성차이에 의해 동일한 개인값을 기대하기는 어렵다. 이러한 개인값의 차이는 각운동오차를 고려하여 제어하는 경우 궁극적으로는 압전소자의 히스테리시스특성과 더불어 반복 제어루틴에 의해 제거될 수 있으나 실제로는 수렴할 수 있는 반복회수가 증가하고, 실험에 사용된 유정압테이블에서와 같이 ACC의 보정범위가 실제 오차에 비해 충분히 크지 못한 경우에는, 제어과정에서 요구되는 입력전압이 정격전압에 비해 커져 제어시스템의 효율이 나빠지거나 불안정해지는 경우가 발생할 수 있다.

Fig. 5는 실험에 사용된 2개의 ACC에 대해 3.2절의 실험방법을 이용하여 개인값을 측정하고 조정한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 먼저 각 ACC에 동일하게 1V/step의 입력전압(D/A컨버터 기준)을 가했을 때의 테이블의 변위를 측정하여 얻은 것으로, 1번 위치의 ACC 즉 Fig. 4의 좌측방향에 설치된 ACC#1이 우측방향에 설치된 ACC#2에 비해 같은 입력전압에 대해 다소 작은 변위를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 ACC#2의 입력전압을 $E_2=0.94V/step$ 으로 감소시켰을 때의 응답변위를 측정하여 얻은 것으로, 두 ACC의 변위는 측정점 세 곳에서 거의 동일해짐을 보이고 있으며 이로부터 각 ACC의 개인값을 $G_1 = 2.083V/\mu m$, $G_2 = 1.958V/\mu m$ 로 결정하여 사용하였다.

4.2 직선운동오차의 보정

반복제어법을 적용하기 위해서는 테이블 운동정도 및

측정값의 재현성, 오차보정을 위한 보정데이터의 보정간격(이하 보정간격) Δx , 반복제어의 효율적인 수렴을 위한 보정계수 K_δ 와 K_θ , 보정회수 N 및 테이블의 이송속도 v 등의 영향을 파악할 필요가 있으며 실험에서는 먼저 직선운동정도를 대상으로하여 그 영향을 파악하였다.

1) 운동정도의 재현성

Fig. 6은 유정압테이블의 수평방향 직선운동오차 및 각운동오차를 각각 5회 반복측정하여 나타낸 것이다. 직선운동궤적에서 5mm의 주기로 일정하게 나타나는 파형은 볼스크류의 리드(5mm)와 동기하는 것(이하 리드동기오차)으로, 볼스크류의 회전에 의해 가공 및 조립오차가 테이블의 운동정도에 영향을 주게 되며, 테이블의 강성과 볼스크류의 굽힘강성의 비에 따라 그 크기가 달라지게 된

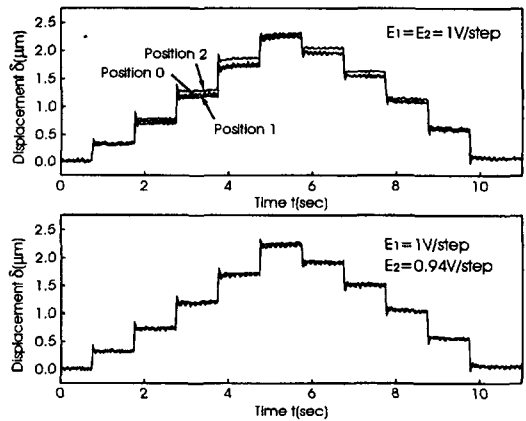


Fig. 5 Relationship between input voltage and displacement in each ACC

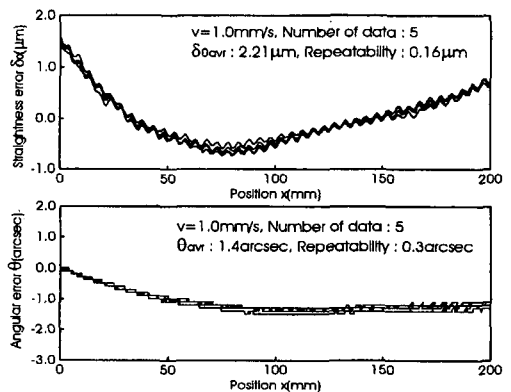


Fig. 6 Repeatability of motion accuracy

다. 한편 윤활유의 미소온도변화, 구동계의 영향 및 측정 환경에 의한 오차(각종 노이즈, 공기의 유동 및 대기온의 변화 등) 등의 영향으로 추정되는 반복정밀도(최대 밴드 폭)는 직선운동의 경우 $0.16\mu\text{m}$, 각운동의 경우 0.3arc-sec 를 나타내었으며 운동오차의 평균값은 200mm 의 스트로크에 대해 각각 $2.21\mu\text{m}$, 1.4arcsec 를 나타내었다. 이후 실험에 있어서는 오차보정을 위한 입력데이터에 미치는 이러한 오차들의 영향을 가능한한 배제하기 위해, 5회 반복 측정값의 각 측정위치에서의 평균값을 산출하여 보정값으로 사용하였다.

2) 보정간격 Δx 의 영향

Fig. 7은 보정데이터의 간격에 따른 영향을 알아보기 위해 보정간격을 변화시켜가며 각각 1회 보정($N=1$)을 실시했을 때의 직선운동오차의 측정결과를 나타낸 것으로, 보정하지 않았을 때의 운동오차인 Fig. 6과 비교하면 레일의 가공정도를 추종하는 저주기성분의 운동오차는 보정간격에 따라 큰 차이를 보이지 않고 거의 같은 정도로 보정되고 있음을 보이고 있다. 한편 볼스크류의 영향을 받는 리드동기오차에 의한 운동오차는, 볼스크류 리드의 $1/10$ 인 $\Delta x = 0.5\text{mm}$ 까지는, 보정간격이 작아짐에 따라 5mm주기에 대한 보정점의 수가 증가하여 다소 오차가 감소하는 경향을 보였으나 0.5mm 보다 작은 값에서

는 더 이상 오차가 감소하지 않았다. 따라서 볼스크류를 이용하여 직선운동을 하는 유정압테이블에 오차보정시스템을 적용할 경우 보정데이터의 간격은 볼스크류 리드의 $1/10$ 정도가 효과적임을 알 수 있다.

Fig. 8은 리드동기오차의 보정한계를 미세히 관찰하기 위해 임의의 10mm 구간에 대해서 보정간격 및 이송속도를 감소시켜 보정한 결과로, 3회까지 보정에 대해 오차는 $1/3$ 정도 감소하나 그 이상 오차는 감소하지 않았다. 이것은 실험에 사용한 유정압테이블의 포켓압력비(포켓압력/공급압력)가 0.6 으로 설정되어 있고 오차가 보정됨에 따라 포켓압력비가 테이블의 최대강성을 나타내는 포켓압력비 0.5 에 가까워지면서 테이블의 강성이 증가하기 때문이며 이 결과로 부터 리드동기오차는 테이블의 강성에 따라 다소 증감할 수는 있으나 본 실험에 사용된 개회로 방식의 제어를 통해서 완전히 보정될 수는 없음을 확인하였다.

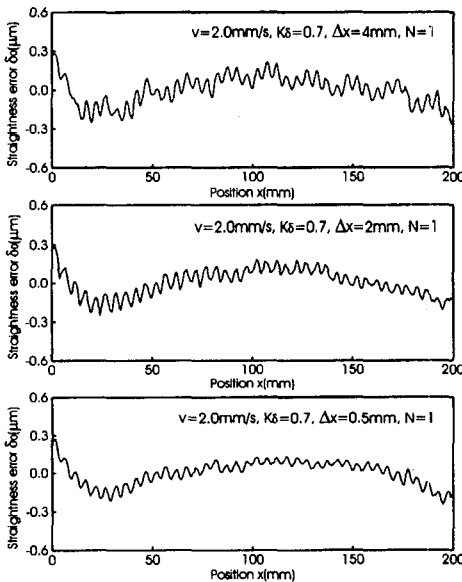


Fig. 7 Relationship between compensation interval and motion accuracy

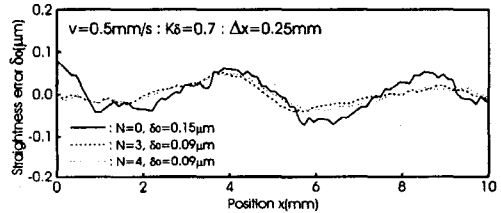


Fig. 8 Compensation of motion error induced by ballscrew

3) 직선보정계수 K_s 의 영향

Fig. 9는 직선보정계수의 영향을 알아보기 위해 $K_p = 0$ 으로 하고 직선보정계수 K_s 를 각각 $1.0, 0.7, 0.5$ 로 설정했을 때의 보정회수 N 에 따른 운동정도의 변화값을 측정된 것으로, 리드동기오차를 포함하여 비교할 경우 고차 보정시에는 상대적으로 리드동기오차의 값이 전체 오차값을 주도하게 되어 비교가 어려워지므로 약 7mm 이내의 주기는 필터링하여 표시하였다.

그림으로부터 K_s 를 1.0 , 즉 측정된 오차값을 그대로 보정값으로 적용할 경우, 6회 반복보정시 최소값 $0.24\mu\text{m}$ 를 나타내었으며 7회째부터는 오히려 오차값이 경향을 증가함을 보였다. 이것은 오차보정시스템에 사용된 ACC의 응답특성에 의해 발생하는 보정명령위치와 실제 보정되는 위치간의 위상차, 유정압테이블의 간극과 강성간의 비선형성 및 안전소자의 비선형성 등에 의해 임의의 위치 x 에 대한 실제 오차값과 오차보정값이 달라지기

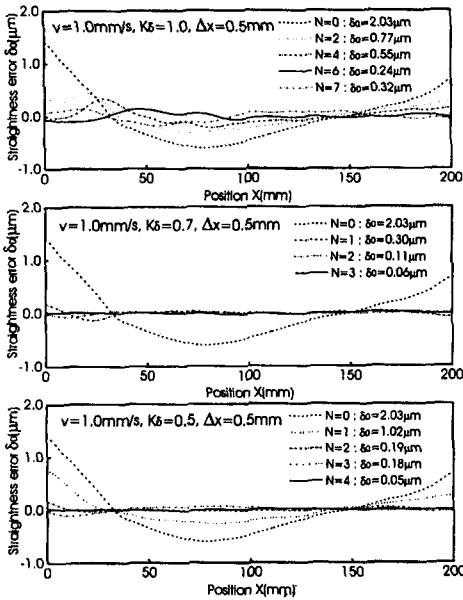


Fig. 9 Relationship between compensation coefficient and motion accuracy

따라서, 이에 따라 운동오차의 구배가 급격한 운동 시작부분이 상대적으로 보정오차가 커짐을 그림으로부터 확인할 수 있다. 또한 K_δ 를 0.5 또는 0.7로 하여 1회 보정량을 감소시켜 보정하는 경우 오히려 운동정도는 빨리 안정되는 경향을 보이고 있다. $K_\delta = 0.7$ 에서 안정을 위한 보정회수는 3회로 가장 빨라지며 K_δ 를 더 낮출 경우 보정된 운동오차의 최소값은 큰 차이가 없으나 보정회수는 점차 증가하는 경향을 보였다. 따라서 이후의 직선 운동 보정실험에서 보정계수는 $K_\delta = 0.7$ 을 사용하였다.

4) 테이블 이송속도의 영향

Fig. 10은 이상의 결과를 토대로 $K_\delta = 0.7$, $x=0.5\text{mm}$ 로 설정하고 $v=1\text{mm/s}$ 에서 직선운동오차가 최소값이 될 때까지 오차보정을 시행한 후, 이송속도를 2mm/s 및 4mm/s로 증가시켰을 때의 직선운동오차의 측정결과를 나타낸 것이다. 그림으로부터 이송속도가 증가해도 운동 오차는 거의 변하지 않고 있어 오차보정시스템은 4mm/s까지는 이송속도의 영향없이 안정적으로 동작되고 있음을 확인할 수 있다. 한편 그림에서 이송속도가 증가함에 따라 리드동기오차의 크기가 다소 감소하는 경향을 나타내는 것은 레이저간섭계의 신호처리에 사용된 GPIB보드의 샘플링주파수가 4.5Hz로 매우 낮아 리드동기오차의 파형을 정확히 추종하지 못함에 따른 영향이며, 이에 따

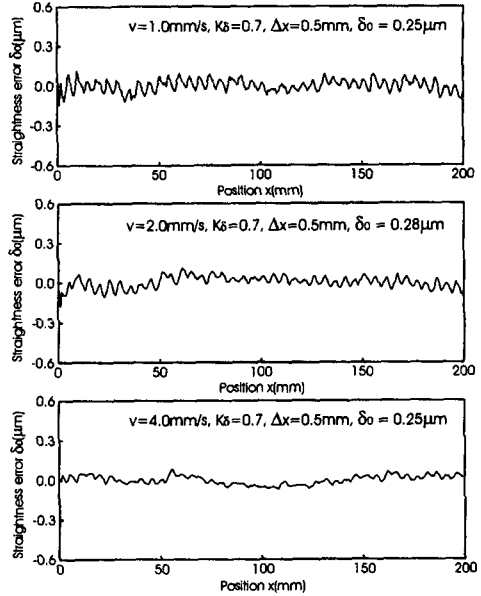


Fig. 10 Influence of feed rate on the motion accuracy

라 4mm/s이상의 이송속도에 의한 영향에 대해서는 실험을 수행하지 못했다.

또한 이론적으로, 최종 보정된 오차는 가장 큰 진폭을 갖는 리드동기오차($v=1.0\text{mm/s}$ 에서 $0.17\mu\text{m}$)와 같아야 하나 실제로는 유정압테이블의 가공오차에 의한 간극의 변화, ACC에 사용된 2개의 압전소자간의 변위특성차 등의 영향 및 직선운동오차와 각운동오차간의 간섭현상에 의한 영향으로 $0.25\mu\text{m}$ 이하로는 개선할 수 없었다.

4.3 각운동오차의 동시보정

Fig. 11은 직선운동오차와 각운동오차를 동시에 보정하기 위해 보정계수 K_δ 및 K_θ 를 0.7로 설정하였을 때의 결과로, 보정회수 $N=2$ 에서 오차가 발산하는 경향을 보였다. 이것은 각운동오차의 오차성분을 함께 보정함에 따라, 보정초기의 실제 오차값과 오차보정값의 차이가 직선운동만을 보정할 때에 비해 커지기 때문이며 이에 따라 K_δ 및 K_θ 를 단계적으로 감소시켜가면서 안정적으로 오차값이 수렴하는 K_δ 및 K_θ 를 구했다. Fig. 12는 $K_\delta = 0.5$, $K_\theta = 0.35$ 로 설정했을 때의 보정결과로, 4회 보정으로 직선운동오차는 $0.25\mu\text{m}$, 각운동오차는 0.4arcsec 까지의 보정이 가능하였다. 한편 여기에서 각운동오차를 보다 개선하기 위해 한 번 더 보정하는 경우

그림에서와 같이 각운동오차는 0.2arcsec로 향상되나 직선운동과 각운동사이의 간섭에 의해 직선운동오차는 0.35 μ m로 오히려 나빠지는 경향을 보였다.

이상의 결과로부터 본 실험에 사용된 유정압테이블을

대상으로 오차보정시스템을 적용하여 직선운동오차와 각운동오차를 동시에 보정할 경우, 직선운동오차는 보정하지 않은 상태의 오차 2.21 μ m의 약 1/10인 0.25 μ m로, 각운동오차는 보정하지 않은 상태의 오차 1.4arcsec의 약 1/3인 0.4 arcsec로 개선될 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

2개의 ACC 및 반복제어회로로 구성된 오차보정시스템을 적용한 유정압테이블의 운동오차 보정실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 오차보정시스템을 적용하여 직선운동오차와 각운동오차를 동시에 보정한 결과, 직선운동오차는 보정하지 않은 상태의 약 1/10인 0.25 μ m로, 각운동오차는 보정하지 않은 상태의 약 1/3인 0.4arcsec로 개선되어 유정압테이블의 오차보정에 매우 효과적임을 확인하였다.
2. 오차보정시스템은, 본 논문에서 실험된 4mm/s까지의 이송속도에 대해, 이송속도변화에 따른 영향이 거의 없음을 알 수 있었다.
3. 오차보정시스템의 보정데이터의 간격은 볼스크류 리드의 1/10정도가 효과적임을 알 수 있었다.
4. 볼스크류에 의한 리드동기오차는 보정시 테이블의 강성에 따라 다소 증감할 수는 있으나, 본 실험에 사용된 개회로방식의 재어를 통해서 완전히 보정될 수 없음을 확인하였다.

참고 문헌

1. 송영찬, 박천홍, 이후상, 김수태, "유정압안내면 운동오차 보정용 능동제어모세관의 기본 특성", 한국정밀공학회지 제14권 제8호, pp130-136, 1997.
2. 박천홍, 김인찬, 정운교, 이후상, "고정밀 이송을 위한 볼스크류용 체결기구에 관한 연구", 한국정밀공학 지 제14권 제5호, pp157-163, 1997.
3. 樋口俊郎, 山口知實, "逆傳達關數補償法を組合わせた 繰返し制御を適用したバイトの位置決め制御", システムと制御 30-8, pp503-507, 1986.
4. 송영찬, 박천홍, 김수태, "능동제어모세관을 이용한 유정압테이블의 운동정도 향상", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp250-255, 1997.

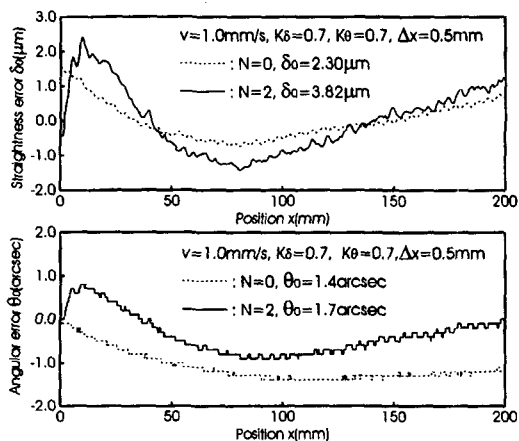
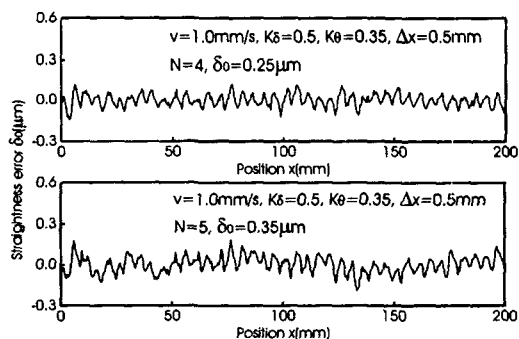
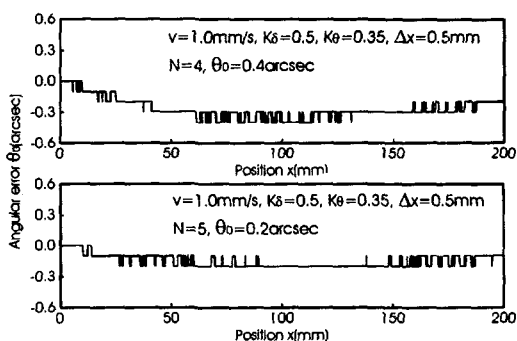


Fig. 11 Aspect of error compensation at $K_{\delta} = K_{\theta} = 0.7$



(a) Straightness error



(b) angular error

Fig. 12 Compensated motion accuracy at $K_{\delta} = 0.5$ and $K_{\theta} = 0.35$