

유정압안내면 운동오차보정용 능동제어모세관의 기본특성

송영찬*, 박천홍**, 이 후삼**, 김수태***

Basic Characteristics of an Active Controlled Capillary for Compensating the Error Motion of Hydrostatic Guideways

Y. C. SONG*, C. H. PARK**, H. S. LEE**, S. T. KIM***

ABSTRACT

For compensating the error motion of hydrostatic guideways, we introduce a way that the clearance of table is actively controlled corresponding to the amount of error with the variable capillary. The structure and the theoretical design method of active controlled capillary using piezo actuator, named ACC, are proposed in this paper. Basic characteristics such as the maximum controllable range, micro step response and available dynamic bandwidth are tested for confirmation of structural suitability of ACC, and these characteristics are also tested on the table mounted with ACC for verifying the availability. The experimental results showed that by the use of ACC, the error motion within $2.7\mu\text{m}$ of a hydrostatic guideway can be compensated with the resolution of 27nm , $1/100$ controllable range, and the frequency bandwidth of 5.5Hz . From these results, it is confirmed that the ACC is very effective to improve the motion accuracy of high or ultra precision hydrostatic guideways.

Key Words: Active Controlled Capillary(능동제어모세관), piezo actuator(압전소자), error motion(운동오차), compensation(보정), hydrostatic guideways(유정압안내면)

1. 서 론

이송계에 요구되는 정밀도에는 PTP(Point To Point) 방식에 의해 제어되는 운동특성을 나타내는 위치결정정도와 연속경로(continuous path)의 운동특성을 나타내는 진직운동정도 및 각운동정도(이하 운동정도)가 있다.

위치결정정도는 구동용 모터나 액츄에이터 등 제어요소의 정밀도에 의해 대부분의 정밀도가 결정되고, 오차의

보정에 있어서도 오차방향과 이송계의 운동방향이 일치하므로 센서에 의한 오차의 피드백회로를 삽입할 경우 액츄에이터 위치의 가감에 의해 비교적 용이하게 제어할 수 있으며, 실제로 유정압스크류나 마찰구동기구를 이용하여 피드백제어회로를 구성하였을 경우 1nm 이하까지의 위치제어를 실현한 예가 보고되고 있다.^{(1),(2)}

운동정도의 경우에는 이송테이블과 레일로 이루어진 안내요소간의 상대운동오차가 대부분의 정밀도를 결정하게

* 창원대학교 대학원
 ** 한국기계연구원 공작기계그룹
 *** 창원대학교 기계공학과

되어 기본적으로 안내요소의 가공정도가 운동정도를 좌우하게 되며 오차방향과 운동방향이 일치하지 않으므로 오차의 개선도 상대적으로 용이하지 않다. 운동정도의 개선 예로는 볼스크류에 의한 구동시에 볼스크류와 이송테이블간에 커플링을 설치함으로써 볼스크류의 런아웃오차가 테이블의 운동정도에 영향을 주는 것을 감소시킨 연구결과가 보고되고 있으나^{(3),(4)} 이 방법으로는 안내요소의 가공오차에 의한 영향은 전혀 감소시키지 못하는 단점이 있다. 이러한 오차까지 보정하기 위해서는 별도의 보정용 미카니즘을 부가할 필요가 있다.

한편 정압안내면은 베어링 내에 삽입되는 보상요소를 이용하여 공기막이나 유막의 강성을 조절하도록 되어 있으므로 이 보상요소를 능동제어 메카니즘으로 대체할 경우 비교적 용이하게 운동정도를 보정할 수 있다.

靑山 등은 자성보상형 공기정압안내면을 대상으로, 압전소자를 이용한 가변패드를 안내면에 삽입하여 베어링간극을 구성하고 이 가변패드를 제어하여 안내면의 운동궤적과 외부 기준면(reference straight)과의 오차량을 보정함으로써 10nm대의 진직도를 얻었으며⁽⁵⁾ 5차유도의 운동방향에 대해서도 같은 원리를 적용, 운동정도는 물론 강성까지 현저히 향상되는 결과를 보이고 있다.⁽⁶⁾ 이 방법에 의하면 외부 기준면의 진직도에 해당하는 정밀도를 얻을 수 있으며 외란력이 미소할 경우 무한강성에 가까운 성능도 얻을 수 있어 원리적으로 매우 효과적이라고 할 수 있다. 그러나 실용적인 측면을 고려할 경우 기본적으로 공기패드의 강성이 작으므로 강성 측면에서 항상 외부 기준면에 의한 인프로세스제어를 필요로 하며 상대적으로 큰 외란이나 순간적인 외란이 작용하면 운동정도가 악화되거나 제어계가 불안정해지는 단점이 있다.

유정압안내면을 이용할 경우 기본적인 강성이 커 이러한 외란에 대한 안정성을 향상시킬 수 있고 따라서 외부 기준면 없이 미리 측정된 운동오차값을 이용하여 새로운 보정량을 입력하는 제어방식으로도 용이하게 정밀도향상이 가능하며, 사용유체가 비압축성이므로 가변모세관을 외부에 설치할 수 있어 기존의 유정압안내면과 조립면에서 차이가 없어 실용적인 면에서도 장점을 지니고 있다.

본 논문에서는 자세오차 보정에 의한 유정압안내면의 초정밀화를 위한 첫 단계로, 압전소자의 변위를 이용하여 모세관간극을 가변제어할 수 있는 능동제어모세관(Active Contolled Capillary, 이하 ACC)을 제안하고 오차보정에 필요한 ACC의 기본적인 특성을 실험하였다. 실험에 있어서는 보정가능한 오차범위, 미소제어 분해능

및 주파수응답특성을 조사함으로써 ACC의 적용범위 및 한계를 제시하고자 하였으며, ACC의 이론적인 설계결과를 실험결과와 비교함으로써 설계법의 타당성도 확인하였다.

2. ACC의 원리

Fig. 1에 ACC의 구조를 나타내었다. 외형구조는 원통형으로 되어 있으며 상, 하측 구조부와 그 중간에 삽입되는 판스프링의 세 부분으로 구성되어 있다. 상측 구조 중앙부와 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. 2는 양면지지방식의 유정압안내면에 ACC를 적용했을 때의 진직도 보정원리를 나타낸 것이다. Fig. 2(a)와 같이 모세관간극 h_{c1} 과 이에 대응하는 베어링간극 h_{11} , h_{12} 에 의해 평형상태를 이루고 있는 테이블의 ACC에 전압 $E(t)$ 를 가하면 그에 상응하는 압전소자의 변위에 의해 모세관간극은 h_{c2} 가 되며, 모세관간극의 변화분 $\Delta h_c (=h_{c1}-h_{c2})$ 에 의해 테이블 포켓에 유입되는 유량이 증감하여 ACC측의 포켓압력을 변화시키므로, 양측 포켓의 압력이 식(1)의 평형조건이 되도록 테이블은 Fig. 2(b)에서와 같이 새로운 평형위치로 Δh 만큼 이동하게 된다.

$$P_{r1} = P_{r2} + W/A' \quad (1)$$

W : 자중 또는 외력, A' : 테이블의 유효면적

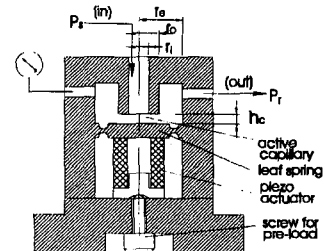


Fig. 1 Structure of ACC

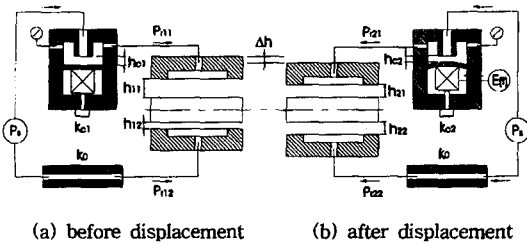


Fig. 2 Operating principle of ACC

3. ACC의 설계

ACC의 설계에 있어서 초점은 예상되는 유정압테이블의 포켓압력설정에 적합한 모세관계수를 얻을 수 있는 모세관간극 및 운동오차량의 보정이 가능한 변위량을 얻는 것이다. 따라서 Fig. 1의 구조에 있어, 먼저 평형상태에서의 ACC간극의 변위에 대한 베어링간극의 응답변위를 구하고, 그 때의 최대 응답변위량이 보정해야 할 운동오차보다 크도록 ACC의 제원을 결정할 필요가 있다.

모세관의 전 원판상에서 간극의 변화가 없다고 가정하면 식(1)의 평형상태에 있어서 유정압테이블의 각 포켓의 압력은 유량의 연속조건으로부터 식(2)와 같이 되며 이 때의 ACC의 모세관계수 k_{ci} 는 원판상내의 유체의 흐름에 대한 방정식으로부터 식(3)과 같이 된다.

$$P_{ni} = \frac{1}{1 + \frac{\overline{B}h_{i1}^3}{k_{ci}}} P_s \quad (2)$$

$$k_{ci} = \frac{\pi}{6 \ln(r_o/r_i)} h_{ci}^3 \quad (3)$$

여기서 \overline{B} 는 패드형상에 의존하는 무차원 유량계수이며, 고정모세관의 경우는 베어링간극의 변화에 관계없이 일정한 모세관계수 k_0 를 유지한다.

식(2)를 이용하여 식(1)의 평형조건을 무차원화하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{1 + \frac{\overline{B}h_{11}^3}{k_{ci}}} = \frac{1}{1 + \frac{\overline{B}h_{12}^3}{k_0}} + \sigma \quad (4)$$

$$\sigma = W/A'P_s$$

식(4)에 식(3)을 대입하고 ACC간극의 미소변위에 대

한 베어링간극의 응답변위를 구하여 무차원하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며, 이 식으로부터 베어링간극의 변위량, 즉 오차보정범위는 베어링간극에 대한 ACC간극을 적절히 선정함으로써 조절할 수 있음을 알 수 있다.

$$\frac{\Delta h}{\Delta h_c} = \alpha \left(\frac{h_0}{h_c} \right) \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{a}{a+b} : \text{감도계수,}$$

$$a = (1-\epsilon)^3 \{1 + \xi_0(1+\epsilon)\}^2$$

$$b = (1+\epsilon)^3 \{1 + \xi_0(1-\epsilon)\}^2$$

$$h_0 = (h_{11} + h_{12})/2 : \text{설계간극}$$

$$\xi_0 = \overline{B}h_0^3/k_{ci} = \overline{B}h_0^3/k_0 : \text{설계저항비}$$

$$\epsilon = 1 - h_{11}/h_0 = h_{12}/h_0 - 1 : \text{하중에 의한 편심을} \quad (6)$$

식(6)의 관계들을 식(4)에 대입하여 전개하고 미소 편심을 가정하여 ϵ^2 이상의 항을 무시하여 정리하면 식(7)과 같이 되며, 식(3)으로부터 식(8)의 관계를 얻을 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma(1 + \xi_0)^2}{6\xi_0} \quad (7)$$

$$r_o/r_i = \exp\left(\frac{\pi\xi_0 h_c^3}{6\overline{B}h_0^3}\right) \quad (8)$$

식(5)와 식(8)로부터 ξ_0 , h_0 , W 및 패드형상 등의 설계조건과 보정해야 할 운동오차량, 압전소자의 최대변위량이 정해지면 그에 상응하는 ACC의 간극 및 형상치수를 설계할 수 있다.

4. 특성실험

4.1 실험장치의 구성

Fig. 3은 실험용 유정압테이블 및 구동계의 구조를 나타낸 것으로 테이블은 반밀폐형 구조로 되어 있으며 길이방향으로 각각 3개씩의 양면지 패드가 설치되어 있다. 본 실험에서는 ACC의 적용에 따른 테이블의 특성만을 대상으로 하였으므로 정압커플링과 테이블사이의 체결부를 풀어 구동계에 영향이 미치지 않도록 하였다. 실험에서 오차보정의 대상은 수평방향의 운동오차(2.5 μ m)로 하였으며, ACC에 의한 유정압테이블의 특성실험시에는 3개 패드 중 중앙에 있는 1개의 패드에만 기름을 공급하고 실험하였다. Table 1에 유정압테이블의 제원을 정리하였다.

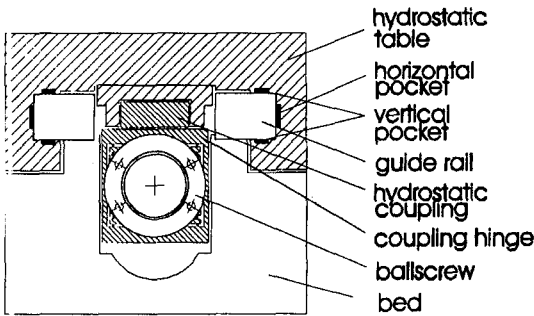


Fig. 3 Structure of hydrostatic table

Table 1 Specification of hydrostatic table

	수평패드	수직패드
폭 B×길이 L	3cm×6cm	1.5cm×6cm
유효면적 A'	9.15cm ²	5.27cm ²
유량계수 \bar{B}	1.6570	2.4374
베어링간극 h ₀	47μm	49μm
초기저항비 ζ_0	1	1
모세관계수 k ₀	1.72×10 ⁻⁴ mm ³	2.87×10 ⁻⁴ mm ³
하중(자중) W	0N	107N
윤활유 농점도 ν	10.3mm ² /s	

Fig. 4는 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. ACC용 압전소자(원통형, 15μm/500V:측정치)에 대한 제어신호는 정적 상태의 경우 D/A컨버터, 동적 상태의 경우 주파수발생기로부터의 신호를 증폭기(407V/5V)를 통해 입력하였으며, 이 때의 출력신호는 ACC특성 측정의 경우에는 ACC의 판스프링 윗면에, 유정압테이블 특성측정의 경우에는 테이블의 측면에 각각 용량형센서(Microsense 3401)를 설치하여 측정하였다.

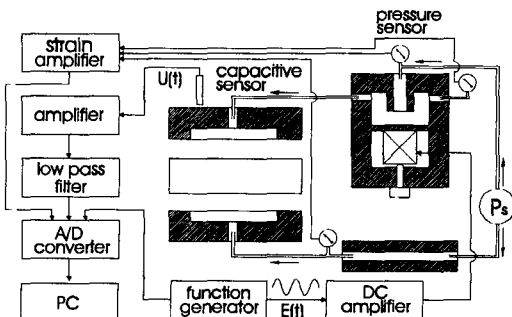


Fig. 4 Experimental setup

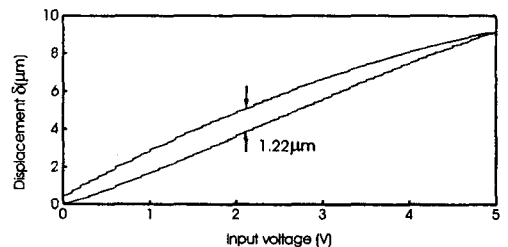
한편 노이즈특성에 대한 예비실험으로부터 센서설치를 위한 마그네틱스탠드의 약 95Hz 및 200Hz의 진동이 출력신호에 영향을 미치고 있음을 알았으며, 이의 제거를 위해 센서증폭기와 A/D컨버터사이에 로우패스필터(차단주파수 20Hz설정)를 설치하였다.

또한 테이블 응답변위의 측정시에는 압력센서를 공급라인 및 각 포켓에 설치하여 압력변화를 동시에 측정함으로써 양 신호를 비교, 검토하고자 하였다.

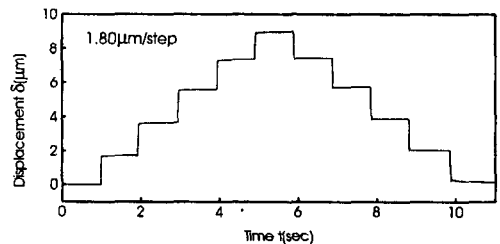
4.2 ACC의 응답변위 및 동특성

먼저 ACC의 구조적 특성을 파악하기 위하여 기름을 공급하지 않은 상태에서 ACC의 기본특성 실험을 수행하였다. ACC의 정적 변위특성은 압전소자에 가하는 인가전압을 D/A컨버터를 사용하여 단계적으로 변화시켰을 때 그에 따른 ACC 판스프링 윗면의 응답변위를 측정하였으며, 동특성 실험은 인가전압을 주파수발생기를 사용하여 공급하였을 때 그에 따른 ACC 판스프링의 응답을 주파수분석기로 분석하였다. Fig. 5 ~ Fig. 7에 그 결과를 나타내었다.

Fig. 5(a)는 증폭기의 게인을 최대로 하고 D/A컨버터의 입력을 0V에서 5V까지 변화시켰을 때의 모세관 내 판스프링의 응답변위를 측정한 결과로 최대변위는 9μm까지 가능함을 알 수 있으며, 따라서 D/A컨버터의 입력을 기



(a) Relationship between displacement and excitation voltage



(b) Response to step of 1.80μm

Fig. 5 Response characteristics of ACC

준으로 한 ACC의 응답계인은 $1.80\mu\text{m}/\text{V}$ 임을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 측정된 응답계인을 이용하여 $1.80\mu\text{m}/\text{step}$ 의 입력을 연속적으로 가했을 때의 응답변위를 측정된 결과로, 각 스텝은 매우 선명하게 구별되고 있어 미소분해능이 매우 높음을 예측할 수 있으나 스텝간의 간격은 압전소자의 이력현상(hysteresis)에 의해 다소 차이를 보이고 있으며, Fig. 5(a)로부터 이력현상에 의한 최대 변위 오차는 $1.22\mu\text{m}$ 임을 알 수 있다.

Fig. 6은 ACC에 미소변위를 주었을 때의 응답특성을 측정된 결과로 D/A컨버터의 최소분해능인 $2.5\text{mV}/\text{step}$ 까지 구별가능한 응답특성을 보이고 있다. 단 이 때의 스텝당 변위는 미리 측정된 응답계인을 기준으로 환산하면 $4.5\text{nm}/\text{step}$ 이나 실제로는 압전소자의 이력현상에 의해 $3.3\text{nm}/\text{step}$ 의 변위를 보이고 있어 정확한 운동오차의 보정을 위해서는 이력현상을 충분히 고려하여 제어할 필요가 있음을 알 수 있다. 일반적으로 유정압안내면은 운동정도의 재현성이 우수하므로 본 연구에서는 추후 운동오차의 보정시에 재현성있는 오차의 보정에 효과적인 반복제어법을 이용할 예정이며, 이에 의해 이력현상의 영향은 대부분 제거될 수 있을 것으로 예측된다.

Fig. 7은 ACC의 주파수 밴드폭을 측정된 결과로 4kHz 이상의 밴드폭까지 사용가능함을 보이고 있다.

이상의 실험결과로부터 본 논문에서 제안된 ACC는 유정압테이블의 오차보정에 적합한 안정된 구조임을 확인

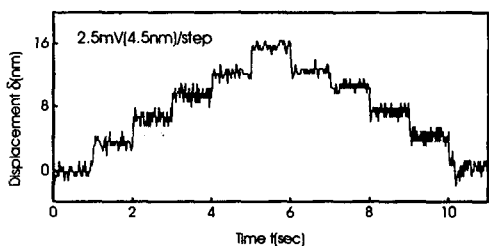


Fig. 6 Micro step response of ACC

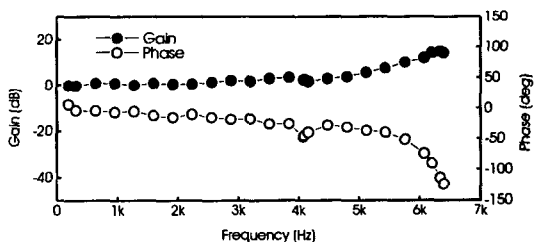


Fig. 7 Frequency bandwidth of ACC

할 수 있다.

4.3 ACC에 의한 유정압테이블의 응답변위 및 동특성

유정압베어링의 조립시에 원하는 성능을 얻기 위해서는 적절한 포켓압력비가 되도록 모세관계수를 설정하는 것이 중요하다. Fig. 8은 ACC에서 얻을 수 있는 모세관계수의 범위를 측정된 결과로 이론적으로 예측된 범위와 잘 일치함을 보이고 있다.

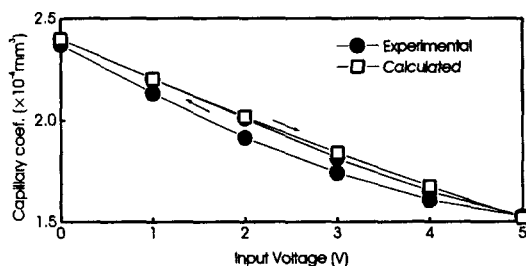


Fig. 8 Available capillary coefficient of ACC

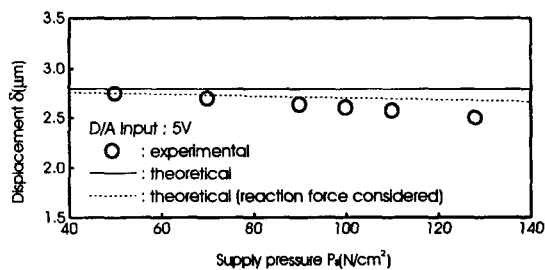


Fig. 9 Maximum displacement of table with supply pressure

Fig. 9는 공급압력을 변화시켰을 때의 테이블의 최대 변위를 측정된 결과로, 이론적으로는 식(5)와 같이 공급압력의 변화와 무관하게 일정한 변위값을 가져야 하나 실제로는 공급압력이 커짐에 따라 최대변위량이 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 모세관 내의 압력분포 및 모세관 외주의 압력(포켓압력과 동일)에 의한 힘이 압전소자의 변위를 억제하는 방향으로 작용하여 최대변위량을 감소시키기 때문으로 해석되며, 그림에서 점선으로 표시한 이론치는 유압에 의한 힘과 압전소자의 강성($120\text{N}/\mu\text{m}$)을 고려하여 계산한 것으로, 측정값과 잘 일치함을 보이고 있어 이들 변수의 영향을 고려하여 적용할 경우 ACC의 응답변위 특성은 이론치와 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Fig. 10(a)는 공급압력 100N/cm²에서 ACC가 연결되어 있는 포켓측 테이블면의 D/A컨버터의 1V/step 입력에 대한 응답변위를 측정된 것으로, 테이블의 응답변위는 입력값을 잘 추종하고 있으며 D/A컨버터의 입력에 대한 응답계인은 0.55 μ m/V임을 나타내고 있다. Fig.10(b)는 반대측 패드에서의 응답변위를 측정된 것으로 Fig. 10(a)와 같은 양의 변위를 보이고 있어 테이블의 탄성변형에 의한 영향은 거의 없음을 확인할 수 있다. Fig. 10(c) 및 (d)는 그 때의 양측패드의 포켓압력 변화를 측정된 것으로 ACC간극의 변화를 포켓압력이 잘 추종하고 있음을 보이고 있으며, 이에 따라 양측 포켓압력의 새로운 평형위치로 테이블이 이동하고 있음을 확인할 수 있다.

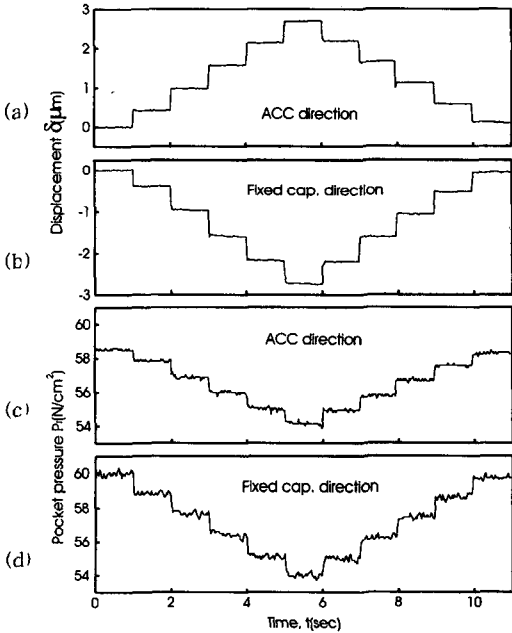


Fig. 10 Displacement & pocket pressure of table with the step input of 0.55 μ m

Fig. 11은 27nm/step의 미소변위에 대한 응답특성으로 각 스텝은 명확히 구별되고 있으나 시간지연에 따른 응답성저하가 있음을 보이고 있다. Fig. 12는 이 때의 주파수 응답특성을 측정된 결과로 기름을 공급하였을 때의 ACC의 주파수 대역폭은 5.5Hz정도까지임을 알 수 있다. 본 시스템의 주 적용대상인 초정밀가공기 이송계의 경우 가공시의 이송속도가 일반적으로 50mm/min이하

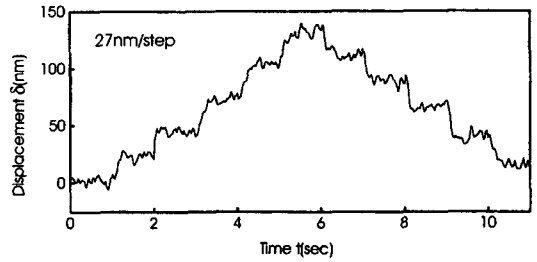


Fig. 11 Micro step response of table by ACC

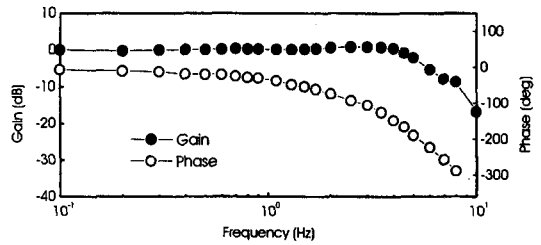


Fig. 12 Frequency bandwidth of table by ACC

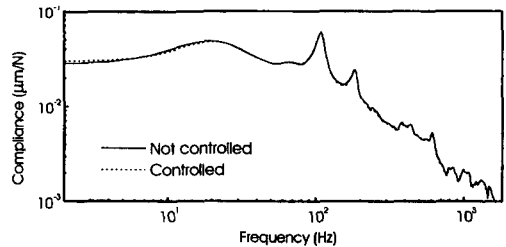


Fig. 13 Influence of ACC on the compliance of table

이므로 이 주파수 대역폭으로도 운동정도의 보정은 충분히 가능하며, 보다 고속의 응답특성이 요구되는 이송계의 경우 각 주파수성분에 대한 역전달함수를 얻어 위상차를 보상하는 역전달함수법⁽⁷⁾ 등을 적용하면 효과적일 것으로 예상된다.

Fig. 13은 ACC의 적용에 따른 테이블의 강성변화를 알아보기위해 각각 ACC를 동작시키지 않은 경우와 최대 입력을 가했을 경우의 동강성을 측정된 결과로, 거의 동일한 결과를 보이고 있어 ACC의 적용에 따른 동강성의 변화는 없음을 확인할 수 있다.

이상의 실험결과로부터 본 논문에서 제안한 ACC를 이용하여 실험용 유정압안내면의 운동오차를 보정하는 경우 최대변위의 1/100인 27nm까지의 분해능으로 보정이 가능함을 알 수 있으며, ACC간극 내의 기름압력에 의한

작용력을 고려하는 경우 이론적인 설계값도 측정값과 잘 일치하고 있어, 유정압안내면의 운동정도 보정에 매우 유효함을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 제안된 ACC의 구조는 D/A컨버터의 분해능인 2.5mV/step까지의 분해능이 가능하며 4kHz까지의 높은 주파수응답특성을 보여 오차보정용으로 매우 안정적인 특성을 가짐을 확인하였다.

2. ACC를 실험용 유정압안내면에 적용한 결과 최대오차보정범위의 1/100인 27nm의 미소분해능으로 오차보정이 가능하며 주파수 대역폭은 5.5Hz까지임을 알 수 있었다.

3. ACC의 적용에 의한 테이블의 강성 변화는 거의 없음을 알 수 있었다.

4. 모세관내에 공급된 기름의 압력에 의한 작용력을 고려할 경우, ACC의 오차보정 범위 및 모세관 유량 특성에 대한 이론계산 결과는 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

이상의 결과로부터 본 논문에서 제안한 ACC의 기본 특성은 유정압안내면의 오차보정에 매우 유효함을 확인하였으며 실제 적용에 따른 안내면 자세오차의 개선효과 등에 대해서도 지속적인 연구를 진행할 예정이다.

참 고 문 헌

1. 上 芳啓, “超精密送り位置決め装置の開発”, 精密工學會超精密位置決めに関する専門委員会前刷集 95-2, pp1-7, 1995.
2. 水本 洋, 藪谷 誠, 清水龍人, 上 芳啓, “超精密工作機械用位置決め装置の分解能に関する比較研究”, 精密工學會超精密位置決めに関する専門委員会前刷集 95-4, pp25-29, 1995.
3. 新野秀憲, 橋詰 等, 伊東 誼, “精密テーブルとその送り駆動系の連結機構に對する二,三の新提案”, 日本機械學會論文集(C編) 57-742, pp174-180, 1991.
4. 박천홍, 김인찬, 정운교, 이후상, “고정밀이송을 위한 볼스크류용 체결기구에 관한 연구”, 한국정밀공학회지 14-5, pp157-163, 1997.
5. 青山尙之, 下河邊明, “高精度な直線運動に関する研究(第2報)”, 精密機械 51-4, pp848-854, 1985.
6. 青山尙之, 渡邊一郎, 下河邊明, “高精度な直線運動に関する研究(第3報)”, 精密機械 51-12, pp2277-2283, 1985.
7. 樋口俊郎, 山口智實, “逆傳達關數補償法を組み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, 1986.