

# 볼스크류로 구동되는 유정압테이블의 미소이송특성 향상

황 주 호\*, 박 천 홍\*, 이 찬 홍\*, 이 후 상\*

## Improvement of Microstep Characteristics in Hydrostatic Table with Ballscrew

Joo-Ho Hwang\*, Chun-Hong Park\*, Chan-Hong Lee\*, Hu-Sang Lee\*

### ABSTRACT

Microstep characteristics largely depends on the variation of friction force induced by the geometric accuracy of ballscrew, guide rail and the control characteristics of servo unit. In this paper, for improving the microstep characteristics of hydrostatic table with ballscrew, microstep resolution according to the control mode of servo amplifier and response characteristic by the variation of integral gain are tested and compared. Relationship between micro motion behavior of hydrostatic table and the output torque is also tested for acquiring the effective variables on control characteristics. From the results, it is confirmed that the torque control mode has a advantage in microstep resolution, and more stable than velocity control mode in low feed rate, and by the increase of integral gain in the elastic motion realm, response characteristics can be improved.

**Key Words :** hydrostatic table(유정압테이블), torque control(토크제어), microstep resolution(미소이송 분해능), response characteristics(응답특성), integral gain(적분이득)

### 1. 서 론

최근들어 고정밀가공에 대한 수요가 급증함에 따라 이에 상응하는 이송계 위치결정정도의 고정도화에 대한 연구가 활성화되고 있다. 현재, 이송계의 위치결정정도를 고정도화하는 일반적인 방법으로 회전식 엔코더(rotary encoder)의 분해능을 높이고 이에 따른 볼스크류 등 이송기구에 의한 운동변환오차를 NC에 의해 보정하는 방

법 및 리니어 스케일(Linear scale)을 이용하여 이송 테이블의 위치를 귀환하는 방법등이 사용되고 있다. 정밀 머시닝센터나 정밀 NC선반의 경우 이러한 방법을 사용하여 2 ~ 5 $\mu$ m 까지의 위치결정정도를 얻고 있다.

그러나 보다 높은 위치결정정도가 요구되는 경우 이송계의 분해능과 NC보정이나 리니어 스케일과 같은 보정기구의 분해능은 더 이상 비례적으로 개선되지 않으므로 단순한 보정기구의 분해능 향상만으로 위치결정정도의

\* 한국기계연구원 자동화연구부

향상을 기대하기는 어렵다. 이송계의 분해능에 영향을 미치는 요소로는 이송테이블의 마찰력변화, 볼스크류 등 이송기구의 가공정도 및 조립정도, 그리고 모터를 포함한 서보계의 제어정도 및 특성 등이 있으며 고정도화를 위해서는 이러한 요소들이 요구되는 위치결정정도에 미치는 영향을 파악하고 개선할 필요가 있다.

Ro등<sup>(1)</sup>은 상대적으로 이송마찰력의 영향이 적은 공기 베어링테이블을 대상으로 미소구동시에 나타나는 비선형 운동특성을 모델링함으로써 미소이송시스템에 따른 서보계와 이송기구간의 응답특성을 이론적으로 규명하였으며, Otsuka등<sup>(2)</sup>은 롤러가이드방식의 테이블의 볼스크류구동에 있어 비레이드의 수정 및 잔류진동제거시스템을 적용하여 10mm의 스텝입력에 대하여 0.01 $\mu$ m의 위치결정정도 및 0.3 ~ 0.4sec의 응답시간 특성을 달성하였다.

본 논문에서는 볼스크류로 구동되는 유정압테이블 이송계에 대한 기본적인 특성을 파악하고 그로부터 미소이송 분해능 및 응답시간특성 등의 위치결정특성을 향상시킬 수 있는 제어방식을 정립하고자 하였다. 이를 위해 토오크제어방식을 이송계에 적용하고 속도제어방식과의 상대적인 비교를 통해 미소이송 분해능 향상의 가능성을 검토하였으며 미소변위구간에서의 볼스크류내 볼의 탄성변위에 의한 특성변화에 착안하여, 미소변위구간에서의 적분이득의 변경에 의한 응답시간특성의 향상도 함께 검토하였다.

## 2. 이송계의 구성

### 2.1 유정압테이블 및 이송기구

실험용 유정압테이블 및 이송계의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 유정압테이블은 양면패드방식(double pad type)의 반밀폐형구조로 되어 있고, 베어링간극은 수직방향 47 $\mu$ m, 수평방향 49 $\mu$ m이며 공급압력 1MPa에서 측정된 테이블의 정강성은 수직방향 90N/ $\mu$ m, 수평방향

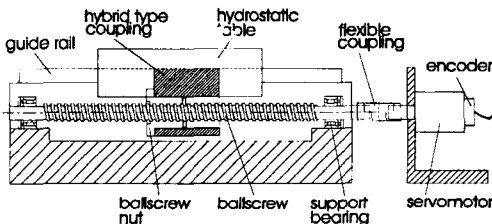


Fig. 1 Hydrostatic table and its feeding system

50N/ $\mu$ m이다. 사용된 윤활유의 점도는 10cSt이며 오일 컨디셔너(oil conditioner)에 의해 공급유온은  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  이내로 제어되고 있다.

테이블과 이송용 볼스크류 연결부는 볼스크류의 가공오차, 조립오차 등에 의해 발생하는 구동오차 및 외란이 테이블에 주는 영향을 감소시키기 위해 유정압베어링과 탄성힌지를 이용한 복합형 체결기구<sup>(3)</sup>를 채용하였다. 이송용 볼스크류는 리드 5mm의 C0급을 사용하였으며 양단은 고정-고정방식으로 지지되어 있다. 볼스크류와 구동용 모터(AC servo, 1.5 kW)는 플렉시블커플링(Mayr, 비틀림강성 8Nm/rad)을 이용하여 연결되어 있고 구동모터는 제어용 보드(MEI社 PC-DSP)를 내장한 PC를 이용하여 PID방식에 의해 반폐루프(semi-closed loop)방식으로 제어되며 5,000ppr의 회전식 엔코더가 모터 뒷면에 부착되어 있다. 한편, 이송분해능을 향상시키기 위해 엔코더의 파형을 10채배할 수 있는 체배박스를 사용하였으며, 제어기(controller)내에서 4채배가 추가되어 최소 이송분해능은 0.025 $\mu$ m 가 되도록 구성되어 있다.

### 2.2 제어계

실험에 사용된 서보모터는 서보앰프가 후부의 타코센서로부터 속도 상태를 귀환받아 PI 제어로 입력 명령에 대하여 보상하는 속도제어방식과 모터에 공급되는 전류에 비례하는 전압 신호를 귀환받아 토오크를 보상하는 토오크제어방식을 사용할 수 있도록 되어있다.

Fig. 2는 제어계의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. 속도제어방식에 사용되는 타코미터의 귀환 이득은 0.884V/krpm으로 되어있고, 가변저항으로 PI 보상회로의 이득을 조절하도록 되어있다. 보상회로의 이득은 실험적으로 불안정하지 않는 범위에서 최고의 크기를 갖도

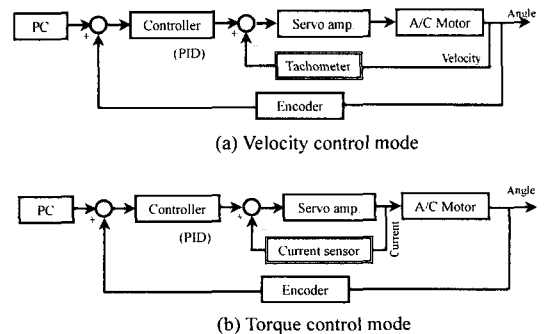


Fig. 2 Block diagram of control system

록 하였다. 명령에 대한 이득은 속도제어방식의 경우 680rpm/V로, 토크제어방식의 경우 0.74Nm/V로 되어 있다.

한편 서보모터의 제어에 있어 PID이득의 설정은 제어용 보드와 함께 제공되는 설정용 라이브러리를 이용하였고 알고리즘에 있어 모터제어를 위한 n회계의 출력은 식 (1)과 같이 되며 제어주기는 0.4ms,  $S_{max}=0.82mm$ ,  $K_0=0$ 으로 설정 하였다. 목표위치에 도달하는 속도 형태는 가속, 정속, 감속의 사다리꼴을 사용하였다.

$$O_n = K_R \cdot (K_p \cdot E_n + K_d \cdot (E_n - E_{n-1}) + K_I \cdot S_n) + K_0 \quad (1)$$

$$S_n = S_{n-1} + E_n, \text{ if } -S_{max} < S_n < S_{max}$$

$$S_{max}, \text{ if } S_n > S_{max}$$

$$-S_{max}, \text{ if } S_n < -S_{max}$$

$O_n$  : n회계의 출력,  $K_R$  : 스케일계수,  $K_0$  : 정적오프셋량,  
 $K_p$  : 비례이득,  $K_d$  : 미분이득,  $K_I$  : 적분이득,  
 $E_n$  : n회계 오차값,  $S_n$  : 오차의 n회계 까지의 합

### 3. 실험장치 및 실험방법

먼저 이송계의 요소별 이송방향의 주파수 응답을 실험적으로 구하기 위해 함수발생기(Function Generator)를 이용, 진폭이 동일하고 가변의 주파수를 갖는 구형파의 입력신호를 모터에 인가하였으며 이 때의 테이블의 응답 변위는 정전용량형 변위센서(Microsense 3401, 0.25  $\mu m/V$ )를 테이블 이송방향에 설치하여 측정하였다. 또한 이송축의 각 요소간의 전달특성도 함께 파악하기 위해 커플링과 연결되는 볼스크류의 끝단 및 모터와 엔코더의 연결부에 길이 30mm의 바가 달린 보조축을 삽입하여 회전변위를 직선변위로 변환함으로써 측정하였다.

서보앰프의 제어방식에 따른 특성을 살펴보기위해 이송중 엔코더 신호를 받아들이며 미분한 후 속도의 변동을 비교하였으며 이 때의 미소이송 분해능을 테이블 이송축에 설치한 정전용량형 변위센서를 이용하여 측정함으로써 함께 비교, 검토하였다.

이송계의 이송영역에 따른 특성은 목표입력에 따른 출력 토크를 서보앰프에서 제공되는 전류 모니터링 단자를 이용하여 측정하였다. 한편 서보앰프의 제어방식에 따라 이송계의 안정을 위한 PID이득값은 크게 달라지게 되므로, 실험에 앞서 두가지의 제어방식에 대하여 전 구간에서 안정적인 이득을 구했으며 그 결과 이득값은 토크

제어방식의 경우  $K_P=5.86$ ,  $K_I=0.16$ ,  $K_D=39.1$ , 속도 제어방식의 경우  $K_p=2.34$ ,  $K_I=0.039$ ,  $K_D=15.6$ 으로 설정되었다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 이송계의 주파수 특성

Fig. 3 (a), (b), (c)는 각각 모터축, 모터와 연결되는 볼스크류 끝단 및 테이블에서의 이송방향 주파수응답을 측정된 결과를 나타낸 것으로 -3dB을 기준으로 한 주파수대역폭은 모터축 17Hz, 볼스크류 끝단 20Hz, 테이블 10Hz 정도를 나타내고 있다. 모터축의 주파수대역폭이 볼스크류 끝단에 비해 오히려 낮은 것은 회전변위를 직선 변위로 변환하여 측정함에 따른 측정오차의 영향이 포함되어 있기 때문으로 추정되며, 기본적으로 주파수대역폭에 큰 차이를 보이지 않으므로 볼스크류 끝단과 모터축 사이에 설치되어 있는 플렉시블커플링이 주파수특성에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 한편 볼 스크류와 너트, 너트와 테이블을 연결시키는 복합커플링부에서의 강성 저하 등에 의해 볼스크류 끝단과 테이블 이송방향의 응답특성은 상대적으로 크게 저하되는 경향을 보이고 있다.

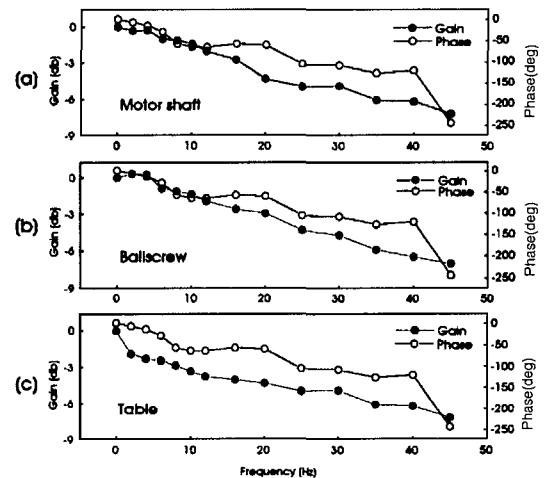
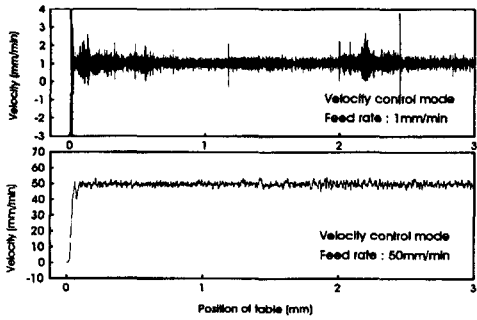


Fig. 3 Frequency bandwidth of feeding system

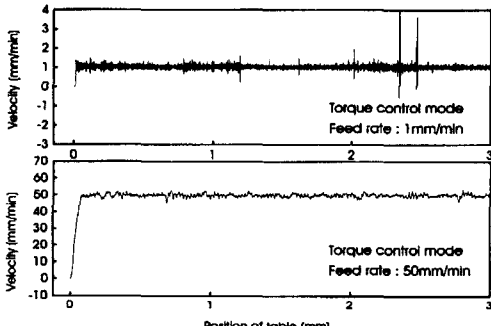
### 4.2 서보앰프의 제어방식에 따른 특성 비교

#### 1) 이송속도의 안정성

Fig. 4는 서보앰프의 제어방식에 따른 이송중의 속도



(a) Velocity control mode



(b) Torque control mode

Fig. 4 Velocity fluctuation according to control mode

안정성을 알아보기 위해, 무부하상태에서 속도제어방식 및 토크제어방식으로 이송시켰을 때의 속도를 측정할 결과를 나타낸 것이다. 실험은 고정밀가공에서 상대적으로 저속과 고속이라고 할 수 있는 1mm/min 및 50mm/min의 이송속도에 대해 수행하였으며 속도는 엔코더 신호를 측정하여 미분값으로 나타내었다.

일반적으로 토크제어방식은 속도제어방식에 비해 마찰력변동에 민감하다고 알려져 있으나, 측정결과로부터 이송속도에 관계없이 토크제어방식은 속도제어방식에 비해 속도변동면에서 오히려 안정됨을 나타내고 있다. 이것은 실험장치에 사용된 볼스크류가 C0급으로 가공오차 및 조립오차 등에 의한 런아웃이 약 5μm 정도이므로 볼스크류에 의한 마찰력 변동이 크지 않고 유정압테이블에 의한 마찰력 변동도 매우 작기 때문이며 상대적으로 속도제어방식에서는 실험에 사용된 이송속도를 내기 위한 회전수가 상용범위에 비해 저속이므로 이에 따른 속도변동이 커지기 때문이다.

Fig. 5는 이러한 원인을 보다 자세히 살펴보기 위해, 무부하상태에서 일정 구간을 왕복운동할 때의 두 제어방식에서 각각의 폐루프회로의 전압 신호를 측정하여 나타

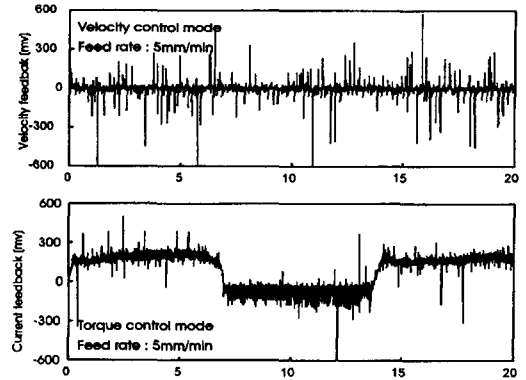


Fig. 5 Feedback signal of the servo amplifier

낸 것으로, 토크제어방식의 경우 폐루프신호의 크기가 어느정도 존재하지만 속도제어방식의 경우 폐루프신호가 저속에서는 전혀 나타나지 않음을 보이고 있다. 이것은 토크 제어방식에서 움직이기 시작하는 토크 크기가 상용범위 안에 있지만 속도제어방식의 경우, 타코미터의 귀환이득이 0.884V/krpm, 즉 천rpm대의 운동속도를 기준으로 설계되었으므로 실험에 사용된 이송속도범위에서는 귀환 신호의 크기가 노이즈에 비하여 너무 작기 때문이다.

Fig. 6은 마찰력변동이 큰 경우의 특성을 알아보기 위해, 고정밀가공면에서 매우 큰 절삭력이라고 할 수 있는 200N의 부하를 사하중을 이용해 테이블에 가했을 때의 속도를 측정한 것으로, 속도변동의 경향에는 큰 변화가 없음을 볼 수 있다.

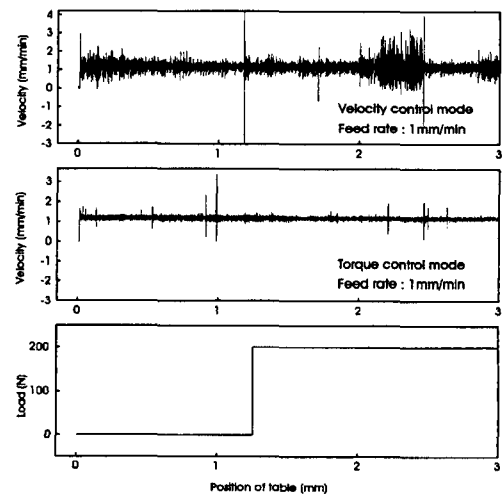


Fig. 6 Velocity fluctuation by external load

## 2) 미소이송분해능

Fig. 7은 앰프의 제어방식이 미소이송 분해능에 미치는 영향을 알아보기 위해, 시스템의 이론적 최소분해능의 2배인 0.05 μm의 스텝명령을 주었을 때 테이블의 응답변위를 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 그림으로 부터 토크제어 방식의 경우 각 스텝은 충분히 구별되고있으나, 속도제어 방식의 경우 천rpm대의 운동속도를 기준으로 설계되어 있어 각 스텝의 구별이 불가능해짐을 보이고 있다.

이상으로부터 유정압테이블을 이용한 고정밀 위치결정 시스템에 있어서 토크제어방식의 사용은 미소이송 분해능 향상에 매우 유리함을 알 수 있다.

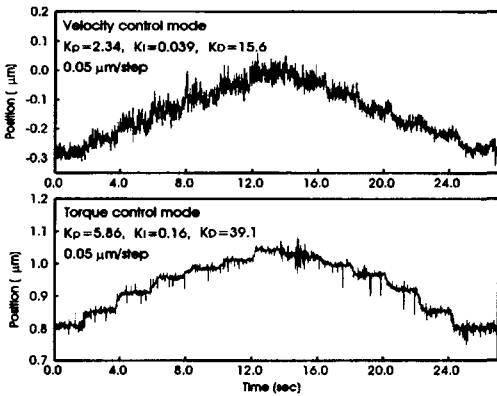


Fig. 7 Microstep response of hydrostatic table according to control mode

## 4.3 이송영역에 따른 운동특성

Fig. 8은 미소이송영역에 있어서 모터의 출력토크와 볼스크류에 의한 테이블의 변위와의 관계를 알아보기 위해, 앰프를 토크제어방식으로 하고 사인파형의 출력토크를 저주파로 가했을 때의 테이블의 변위를 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 그림으로 부터 토크의 증가와 변위의 증가가 비례하는 구간(A-B구간), 토크가 증가하지 않아도 테이블의 변위가 크게 증가하는 구간(C-D구간) 및 그 중간형태의 천이구간(B-C구간)이 각각 존재함을 확인할 수 있다.

A-B구간은 탄성운동영역으로, 2~3 μm 이내의 변위영역에서 발생하고 있으며, 볼스크류 너트내의 볼이 구동토크에 의해 탄성변형을 일으키는 영역이다<sup>(1)</sup>. B-C구간은 탄성변형 상태로 평형을 유지하는 볼에 계속적인 토크가 가해짐에 따라 구름운동이 일어나기 시작하는 구간이며, C-D구간은 약15 μm 이상의 변위에서 나타나고, 구

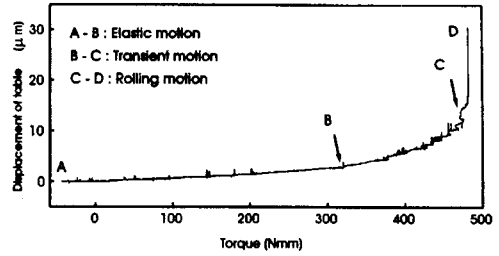


Fig. 8 Relationship between motor torque and displacement of hydrostatic table in the realm of micro motion

름운동이 안정적으로 나타나는 구름운동영역이다. 따라서 탄성운동영역에서의 미소위치결정을 위해서는, 변위에 비례하는 토크를 인가하여 탄성에 대한 복원력과 힘의 평형을 이루게 하여 정지 상태를 유지하여야 한다.

## 4.4 적분이득이 응답특성에 미치는 영향

PID제어에 있어 지속적인 토크가 가해지기 위해서는, 적분이득과 이에 곱해지는 오차의 합이 존재해야 한다. Fig. 9는 탄성운동영역인 0.5 μm/스텝으로 보냈을

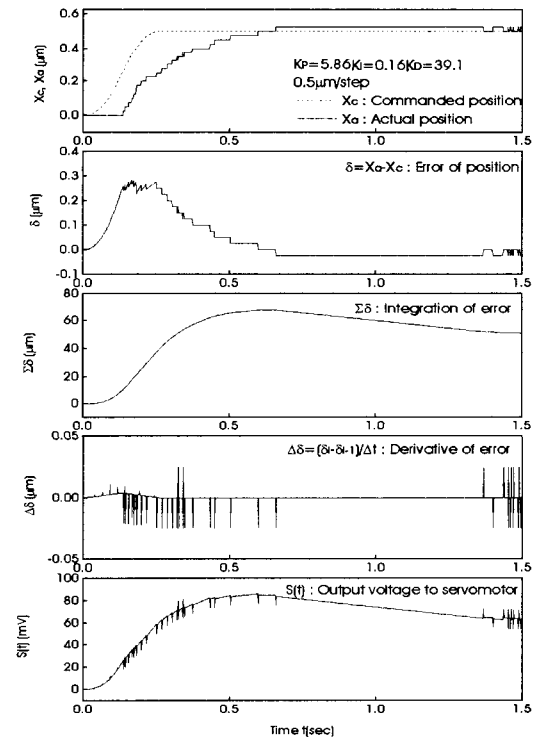


Fig. 9 Errors and PID controlled output voltage in the realm of elastic motion

때의 명령값과 엔코더 신호를 읽어서 식(1)에 의하여 위치오차, 오차의 합, 오차의 미분 및 제어기에서 모터로 출력되는 전압을 구한 것이다. 그럼으로부터 제어기에서 모터로 출력되는 전압은 적분이득과 관련되는 에러의 합과 비례함을 알 수 있다.

Fig. 10은 구름운동영역에서 125  $\mu\text{m}$ /스텝을 주었을 때의 결과로, 오차와 이득을 곱하여 비교해보면 위치오차 및 오차의 미분에 관한 파형이 제어기의 출력전압에 미치는 영향이 크음을 알 수 있다. 이상으로부터 미소이송을 위한 탄성운동영역에서는 적분이득의 조절에 의해 운동특성을 조정할 수 있음을 확인할 수 있다.

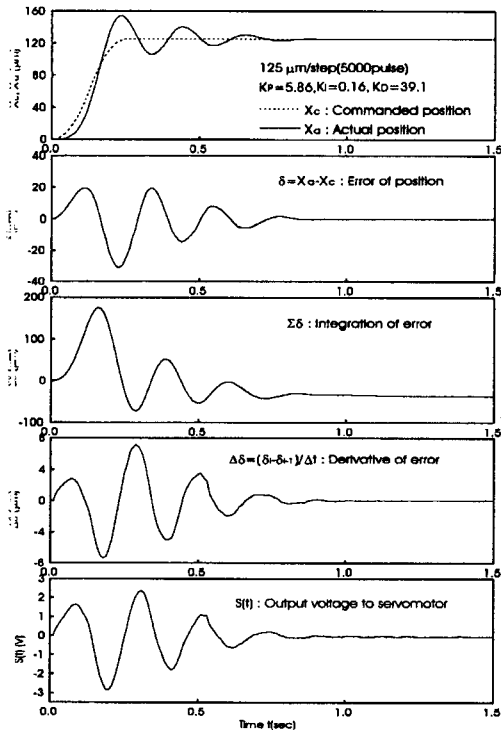


Fig. 10 Errors and PID controlled output voltage in the realm of rolling motion region

Fig. 11은 미소이송에서 적분이득의 변화가 미치는 영향을 구체적으로 살펴보기 위하여 0.5  $\mu\text{m}$ /스텝에 있어 적분이득을 전구간에 대하여 조율된 상태로 유지했을 때의 응답특성과 4배로 증가시켰을 때의 응답특성을 비교한 것이다. 위치 결정속도와 직접적인 연관이 있는 목표 위치 0.5  $\mu\text{m} \pm 5\%$  (최소 이송분해능) 내에 수렴되는 시간 ( $t_s$ )이 약 20% 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 12는 구름운동영역인 20  $\mu\text{m}$ /스텝에서 이득의 변화에 대한 실험을 수행한 결과로, 적분이득을 증가시킴에 의해 시스템이 불안정해지는 현상을 보이고 있다. 이상의 결과로부터 탄성운동영역에서 구름운동영역에 걸쳐 이송할 경우, 탄성운동영역에서는 증가시킨 적분이득을 적용하고 구름운동영역에 도달하면 전구간에 대해 조율된 적분이득을 적용하는 것에 의해 시스템의 응답특성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

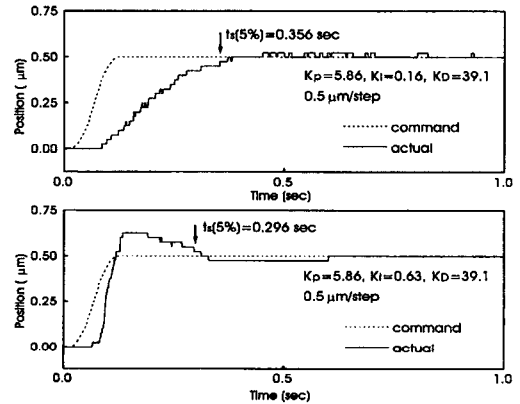


Fig. 11 Step response of the feeding system according to the integral gain in the realm of elastic motion

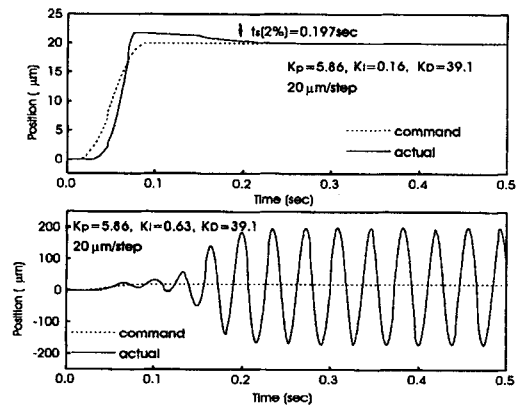


Fig. 12 Step response of feeding system according to the integral gain in the realm of rolling motion

이 경우에 적분이득을 운동영역에 따라 급격히 변화시키면 시스템이 불안정해질 수 있으므로 단계적으로 적분이득을 변화시킬 필요가 있으며, Fig. 13은 이를 위해, 정지상태에서 0.5  $\mu\text{m}$ 의 변위까지는 적분이득을 0.63으로 유지하다가 단계적으로 적분이득을 감소시켜 구름운

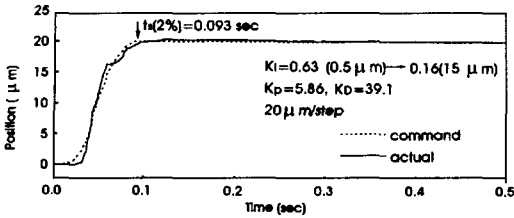


Fig. 13 Step response of feeding system adjust integral gain from the elastic to the rolling motion realm

동영역인 15  $\mu\text{m}$ 의 변위에서 부터 적분이득이 전구간에 대하여 조율된 값인 0.16으로 이송 하였을 때의 응답특성을 나타낸 것이다. 목표위차 20  $\mu\text{m} \pm 2\%$  (0.4  $\mu\text{m}$ )내에 수렴되는 시간이 약 53% 감소되었음을 알 수 있다. 이상으로부터 탄성운동영역에서 적분이득을 조절하는 것에 의해 시스템의 응답특성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있으며, 적응제어법 등을 통해 적분이득의 변화를 조절할 경우 응답특성은 더욱 안정적으로 향상될 것으로 예측된다.

### 5. 결 론

본 논문에서는, 볼스크류로 구동되는 유정압테이블 이송계를 대상으로하여, 토오크제어방식을 적용한 미소이송 분해능 향상 및 미소변위구간에서의 적분이득의 변경에 의한 응답시간특성 향상의 가능성을 실험적으로 검토하였으며 그로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 유정압테이블 이송계에 토오크제어방식을 적용한 결과, 속도제어방식에 비해 향상된 분해능을 얻었으며, 구름운동이 지배적인 구름운동영역에 있어서도 안정된

제어특성을 나타내었다.

2) 볼스크류 구동의 경우 볼의 탄성운동특성에 의한 영역과 구름운동을 하는 영역에서의 시스템특성은 변화하며 그 응답특성은 구름운동영역의 경우 비례이득과 미분이득에 의해, 탄성운동영역의 경우 적분이득에 의해 주로 지배됨을 알 수 있었다.

3) 탄성운동영역에서 적분이득을 증가시키는 방법의 의해 이송계의 응답특성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### 참 고 문 헌

1. Ro, P. I. and Hubbel, P. I., "Nonlinear microdynamic behavior of a ball-screw driven precision slide system," Precision Engineering, Vol.14, No.4, pp229, 1992.
2. 大塚二郎, 飯田 昇, 川瀬佳洋, 秋野良平, 深田茂生, "ねじ駆動による超精密位置決め第3報-ナノメートル精度位置決めと整定時間の短縮-", 精密工學會誌, 第59巻, 第10號, pp1655, 1993.
3. 박천홍, 김인찬, 정운교, 이후상, "고정밀 이송을 위한 볼스크류용 체결기구에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제14권, 제5호, pp157, 1997.
4. 小 信夫, 大塚二郎, "ボールねじの摩擦トルクに関する研究-ダブルナット方式の特性-, 精密工學會誌, 第52巻, 第3號, pp528, 1986.
5. 황주호, 박천홍, 이찬홍, 이후상, "볼스크류를 이용한 유정압테이블의 고정밀위차결정," 97년도 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp288, 1997.