

초정밀 위치결정기구의 제어성능 평가에 관한 연구

김재열*, 송찬일**, 곽이구***, 마상동***, 한재호****, 이승찬*****

A Study on the Design and Control Super-Precision Positioning Apparatus

Jae-yeol Kim*, Chan-il Song**, Lee-ku Kwac***, Sang-dong Ma***,
Jae- ho Han****, Seung-Chan Lee*****

ABSTRACT

We make a study of pricisioning apparatus that is used in the various industrial machine. The study was carried out to develop a pricision positioning apparatus, consisting of servo motor and piezoelectric actuator. This system is composed of fine and coarse apparatus, measurement system and control system. Piezoelectric actuator is designed for fine positioning. Coarse positioning using lead screw is driven by servo motor. Control system output a signal from laser interferometer and microsense to amplifier of servo motor and piezoelectric actuator after digital signal processing(DSP). Resolution of this apparatus measure with laser interferometer and microsense

so, we can controlled positioning of one output by the coarse positioning in the system. also we obtain the positioning resolution of 9nm in the system.

key word : Piezoelectric actuator(압전소자 액츄에이터), Fine positioning(미동위치결정), Coarse positioning(조동위치결정), Resolution(분해능), DSP(digital signal processing), PID제어(Proportional-integral-differential controll)

1. 서론

초정밀 위치결정 기구는 정밀 가공기, 정보 기기, 재측 기기, 반도체 제조 장치 등의 각종 산업 기기에 있어 중요장치로 많이 이용되고 있다. 현재는 각 분야에서 고정도가 요구되고 있어 이에 대응할 수 있는 고 정밀 미동제어 위치결정기구에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 0.1 μ m이하의 변위를 쉽게 제어 할 수 있는 압전 소자로 만들어진 액츄에이터를 이용하기 위한 노력이 계속되고 있다. 또한 고 정도와 함께 대 스트로크(Stroke)를 가지며, 동시에 고속동작의 실현이 필요하다. 따라서 이런 여러 성능을 만족시키는 초정밀 위치결정 기구는 고정도를 요하는 각 분야에 다양한 응용이 가능하리라 본다.^{(1)~(6)}

고속, 고정도 대 스트로크의 위치결정을 실시할 경우 1자유도에 대해 2종류의 기구를 이용하는 방법이 있다. 즉 고속, 대 스트로크의 조동위치 결정과 변위 분해능을 높이는 정밀위치결정을 병행하여 실시한다. 이와 같은 위치 결정기구는 현재 많이 제안되어 있다. 그러나 이들 기구의 제어방법은 기구의 구성조건에 따라 서로 다르며 가동 범위가 서로 다른 2종류의 액츄에이터(Actuator)로 원하는 정도를 얻기 위해서는 기구에 알맞은 제어 방법이 필요하다.

종래의 제어 방식을 보면 조동 위치결정과 미동

* 조선대학교 공과대학 기계공학부, 수송기계
부품자동화 연구센터 부교수
** 조선대학교 공과대학 전기제어계측공학부
*** 조선대학교 대학원 정밀기계공학과
**** 송원 대학 자동차과 조교수
***** 대한상공회의소 광주직업훈련원 자동화설비과

위치결정을 순차적으로 반복하여 제어하는 분리 방식으로 크게 나눌 수 있다. 전자의 경우는 분리방식은 조동 기구로 미동기구에서 위치편차보상이 가능한 위치결정을 실시한 후, 나머지 편차를 보상하는 방식으로 조동과 미동위치 결정이 시간적으로 완전히 분리되어 있다. 연속제어 방식은 조동 동작이 실시되는 도중에 미동기구의 위치 결정동작을 실시하는 방법이다.

일반적으로 많이 이용되는 조동 기구로는 이송나사식, 마찰 구동식, 벨트식 등이 있다. 이들은 큰 가동 범위를 갖고, 고속으로 위치 결정이 가능하며 큰 부하에 대응할 수 있는 장점을 가지는 반면에 고정도 위치결정이 곤란한 단점이 있다. 미동기구는 고정도의 위치결정이 가능하지만 스트로크가 짧고 작은 부하에 적합하다. 따라서 압전 소자를 이용한 기구가 많이 사용된다.^{(1)~(10)}

보통 요소부품이 이상적이지 못하고 조립이 완벽하지 못하므로 오차가 발생하는데 오차에는 기계적 강성, 형상특성, 백래쉬, 열적 변형 등의 계통오차와 기계진동, 외란의 우연오차 성분이 있고, 종래에는 계통오차만을 오프 라인으로 측정하여 소프트웨어로 보정 하였으나, 제품이 고정밀화 하면서 서브마이크론의 위치정밀도를 요구됨에 따라서 우연오차 성분이 문제시된다.

우연오차 성분을 줄이는 방법에는 1차적으로 오차가 없는 요소부품을 만드는 것이고 2차적으로는 발생한 오차성분을 보상하는 방법이다. 1차적인 방법은 계속 연구가 진행중이지만 서브마이크론의 정밀도를 가지는 부품을 제작하는 것은 매우 어려운 일이고 2차적 방법은 측정과 제어에 의해서 우연 오차 성분과 계통오차 성분 모두를 보정한다. 소프트웨어적인 보상은 요소부품의 가공정도와 조립정도에 의해서 도달할 수 있는 정밀도가 정해지지만 측정과 제어에 의한 실시간 오차보상은 측정기의 정밀도와 서보능력에 의해서 도달 정밀도가 정해진다.

현재 서브마이크론의 분해능과 정밀도를 가지는 위치검출 센서와 마이크로 서보가 많이 개발되어 있어 측정과 제어에 의한 실시간 운동오차 보상이 용이해졌다.

때문에 서브마이크론의 위치 정밀도를 구현하기 위해서 초정밀 급의 요소부품을 가공, 조립하

는 하드웨어에 의존하는 방법보다는 측정과 제어에 의한 실시간 운동오차보상이 더 용이하다.⁽¹¹⁾

본 연구에서는 조동 기구로는 이송나사를 미동기구로는 탄성 힌지를 이용하여 구성하고 각각의 구동기로는 DC서보 모터와 압전소자를 이용한다. 또한 계측시스템은 레이저 측정시스템(Laser Measurement system)과 정전용량형 변위계(Capacitive Sensor)에 의해 변위를 측정하고, 제어기(controller)로는 PID제어기와 디지털신호처리시스템(DSP)을 이용하여 조동 및 미동기구의 위치결정기구에 대한 유효성을 확인하고 제어 성능을 평가하고자 한다.

2 조동 위치 결정기구의 구성과 모델링

2.1 조미동기구

조미동기구의 조동기구로는 나사와 더블너트로 구성된 이송나사기구(Lead Screw)를 구성하고 미동기구로는 탄성 힌지를 이용하여 구성하고 각각의 구동기(Actuator)로는 DC 서보 모터와 압전소자를 이용하여 가동 범위가 서로 다른 두 종류의 액츄에이터를 이용하기 위해 연동 제어방식을 채택, 조동동작이 실시되는 도중에 미동기구의 위치결정동작을 실시한다.

Fig. 1에 조미동 기구를 나타낸다.

조미동기구를 제작 설치하기에 앞서 항온, 항습, 방음의 영향을 최대한 줄여주는 것도 무시해서는 안 된다.

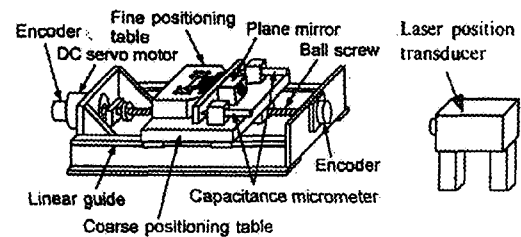


Fig.1 Coarse and Fine Positioning Apparatus

본 기구는 조동 위치결정기구와 조동 기구 위에 고정시킨 미동위치 결정기구로 구성된다. 조

동 기구에는 여러 가지 방식이 있지만 여기서는 이송나사(Lead Screw) 기구를 선택하였다. 이송나사 기구는 나사(Screw)와 더블 너트(Double Nut)로 구성되어 있고, DC서보 모터(UGTMMEM-03SB)에 의해 구동시킨다. 모터의 회전 운동은 더블너트식 볼 나사(리드 2mm, 외경19mm)에 의해 직선운동으로 변환되어 조동 테이블을 움직인다. 이동거리는 약 160mm이고 DC서보 모터는 구동용 서보앰프에 의해서 최대 약 2A의 전류공급이 가능하고 조동 테이블을 약 600mm/s로 이동이 가능하다.

미동기구는 탄성 원지의 미동테이블을 구성하고, 압전소자(NLA-10 X 10 X 18)에 의해 구동시킨다. 구동범위는 $\pm 5\mu\text{m}$ 이다.

2.2 기구의 모델

기구의 모델링은 먼저 조동의 이송나사축의 운동방정식, 조동테이블의 운동방정식, 모터의 회로방정식을 세우고 이를 상태방정식으로 유도하여 전달함수를 구하였다.

다음 미동의 압전소자의 모델링을 하였다.

Fig. 2에 조미동 기구의 모델을 나타낸다.

(1) 조동 기구의 모델

조동 기구는 제어대상을 고속으로 목표치 부근에 위치결정을 실시하는 것을 목적으로 한다. 여

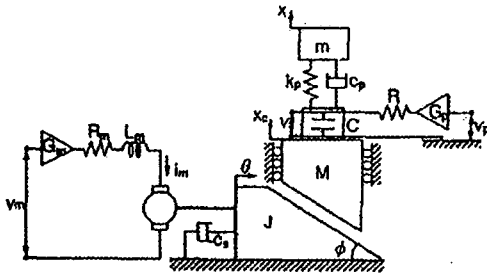


Fig.2 Model of Coarse-Fine Positioning Apparatus(Dual Positioning)

기서는 커플링과 볼 나사 및 너트사이의 스프링 효과는 무시하고, 모터축 커플링과 이송나사축을 하나의 강체로 보고 모델을 간략화 했으며 마

찰토크도 무시하였다. 먼저 이송 나사 축의 운동방정식을 세우면

$$J \ddot{\theta} + C_s \dot{\theta} = -\frac{d}{2} N \sin \theta + T$$

조동 테이블의 운동방정식은

$$M \ddot{x}_c = N \cos \theta$$

더블너트의 회전과 테이블의 변위는

$$x_c = \frac{l}{2\pi} \theta \equiv K\theta$$

모터에 흐르는 전류와 발생 토크는

$$T = K_2 i_m \quad \text{또는} \quad \tan \theta = \frac{l}{\pi d}$$

의 관계가 성립한다.

모터의 회로 방정식은

$$v_m = R_m i_m + L_m \dot{i}_m + K_1 \dot{\theta}$$

식(1)(2)(3)(4)에 의해

$$(J + K^2 M) \ddot{x}_c + c_s \dot{x}_c = K K_2 i_m$$

이 얻어진다. 또한 식(3)(5)에 의해서

$$v_m = R_m i_m + L_m \dot{i}_m + K_1 \frac{\dot{x}_c}{K}$$

식(6)(7)에 의해서 x_c, \dot{x}_c, i_m 을 상태변수로 하고, 입력은 모터 앰프의 입력전압으로 하는 상태방정식을 유도하면 식(8)이 되고

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{i}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{-c_s}{J + K^2 M} & \frac{K K_2}{J + K^2 M} \\ 0 & \frac{-K_1}{L_m K} & \frac{-R_m}{L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \dot{x}_c \\ i_m \end{bmatrix}$$

출력방정식은 아래 식(9)와 같이 된다.

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x_c \\ \dot{x}_c \\ i_m \end{bmatrix} + [0]u$$

(2) 미동기구의 모델

미동기구에 대한 운동방정식들은 다음과 같다.

미동테이블의 변위와 압전 소자와의 변위 관계는

$$m \ddot{x} + c_p (\dot{x} - \dot{x}_p) + K_p (x - x_p) = 0$$

로 되고 압전소자 양단의 전압과 압전소자의 변위관계는

$$x_p = K_p v$$

이다. 그리고, 앰프의 입력전압과 압전소자 양단의 전압관계를 보면

$$G_p V_p = RC\dot{v} + v$$

로 됨을 알 수 있다.

식(10)(11)(12)로부터 x, \dot{x}, v 상태변수로 하는 상태방정식은

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\dot{x}} \\ \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{k_p}{m} & -\frac{c_p}{m} & \frac{k_p K_p}{m} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{c_p G_p K_p}{RCm} \\ \frac{G_p}{RC} \end{bmatrix} v_p$$

이 되고 출력방정식은 식(14)와 같이 된다.

$$y = [1 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ v \end{bmatrix}$$

2.3 실험장치도

변위 측정용 계측시스템은 레이저 측정시스템(Laser Measurement System)과 정전용량형 변위계(Capacitive Sensor) 등을 이용하여 변위를 측정하였다.

Fig.3에 실험장치도를 나타냈다.

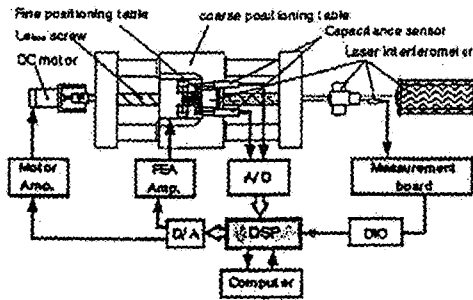


Fig.3 Schematic Diagram of Precision Dual Positioning System

장치는 조동, 미동기구와 계측시스템 그리고 제어시스템부로 구성하였다. 정밀 위치 결정 테이블의 측정을 위하여 변위 분해능이 $0.62\mu\text{m}$ 이고 측정범위가 $\pm 1.33\text{m}$ 의 레이저 측정시스템(ZYGOMI-1000)을 사용하고 조동 기구에 대한 미동기구의 상대 변위 측정을 위해서 정전용량형 변위계를 이용(ADE社용 : microsense)하였다. 이것은 변위 분해능이 10mm 이하이고 측정범위가

$\pm 25\mu\text{m}$ 이다.

제어시스템으로는 디지털 신호처리시스템(DSP)을 사용한다. 이는 레이저 측정시스템과 정전용량센서로 부터의 신호를 각각 A/D 변환하고 DSP의 메인 CPU에서 연산처리를 실시한 다음 D/A 변환을 하여 DC서보 모터용 앰프와 압전소자 구동용 앰프로 출력한다.

3 제어계 설계

종래의 제어방식을 보면, 조동 위치결정과 미동 위치결정을 순차적으로 반복하여 제어하는 방식과 조동과 미동기구를 동시에 제어하는 연동제어방식으로 나눌 수 가있다. 본 연구에서는 후자의 제어방식을 기본으로 설계를 하였다. 제어기는 PID제어기를 설계하여 실험을 하였다.

Fig.4 은 시스템의 블록선도이다.

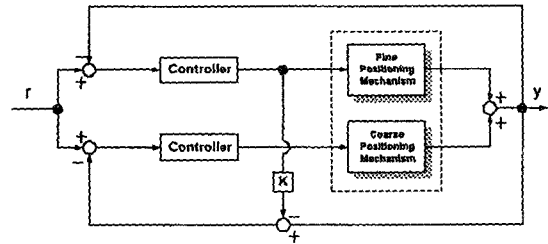


Fig.4 System Block Diagram

조미동기구는 조동과 미동을 동시에 제어되도록 하고 미동기구의 스트로크가 $\pm 5\mu\text{m}$ 로 매우 작으므로 연동동작중에 미동기구의 변위가 스트로크를 넘지 않도록 주의하여 설계하고 본 기구는 2개의 구동앰프에 제어 동작을 입력하여 목표치인 1개의 출력시스템으로 생각하고 실험하였다. 이 제어계의 상태 방정식과 출력식을 보면 다음과 같다.

$$\dot{x}_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} x_s + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ b_{21} & 0 \\ b_{31} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{62} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_p \\ v_m \end{bmatrix}$$

$$x_s = [x \ \dot{x} \ v \ x_c \ \dot{x}_c \ i_m]^T$$

$$\dot{y} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} x_S$$

$$y = [1 \ 0] \dot{y}$$

$$a_{21} = -\frac{k_P}{m}$$

$$a_{22} = -\frac{C_P}{m}$$

$$a_{23} = \frac{k_P K_P}{m} - \frac{c_P K_P}{RCm}$$

$$a_{24} = \frac{K_P}{m}$$

$$a_{25} = \frac{c_P}{m}$$

$$a_{33} = -\frac{1}{RC}$$

$$a_{55} = \frac{-c_S}{J + k^2 M}$$

$$a_{56} = \frac{K K^2}{J + K^2 M}$$

$$a_{65} = -\frac{K_1}{L_m K}$$

$$a_{66} = -\frac{R_m}{L_m}$$

$$b_{21} = \frac{c_P G_P K_P}{RCm}$$

$$b_{31} = \frac{G_P}{RC}$$

$$b_{62} = \frac{G_m}{L_m}$$

4. 조미동 위치결정 실험 및 고찰

다음은 PID제어의 Step입력에 대한 여러 가지 변화에 따른 응답선도이다.

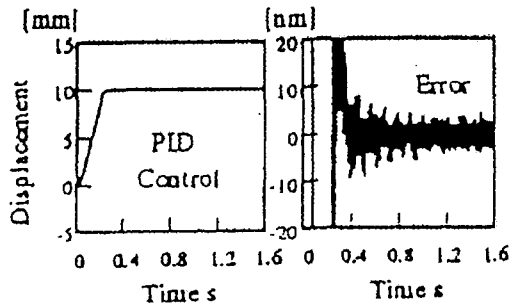


Fig.5 The comparison of control system 10mm step input

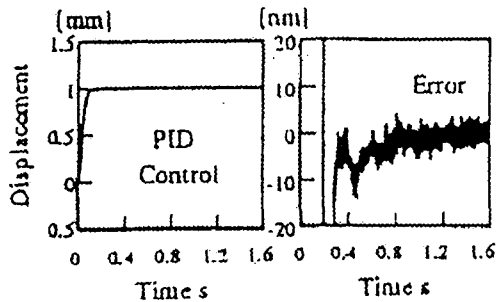


Fig.6 The comparison of control system 1mm

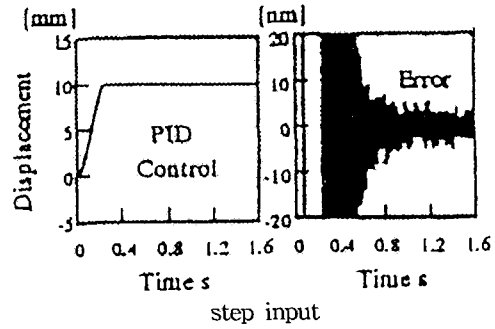


Fig.7 The comparison of control system 10mm step input + double mass

Fig.5는 10mm Step 입력에 대한 응답을 나타낸 것이고, Fig.6은 참고입력의 변위값이 1mm로 변환되는 경우에 응답선도이다. Fig.7은 table의 질량이 2배가 되는 경우에 나타나는 응답선도이다.

Fig.5 에서 본바와 같이 10mm Step 입력에 대한 응답은 에러가 10nm보다 적다는 것을 알 수 있다. 컨트롤시스템은 마찰과 같은 비선형 요소를 포함하고 있기 때문에 시스템의 효율을 평가한다는 것은 매우 중요한 일이다. Fig.6은 참고입력의 변위값이 1mm로 변환되는 경우를 나타낸다. 이것도 역시 만족할만한 오차이다. 그리고 Fig.7은 질량이 2배가 된 경우의 응답선도를 나타낸 것이다. 처음에 진동이 있지만 점점 안정되어 가는 것을 볼 수가 있다.

위의 3가지 응답선도를 볼 때 모두 어느 정도 만족할만한 값들이 나온 것을 알 수 있다.

제어기의 성능을 알아 본 결과 본 기구에 충분히 만족한다는 것을 확인하고 본 기구가 어느 정도의 분해능을 낼 수 있는지를 알아보았다.

Fig. 3의 조미동 위치 결정기구를 구성하여 고정밀 위치결정을 실시하였다. 미동테이블을 미소 변위로 위치결정을 시킬 때 미동테이블 위치를 위치 피드백센서인 레이저 간섭 변위측정기를 이용해 변위를 측정한다. 동시에 조동테이블에 대한 미동테이블의 상대변위를 측정하기 위해 2개의 정전용량센서를 이용하여 측정하였다.

Fig.8에 미동기구를 구동시켜 2종류의 센서로 동시에 측정한 결과이다. 두 측정치가 일치하고

있음을 알 수 있다. 조동미동의 제어는 디지털 신호 처리 시스템에 의해 실시하고 동작명령은 AT&T사의 DSP용 C언어와 MS-C를 병용하여 제어 프로그램을 구성하고 DSP에 의해 위치 결정제어를 실시하였다.

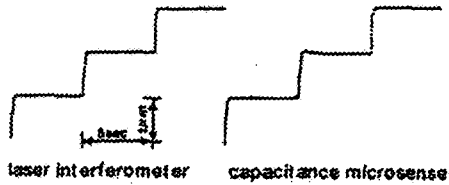


Fig.8 Step Response Measured by Laser Interferometer and Capacitance Microsense

Fig.9는 DC서보 모터와 압전소자에 의해 구동되는 조미동기구를 1 μ m스텝으로 큰 스트로크의 위치결정을 실시하여 레이저 측정기에 의해 측정된 결과의 일부분이다.

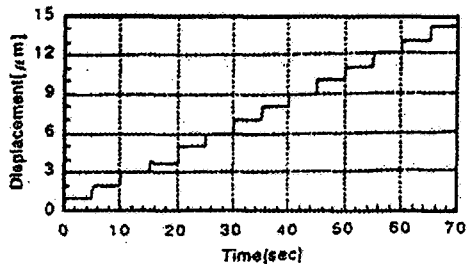


Fig.9 Long Stroke Positioning of 1 μ m Step for Dual Positioning

Fig.10은 1 μ m스텝으로 위치결정을 실시하여 레이저측장기와 정전용량센서에 의해 측정된 결과이다. 각각의 스텝을 5초의 장시간 동안 유지하도록 하였다. 변위는 제약이 있지만 압전소자 단독으로는 미동테이블을 큰 스트로크로 위치결정이 곤란하지만 리드 스크류에 의해 구동되는 조동기구를 결합한 연동제어를 함으로서 대 스트로크 위치결정이 가능하였다.

Fig.11은 조미동 연동제어를 실시할 때의 미동기구의 변위 특성을 압전소자에 인가되는 전압이

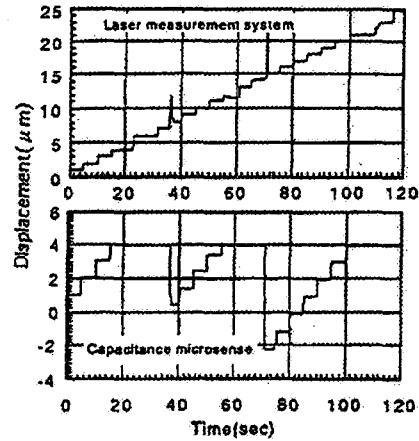


Fig.10 Control of the 1 μ m Step Positioning

11V 일 때 전압과 변위의 관계이다. 변위는 약 0.1 μ m/V이다.

조미동기구의 연동제어 실시중의 본 기구의 응답특성은 Fig.12와 같으며 이는 연동제어시의 최소위치분해능이 9nm임을 알 수 있다. 본 기구의 제어에서는 조동 미동의 연동에 있어서 미동 명령을 DC서보 모터와 PEA에 동시에 내려 미동 테이블의 위치 결정이 가능하였다.

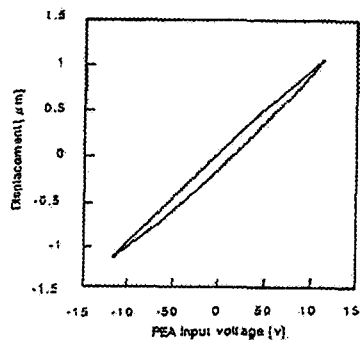


Fig.11 Characteristic of Fine Apparatus (11V)

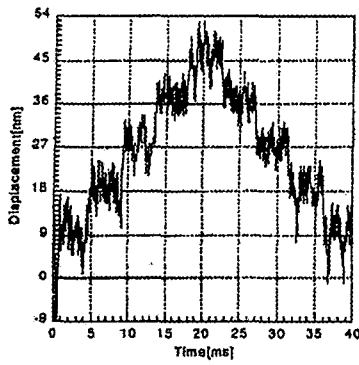


Fig.12 Resolution for Dual Positioning

5. 결론

DC서보 모터와 압전소자에 의해 구동되는 조동미동기구를 구성하고 2입력에 있어서 1출력의 미동위치 결정시험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1)본 기구에 있어 조동 미동기구의 연동제어에 의한 1출력의 이동위치 결정을 할 수가 있었다.
- (2)PID제어기의 성능은 본 기구에 충분히 만족하였다.
- (3)조미동기구에 있어서 9nm,의 위치결정 분해능을 얻을 수 있으며 대 스트로크의 위치결정이 가능하였다.

후 기

본 발표 논문은 1998년 과학기술부지원 국제공동연구의 일환으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. Mori Yama, "Precision Machine 50", 4, p.718, 1984.
2. Kouno. E., Ann, "CIRP", 33, 1, p.369, 1984.
3. Patterson, S. R. and Margrab, E. B., "PRECIS. ENG", 7, 3, p.123, 1985.
4. Shimizu. H., "Proc, China-Jpn Symp. Mechatron", p.58, 1988.
5. S. Yzmazaki, S. Nakayama, S. Ishihara and S.

- Sasayama, "High Accuracy X-ray Lithography System", Bull JSPE, 14, 3, p.137, 1980.
6. T. M. Lyszczarz, D. C. Flanders, N. P. Economou and P. D. DeGraff, "Experiment Techniquess for Multiple Mask Registration", J. Vac. Sci. Technol., 19, 4, p.1214, 1986.
7. H. Shimizu, Y. Takeuchi, H. Inada and T. Sata, "A Basic Study on the Development of a Highly Accurate Rotation Positioning Actuator", JSPE, 88, 9, p.1641, 1989.
8. H. Ozisik and R. F. Keltie, "Development and Implementation of a High Speed Loop Control Technique for Micro-Positioning of Mechanical Structures", JSPE, 58, 4, p.225, 1989.
9. 김재열, "PZT Actuator를 이용한 6자유도 미동기구의 제적 특성에 관한 연구" 대한기계학회 학술강연회, p.21-28, 1992.
10. 김재열, 오환교, "6자유도 미동기구의 제어특성에 관한 연구", 조선대학교 생산기술연구소, Vol.14, No.2, p.125-132, 1992.
11. 이창우, "이중서보를 이용한 초정밀 X-Y 테이블 평면 3자유도 위치제어" 박사학위 논문, 한국과학기술원, p.4~5, 1997