

## 입력주파수 변화특성을 고려한 압전구동기의 정밀위치제어

### Precise Position Control of Piezoelectric Actuators Considering Input Frequency Variance

°송재욱\*, 김호상\*, 송하성\*, 이효정\*

\*고등기술연구원 생산기술연구실(Tel:0331-30-7322)

Abstracts Piezoelectric actuator is widely used in precision positioning applications due to its excellent positioning resolution. However, serious hysteresis nonlinearity of the actuator deteriorates its precise positioning capability. Evenworse, its hysteresis nonlinearity changes as the actuator input frequency varies. In this study, a simple feedforward scheme is proposed and tested through experiments for precision position control when the variance of the system input frequency is significant.

Keywords Piezoelectric actuator, Hysteresis modeling, Precision control, Feedforward

#### 1. 서론

압전구동기는 서브미크론 이하의 분해능을 가져 정밀위치제어 시스템에 많이 사용되고 있다. 그러나 압전구동기의 전기적 특성으로 인해 심한 비선형 특성을 가져 서브미크론급의 정밀위치제어에 적용하기 위해서는 정확한 비선형 히스테레시스 모델을 Feedforward 방식으로 적용할 필요가 있다. 그러나 기존 압전구동기 모델링 기법들은 비선형 특성이 입력전압의 주파수에 따라 변화하는 것을 고려치 않고 일정하다고 가정하였다. 따라서 입력전압의 주파수 변화가 크거나 입력 주파수 성분을 모를 때 기존 모델링 방법을 Feedforward 방식으로 적용하면 위치오차가 커진다. 이 문제를 해결하기 위해서는 입력주파수별로 비선형 모델을 마련하거나 입력주파수와 비선형성의 관계를 파악하여 모델링을 해야한다. 그러나 입력의 주파수 성분을 실시간으로 측정하여 알지 못하면 앞의 비선형 모델을 적용치 못하고 결과적으로 실시간 위치 제어가 불가능하다.

S. Jung and S. Kim<sup>(1,3)</sup>이 사용한 모델은 주어진 입력전압에 대해 변위량을 예측하는 Forward 방식으로 히스테레시스 모델을 제어 시스템에 적용하기 위해서는 원하는 변위량이 주어지면 이에 해당하는 입력전압을 예측하는 Inverse기법이 필요하다. 따라서 역함수( $H^{-1}$ : Inverse function)를 아래 식과 같이 과거의 제어 입력신호중 부호가 반전된 반전점  $R = (V_R, X_R)$ , 현재의 변위  $(X_E)$ , 변위 제어신호의 증감방향  $sign(\dot{X}_E)$ 의 함수로 나타내면 주어진 변위에 대한 전압을 예측할 수 있다.

$$V = H^{-1}(X_E, R, sign(\dot{X}_E))$$

S. Jung의 방법은 모든 Minor loop의 행태를 하나의 정규화된 함수로 간결하게 표현하므로 실시간 적용이 가능하나 입력주파수에 따라 히스테레시스 루프의 형태가 예측한 양상을 보이지 않을 경우 예측오차가 증가하므로 이 기법을 입력주파수에 따라 비선형특성 변화가 큰 경우에는 적용하기에 무리가 있다. S. Jung은 이 문제를 하드웨어로 압전구동기의 비선형 특성을 억제하여 해결하였다. P. Ge<sup>(2)</sup>의 방법도 전압에 대한 변위량을 예측하는 모델을 Preisach model기법과 Look-up table 방식으로 구현하였다. 이 기법도 입력주파수 변화에 따른 압전구동기의 비선형 특성

변화를 모델에 반영할 수 없을 뿐 아니라 역함수를 구할 수 없는 기법으로 실시간 적용이 불가능하다. 따라서 이 기법은 Off-line으로만 적용이 가능하고 또한 입력신호도 Preisach model의 기본가정을 만족하는 일정한 크기의 변위를 갖는 정현파 혹은 삼각파 신호만 추종가능하므로 실용성이 떨어진다.

본 논문에서는 첫번째로 입력주파수 변화가 고려안된 경우에 대해 S. Jung의 기법을 이용한 Inverse modeling 방법을 입력주파수의 변화가 심한 시스템에 Feedforward 방식으로 적용하고 두번째로 S. Jung의 기법을 보완하여 입력주파수 변화가 커도 정밀위치제어가 가능토록 고안된 Feedforward기법을 첫번째와 동일한 입력조건으로 적용하여 두 경우의 실험결과를 비교검토한다.

#### 2. 제어 시스템 구성 및 히스테리시스 특성시험

제어대상 시스템은 그림 1에 도시한 것과 같이 압전구동기를 이용하여 diamond tool의 위치를 정밀제어하는 공구대로서 100 Hz까지의 가공입력지령을 서브미크론 수준으로 추종하여야 한다. 이 시스템의 히스테레시스 특성은 공구대의 기계적 특성보다는 압전구동기와 구동앰프의 전기적 특성에 크게 좌우된다. 제어 시스템의 주요 구성요소는 압전구동기, 변위센서, amplifier등으로 상세사양을 표 1에 설명하였다. 공구대의 정밀위치제어를 위해서는 압전구동기를 포함한 구동시스템의 히스테레시스 특성과 압전구동기가 조립된 공구대의 기계적 동특성을 함께 고려하여야 하므로 그림 1과 같이 압전구동기가 공구대에 조립된 상태에서 입력전압에 대한 출력변위의 히스테레시스 특성시험을 수행하였다.

입력주파수 변화에 따른 히스테레시스의 형태변화를 관찰하고 또한 히스테레시스 루프의 친이현상(drift)을 파악하기 위해 1Hz 와 100Hz 사인파를 10분간 500V 진폭(500V 윽셋)으로 고전압 증폭기에 입력하였고 각 주파수별로 10분간 4회(0분, 4분, 8분, 10분)동안 4 cycle/회의 데이터를 수집하였다. 실험결과, 히스테레시스 루프의 형태는 입력전압의 주파수에 따라 큰 변화가 발생하였다. 그림 2 a), b)에서 입력 주파수가 높아질수록 히스테레시스의 대역폭이 커지고 히스테리시스 모양이 타원형으로 변화하는 것을 알 수 있다. 특히 Minor loop의 행태는 더욱 큰 차이를 보여준다. 1Hz 입력시 1차 반전곡선이 Major loop을 따라다가 반

전되는 양상을 보이거나(그림 2-a) 100Hz에서는 1차 반전곡선이 Major loop과 분리되어 Major loop과 닫은꼴의 loop이 형성된다(그림 2-b). 또한 히스테레시스 루프가 동일 입력조건시에도 시간에 따라 변위축 방향으로만 천이하는 현상을 보이며 이러한 Drift 현상은 주로 압전구동기의 온도팽창에 기인한다고 추정할 수 있다<sup>(2)</sup>.

실험결과를 종합하면 입력 주파수에 따라 히스테레시스 형상이 크게 변화하므로 개회로 제어나 Feedforward 제어시에 입력주파수 변화특성을 고려하여야 정확한 위치제어가 가능함을 알 수 있다. 또한 Drift 현상은 압전구동기의 온도팽창이 주요 원인이므로 이를 극복하기 위해서는 압전구동기가 열평형상태에 이른 후 히스테레시스 모델링을 하고 개회로제어를 하여야 한다.

표 1. 제어시스템의 주요 구성요소 사양

장비	사양
	PI(Physik Instrumente)
제품명	P-245.23
최대	20 $\mu\text{m}(\pm 10 \%) @ 0$
압전 구동기	변위량
	->1000 V
	정전용량
	100 nF ( $\pm 20 \%$ )
	온도팽창
	0.45 $\mu\text{m}/\text{K}$
	계수
	PI E-120 signal processing module
고전압 증폭기	제품명
	출력범위
	0 - 1000 V,
	대역폭
	1.5 KHz
	제품명
	PI capacitive sensor
	D-050.00
변위센서	입력범위
	50 $\mu\text{m}$
	출력범위
	0 - 10 V, $\pm 5\text{V}$

### 3. 입력주파수 변화를 무시한 개회로 위치제어

S. Jung이 제안한 기법을 1Hz 사인파로 13.6 $\mu\text{m}$ 과 6.8 $\mu\text{m}$  변위 신호를 제어시스템에 가하여 Major loop과 Minor loop에 대한 역이력모델(Inverse hysteresis model)을 구하였다. 첫번째로 Major loop에 대해 3차 Least square fitting 방법으로 역함수를 아래와 같이 구하였다.

$$V_f = -6.2810 \cdot 10^{-2} X^3 - 2.3865 \cdot 10^0 X^2 + 9.4902 \cdot 10^1 X - 8.9278 \cdot 10^1 \quad (1)$$

$$V_r = 6.2996 \cdot 10^{-2} X^3 + 6.7222 \cdot 10^{-1} X^2 + 4.7817 \cdot 10^1 X - 6.4298 \cdot 10^1 \quad (2)$$

윗 식에서  $X$ 는 변위량( $\mu\text{m}$ ),  $V_f$ 는 상승시 전압[V],  $V_r$ 은 하강시 전압[V]이다. 상승시의 변위량은 식(1), 하강시의 변위량은 식(2)를 사용한다. 두번째로 Minor loop에 대해 상승시에는 식(3), 하강시에는 식(4)를 사용한다.

$$V_{mf} = V_f + \Delta H_R \cdot h_f$$

$$h_f = -3.1902 \cdot 10^{-1} X_n^3 - 1.5552 \cdot X_n^2 - 2.2351 \cdot X_n - 1.0376 \quad (3)$$

$$X_n = \frac{X - X_R}{X_{\max} - X_R}$$

여기서,  $V_{mf}$ 는 상승시의 전압[V],  $\Delta H_R$ 은 반전점의 상승곡선과의 편차량,  $X_R$ 은 반전점에서의 입력변위,  $X_{\max}$ 는 히스테레시스 loop의 최대변위 그리고  $X_n$ 은 normalized displacement를 나

타낸다.

$$V_{mr} = V_r - \Delta V_R \cdot h_r$$

$$h_r = -1.1611 \cdot 10^{-1} X_n^3 + 1.1393 \cdot X_n^2 - 1.1911 \cdot X_n + 1.0196 \quad (4)$$

$$X_n = \frac{X_R - V}{X_R - X_{\min}}$$

여기서,  $V_{mr}$ 은 하강시의 전압[V],  $\Delta H_R$ 은 반전점의 하강곡선과의 편차량을 나타낸다.

10 $\mu\text{m}$  변위의 1Hz sine파를 공구대 제어시스템에 입력하고 개회로제어만 한 경우와 역이력 모델을 적용한 경우에 대해 제어 시험을 수행하여 시험결과를 그림 3에 도시하였다. 역이력모델을 적용한 경우 peak-to-peak 오차가 0.27 $\mu\text{m}$ 으로 개회로제어만 한 경우의 peak-to-peak 오차 1.24 $\mu\text{m}$  보다 4.5배 정밀도가 향상되어 1Hz에서 작성된 역이력모델이 상당히 정확함을 알 수 있다. 그림 3에서 개회로제어만 적용한 경우의 오차곡선이 찌그러진 현상은 1Hz 히스테레시스 루프가 상승시와 하강시 비대칭한 것에 기인한다.

이 역이력모델을 10, 50, 100Hz 입력신호에 대해 Feedforward 방식으로 제어시스템에 적용하여 위치제어시험을 수행하고 입력주파수의 변화가 큰 경우에 저주파 입력에 대해 작성된 모델의 위치제어 성능을 평가하였다. 이 시험결과는 4장에서 입력주파수 변화를 고려한 모델을 적용한 개회로제어 결과와 같이 자세히 논의한다.

### 4. 입력주파수 변화를 고려한 개회로 위치제어

저주파 입력에 대해 작성된 히스테레시스 모델이 3장의 실험결과와 같이 입력주파수가 증가할수록 위치오차가 커지므로 더 정밀한 위치제어를 위해서는 입력주파수 변화를 고려한 모델링 기법이 필요하다. 입력주파수 변화를 고려한 모델링기법은 입력주파수가 직접적으로 모델링 인자로 반영되거나 제어기법에 반영되면 실용성이 떨어지므로 간접적으로 반영되어야 하고 실시간 제어가 용이하도록 계산량이 작아야 한다. 2장의 히스테레시스 특성시험에서 확인된 바 같이 입력주파수가 증가할 수록 히스테레시스 형태가 변하는 것은 강유전성(Ferroelectric)을 띤 압전구동기의 재질이 외부에서 가해진 전기장예외해 도메인 변화(domain switching)가 일어날때 반응의 지연이 있기 때문이다<sup>(2)</sup>. 따라서 입력 주파수가 커질수록 도메인 변화의 지연시간이 커지고 결과적으로 히스테레시스 루프의 폭이 커지고 둥근 타원형태를 띠게 된다. 그러므로 압전구동기의 전기적 특성으로 인한 지연시간을 보정하여 저주파입력에 대해 작성된 역이력모델에 적용하면 고주파 입력경우에도 위치제어 성능을 향상시킬 수 있다.

이를 위해 그림 1의 제어시스템에 개회로 상태에서 10, 50, 100 Hz 사인입력을 가하여 1Hz 역이력모델을 Feedforward로 적용한 경우에 대해 각각 히스테레시스 루프를 얻고 이로부터 입력과 출력의 위상각 차이를 구한후 이 차이를 보상하는 위상보상기를 설계하였다. 설계된 보상기는 Lead보상기로 S평면의 전달함수는  $(1+S/2000)/(1+S/20000)$ 이며 0.1msec(10KHz)의 sampling 시간으로 Tustin 변환기법을 적용하면  $(5.5Z - 4.5)/Z$ 의 Z평면 전달함수를 얻으며 주파수 응답특성은 그림 4에 도시하였다. 제어시스템에 1)개회로제어만 한 경우, 2)역이력모델을 적용한 경우, 3)역이력 모델과 Lead보상기를 같이 적용한 경우에 대해 10 $\mu\text{m}$ 의 입력변위를 10, 50, 100Hz로 가하여 히스테레시스 현상을 관찰하고 그림 5-7에 도시하였다. 1)의 경우 히스테레시스 형상은 입력주파수의 증가에 따라 대역폭이 크게 커진다. 2)의 경우는 10Hz시에서의 선형특성을 보이거나 50, 100Hz 입력에 대해서는 총변위량에

대해 각각 13%, 29%의 대역폭을 지닌 히스테리시스를 나타낸다. 이에 반해 3)의 경우는 대역폭이 최대 3%정도만 발생하여 Lead보상기가 효과적으로 위상지연을 보상하는 것을 알 수 있다. 1), 2), 3)경우의 추종성능을 히스테리시스 특성시험과 동일한 입력 조건으로 시험하여 그림 8-10에 나타내었다. 10Hz경우에 2)와 3)의 peak to peak 오차가 각각 0.54 $\mu$ m, 0.48 $\mu$ m로 오차성능은 거의 차이가 없으나 한주기동안의 평균오차는 3)의 경우가 훨씬 작은 결과를 나타낸다. 50Hz입력시 2)경우는 peak to peak 오차가 1.48 $\mu$ m으로 10Hz시보다 거의 274% 증가하여 1Hz 역이력모델의 예측성능이 현저히 저하되는 것을 보여주는 반면 3)의 경우는 peak to peak 오차가 0.63 $\mu$ m로 31%만 증가하여 Lead보상기가 효과적으로 위상지연을 보상함을 알 수 있다. 100Hz 입력시에는 2)의 peak to peak 오차가 2.87 $\mu$ m로 50Hz경우보다 194% 증가하는 반면 3)의 경우는 peak to peak 오차가 0.56 $\mu$ m으로 약간 감소하는 현상을 보였다. 3)경우는 2)경우에 비해 각각 11%, 57%, 81%의 오차개선을 보여 입력주파수가 증가할수록 Lead보상기의 위상보정 효과가 큰 것을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 입력주파수 변화가 큰 압전구동기를 이용한 공구대의 diamond tool 위치제어시스템을 개회로제어로 서브미크론 수준의 위치제어가 가능토록 간단한 Feedforward 제어기법을 제시하였다. 이 기법은 저주파입력에 대해 작성된 역이력모델에 간단한 Lead보상기를 추가한 것으로 고주파 입력에 대해서도 우수한 제어성능을 가짐을 제어시험을 통해 확인하였다.

### 참고문헌

- [1] S. Jung and S. Kim, "Improvement of scanning accuracy of PZT piezoelectric actuators by feedforward model-reference control," *Precision Eng.*, vol.16, no.1, pp. 49 ~ 55, 1994.
- [2] P. Ge and M. Jouaneh, "Modeling hysteresis in piezoceramic actuators," *Precision Eng.*, vol.17, pp. 211 ~ 221, 1995.
- [3] 정승배, 박준호, 김승우, "주사터널링현미경을 위한 압전구동기의 비선형 모델링", 대한기계학회논문집, 제 18권, 제 9호, pp. 2272 ~ 2283, 1994.

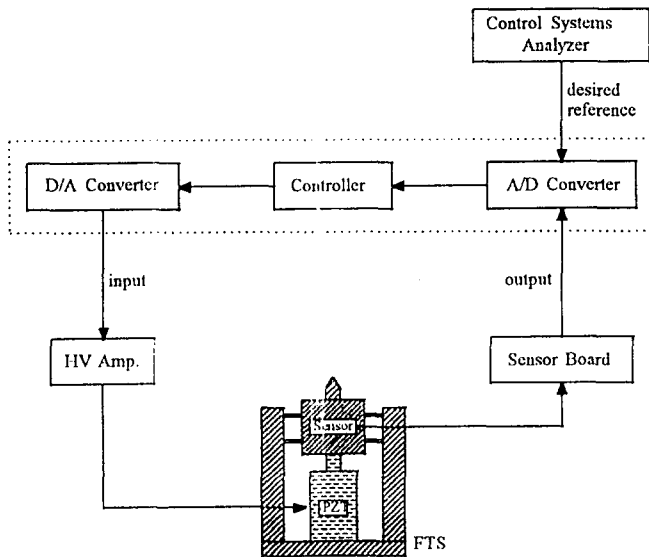
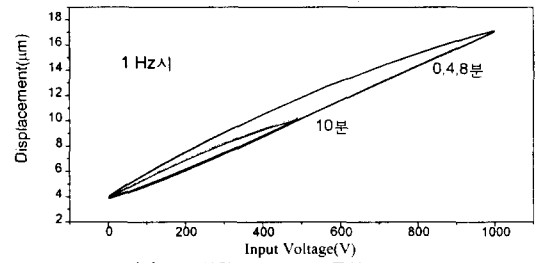
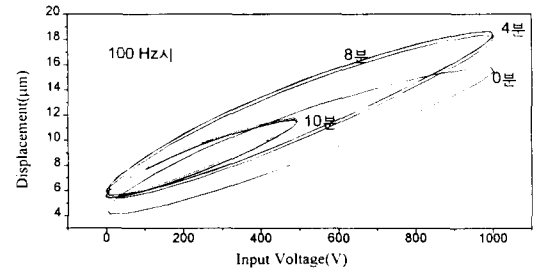


그림.1 제어시스템 구성도



(a) 1 Hz시의 Hysteresis 특성



(b) 100 Hz시의 Hysteresis 특성

그림.2 제어시스템 Hysteresis 특성

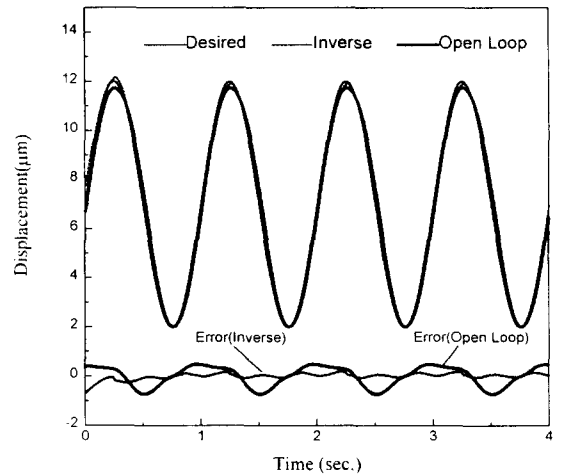


그림.3 1Hz 사인입력시 추종오차

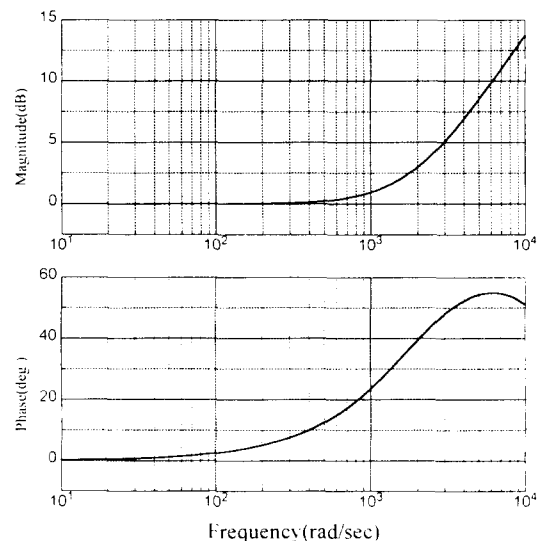


그림.4 Lead보상기의 주파수 응답특성

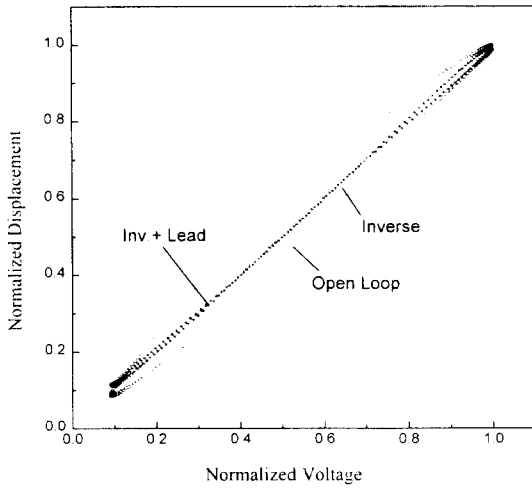


그림.5 10Hz 사인입력의 개회로 제어시 이력현상

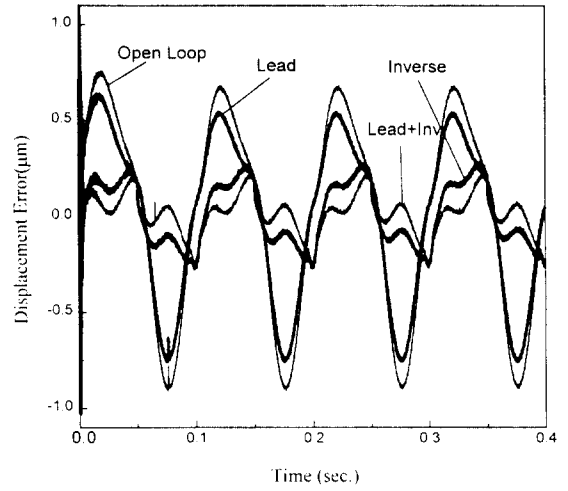


그림.8 10Hz 사인입력의 개회로 제어시 추종오차

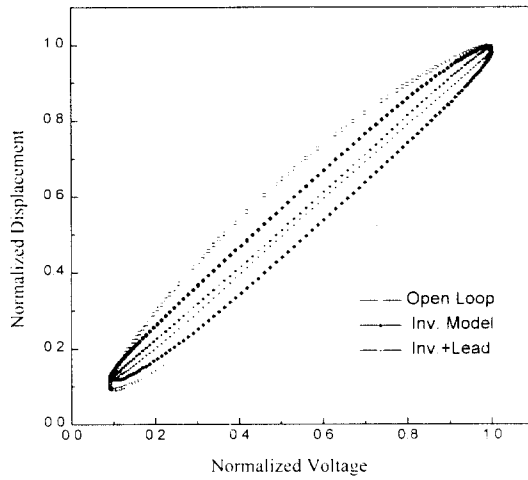


그림.6 50Hz 사인입력의 개회로 제어시 이력현상

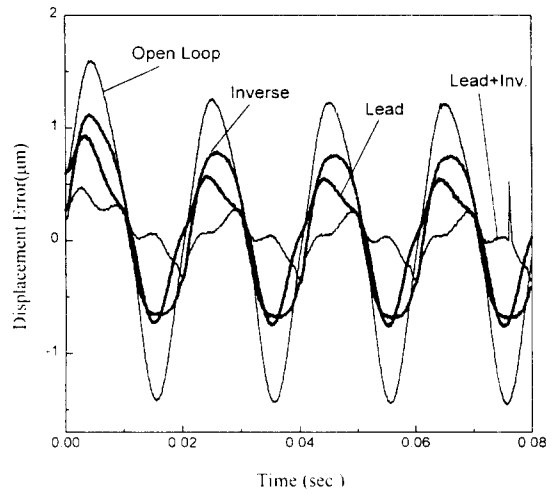


그림.9 50Hz 사인입력의 개회로제어시 추종오차

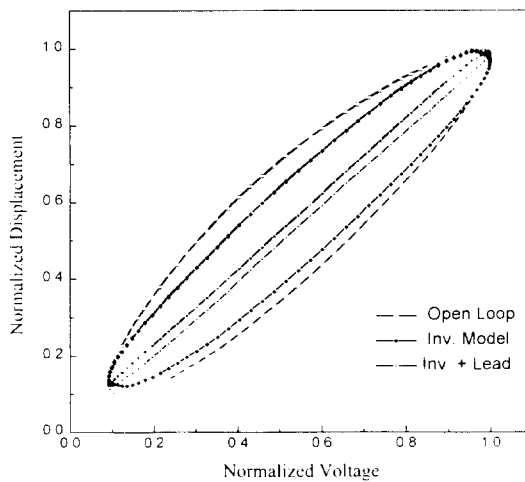


그림.7 100Hz 사인입력의 개회로 제어시 이력현상

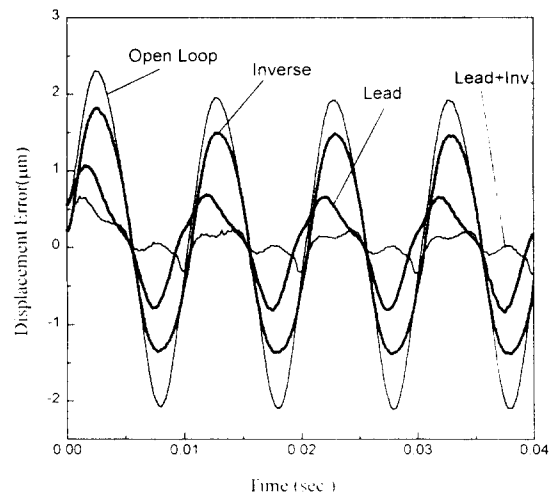


그림.10 100Hz 사인입력시 개회로제어시 추종오차