

〈論 文〉

주사터널링현미경을 위한 압전구동기의 비선형 모델링

정승배* · 박준호* · 김승우**

(1994년 1월 11일 접수)

Nonlinear Modeling of Piezoelectric Actuators for Scanning Tunneling Microscopy

Seung-Bae Jung, June-Ho Park and Seung-Woo Kim

Key Words : Stacked-Type Piezoelectric Actuators(적층형 구동기), Nonlinear Modeling(비선형 모델), Hysteresis(이력현상), Scanning Tunneling Microscopy(주사터널링현미경)

Abstract

In scanning tunneling microscopy, the piezoelectric actuator is popularly used in stacked type as it can provide remarkable positioning resolution and stiffness. The actuator, however, exhibits a considerable amount of hystereic nonlinearity, resulting in losses of overall measuring accuracy when a linear model is used for its control and calibration. In this study, a nonlinear model is proposed for predicting the precise relationship between the input command voltage and the output displacement of the actuator itself, cross-coupled electrical behaviors of the driving circuit with the actuator, and mechanical characteristics of the driven components of the actuator. Finally experimental results prove that the nonlinear model enhances the measuring of scanning tunneling microscopy by an order ten in comparison with a conventional linear model.

1. 서 론

압전구동기는 마이크로 이하에서 옴스트롱에 이르는 분해능을 쉽게 얻을 수 있는 장점⁽¹⁻³⁾을 갖고 있는 주사터널링현미경에서 미세구동을 위해 일반적으로 사용되고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 주사터널링현미경은 주사 중에 각 축에 입력된 전압을 샘플링하여 형상정보를 산출하게 되므로 정밀한 측정을 위해서는 구동기의 정확한 구동모델이 요구된다. 현재 압전구동기의 구동모델은 식(1)의 선형모델이 사용되고,⁽⁴⁾

$$U_z = \frac{K_p}{M_{es}^2 - D_{es} - K_e} V_E \quad (1)$$

입력된 전압으로부터 형상정보의 산출은 입력전압

V_E 와 정상상태의 변위 U_{z-ss} 와의 관계식, 즉 식(2)를 이용하고 있다.

$$U_{z-ss} = \frac{K_p}{K_e} V_E \quad (2)$$

여기서, K_p 는 단위전압당 힘비례상수, M_e 는 압전구동기의 등가질량, D_e 는 압전구동기의 등가댐핑계수, K_e 는 압전구동기의 등가탄성계수이다. 식(1)은 구동기와 구동전원의 전기적 특성은 무시하고, 구동기의 기계적 특성만을 선형으로 고려한 모델이다. 압전구동기는 구동기의 종류에 따라 전체 구동범위의 2~20% 정도 비선형특성을 갖고 있어⁽⁸⁾ 식(1)은 모델오차를 갖게 된다. 따라서 주사터널링현미경에서 마이크로 크기의 형상을 측정할 경우에 구동기의 모델오차가 그대로 측정오차로 반영되게 된다.

주사터널링현미경에서 정밀한 측정을 위해서는

*정회원, 대성산업 주 중앙연구소

**정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

압전구동기의 정확한 비선형모델이 요구되므로 본 연구에서는 압전구동기의 정확한 모델정립에 관한 연구를 진행하였다. 구동기는 마이크로 크기의 형상추정을 위해 사용되는 적층형 구동기(stacked piezoelectric actuator)를 대상으로 하고, 이에 대한 모델은 압전이론, 구동전원의 전기적 특성, 기계적 비선형 특성을 고려하여 제시하였다. 실제 응용시스템에 적용가능하도록 모델을 간략화하였으며, 비선형변수를 실험적인 방법으로 결정하여 비선형성을 모델에 반영하였다. 제시된 모델에 대한 타당성은 실험을 통해 검증되고, 또한 실제 주사터널링현미경에 적용하여 측정된 현상을 비교함으로써 검토되었다.

2. 주사터널링현미경의 일반적 구동시스템

주사터널링현미경은 두 도체가 격리되어 있음에도

불구하고 절연층의 두께가 충분히 얇을 경우 전류가 흐르는 터널링효과^(9,10)를 이용한 3차원 형상측정 장비이다. 터널링효과를 이용한 표면측정은 Fig. 1에 보인 바와 같이 세 개의 미세구동기와 미세한 반경을 갖는 탐침을 이용한다. 탐침과 측정시편사이에 일정 전압을 인가한 후 X와 Y축의 미세구동기를 작동하여 탐침으로 하여금 측정표면상을 비점측으로 주사(scanning)되도록 제어한다. 이와 동시에 Z축의 미세구동기는 PI제어기를 통해 터널링전류가 항상 일정하게 유지되도록 탐침의 수직방향의 위치를 변화시키면서 탐침과 측정시편사이의 거리를 비점측 상태에서 항상 일정하게 유지하게 한다. 결과적으로 측정표면의 삼차원 현상은 세 미세구동기에 입력된 전압으로부터 이에 대응되는 변위를 역으로 환산하여 추출하게 된다. 이러한 측정원리는 구동기의 구동모델이 측정정밀도와 바로 연관된다.

본 연구에서 사용되는 주사터널링현미경은 넓은

Table 1 Characteristics of the piezoelectric actuators used in experiments

Type	NLA (10×10×18)	NLA (5×5×9)
Sensitivity	15 μm/100 V	6.5 μm/100 V
Maximum voltage	150 V	150 V
Frequency response	50KHz	100KHz
Capacitance	6.5 μF	0.65 μF

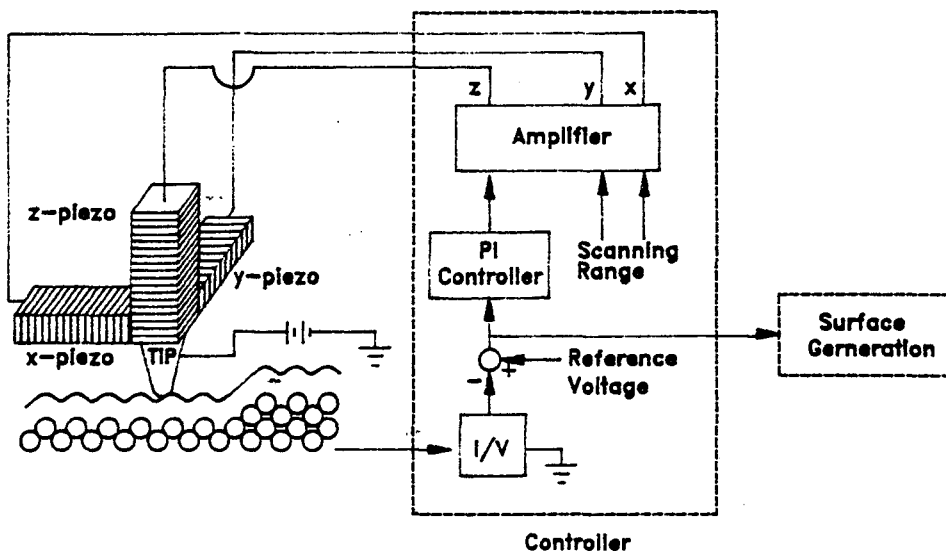


Fig. 1 Measurement principle of scanning tunneling microscopy

영역을 측정하기 위해 구동범위가 큰 적층형 구동기(Tokin, NLA10×18×18, NLA5×5×9)가 사용되었다. 이 구동기의 주요 사양은 Table 1과 같다. 고전압증폭기는 적층형구동기를 전압구동할 때, 급격한 입력변화에 대한 부하변화에 대응하기 위해서 출력단에 출력저항 R_o 를 갖는다. 이것은 압전구동기와 직렬로 연결되어 구동시스템의 전기적 동특성이 서로 연성(couple)되게 된다.

3. 압전구동기의 일반적 비선형모델

압전선형이론⁽¹¹⁾만으로 유도되는 압전구동기의 등가구동모델은 입력전압 V_E 와 외부부하 F_1 에 대해 Fig. 2과 같이 유도된다. 그림에서 K_p 는 단위전압당 발생하는 힘상수, M_e , D_e , K_e 는 등가질량, 댐핑계수, 탄성계수를 나타낸다. 그림은 F_1 의 부하가 구동기에 작용될 때, 실제 구동기에 인가되는 힘은 외부부하에 의해서 발생된 전하가 힘으로 작용함을 보여주고 있다. 즉, 압전효과에 의한 출력이 기계적 변형에 영향을 미치고 있음을 보여주는 것이다. 압전효과에 의한 영향은 F_1 에 대한 α 의 비로서 발생하는 데 이는 압전재료의 선형관계식으로부터 유전상수 ϵ_{33} , 압전 d 상수 d_{33} , 강성계수 C_{33} 로서 다음 식과 같이 계산되어진다.

$$\alpha = \frac{d_{33}^2 C_{33}^p}{\epsilon_{33}} = \frac{K_p^2}{K_e C_o} \quad (3)$$

$$K_e = \frac{C_{33}^p A}{l}$$

$$K_p = \frac{C_{33}^p d_{33} A}{l}$$

$$C_o = \frac{\epsilon_{33} A}{l} \quad (4)$$

여기서, K_e , K_p , C_o 는 압전재료의 등가탄성계수, 입력전압에 대한 비례힘상수와 정전용량을 의미한

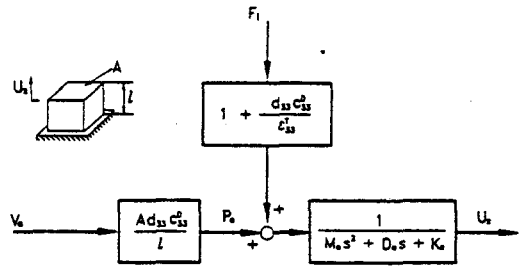


Fig. 2 Linear model of piezoelectric actuator by piezoelectricity

다. 이 모델은 선형모델로서 구동기가 갖는 특성을 정확히 반영하지 못하고 있으므로, 본 연구에서는 Fig. 2의 모델에 구동전원의 전기적 특성과 압전재료의 비선형특성을 고려하여 구동기의 모델로 Fig. 3과 같은 비선형모델을 나타내었다. 여기서 R_o 는 고전압 증폭기의 출력저항이다. 변수에 (·)이 있는 것은 그 변수가 비선형특성을 갖고 있음을 의미한다. 비선형모델은 단순히 압전선형이론만으로 유도된 것과는 달리 증폭기에서 인가한 전압과 실제 구동기에 입력되는 전압사이에 RC 필터의 동특성이 존재하게 되고, 외부부하에 의해 발생된 압전전압 V_o 의 제환(feedback)이 존재하게 된다. 이 모델은 압전구동기의 전기적 특성과 구동기의 특성에 대한 실험결과에서 근거된다.

Fig. 4는 일반적으로 사용되고 있는 압전구동기의 전기적 특성을 나타내는 등가회로이다.⁽⁹⁾ 이는 저항(resistors), 축전기(capacitors), 전하원(charge source)의 조합으로 구성된다. 점선과 1점쇄선은 유전체 성질과 압전적 성질을 구별한 것이다. R_f , L_f , C_f 가 직렬로 연결된 것은 공진주파수 근처에서의 전기적 성질을, 손실저항 R_1 과 정전용량 C_o 가 병렬로 연결된 것은 공진주파수 아래 영역에서의 전기적 성질을 나타낸다. 구동기는 실

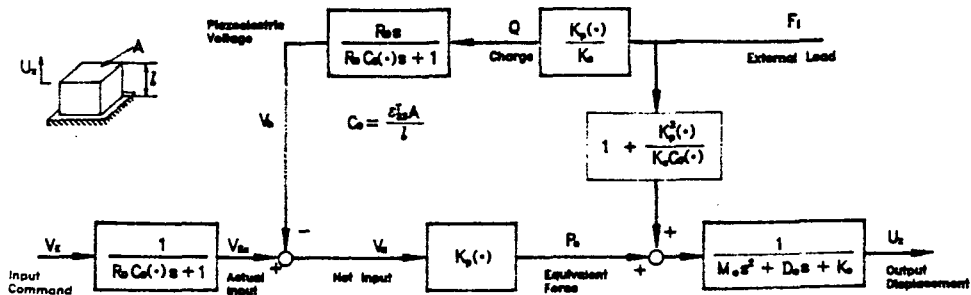
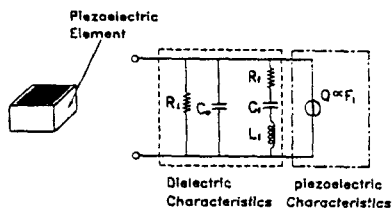
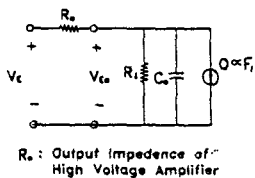


Fig. 3 Nonlinear model of piezoelectric actuator



(a) General equivalent circuit



(b) Simplified equivalent circuit

Fig. 4 Equivalent circuit of piezoelectric actuator

제적으로 공진주파수 아래의 영역에서 사용되므로 Fig. 4(b)와 같은 전기적 등가모델을 사용할 수 있다. 이 경우 출력저항(output impedance) R_o 을 갖고 있는 고전압증폭기가 전압을 인가할 때, 입력전압 $V_E(t)$ 와 구동기에 실제 입력되는 전압 $V_{Ea}(t)$ 은 외부부하가 일정한 조건하에서 식(3), (4)와 같은 동특성을 갖는다.

$$\frac{V_{Ea}}{V_E} = \frac{R_i}{R_i R_o C_o s + R_i + R_o} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{R_o C_o s + 1}, \quad R_i \gg R_o \quad (4)$$

외부부하 F_1 은 탄성변형과 압전효과를 발생시킨다. 압전효과에 의해 발생된 압전전압 V_o 는 $V_E(t)$ 가 일정한 조건하에서 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{V_o}{F_1} = \frac{d_{33} R_o s}{R_o C_o s + 1} = \frac{K_p / K_e R_o s}{R_o C_o s + 1} \quad (5)$$

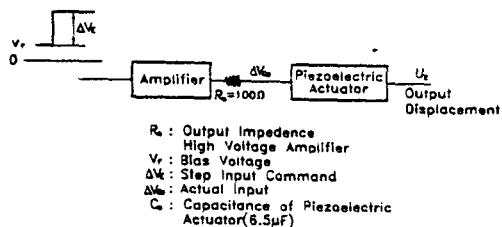
여기서, d_{33} 는 압전상수이다. 전압과 외부부하가 동시에 인가될 경우에 압전재료의 양단에 걸리는 정미전압(net voltage) V_a 는 압전전압(piezoelectric voltage) V_o 와 실제입력전압(actual input voltage), V_{Ea} 의 합이 된다. 즉,

$$V_a = V_{Ea} + V_o \quad (6)$$

V_a 에 의해 압전구동기에 인가되는 등가힘 P_e 는 압전이론으로부터 다음과 같이 계산된다.⁽¹³⁾

$$P_e = \frac{C_{33} d_{33} A}{l} V_a(t) = K_p V_a \quad (7)$$

식 4), 5)는 전기적 동특성에 구동전원의 출력저



R_o : Output Impedance
 High Voltage Amplifier
 V_o : Bias Voltage
 ΔV : Step Input Command
 ΔU_o : Actual Input
 C : Capacitance of Piezoelectric Actuator(6.5μF)

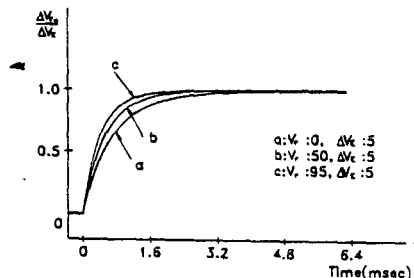


Fig. 5 Actual input response to step input command

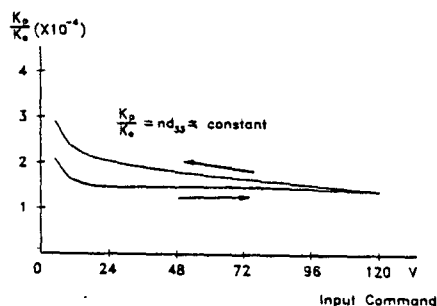
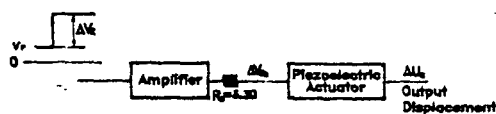


Fig. 6 Variation of equivalent force constant to step input commands



R_o : Output Impedance
 High Voltage Amplifier
 C : Capacitance of Piezoelectric Actuator(6.5μF)
 V_o : Bias Voltage
 ΔV : Step Input Command
 ΔU_o : Actual Input

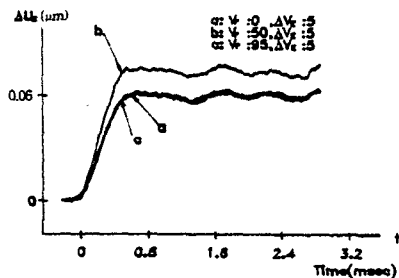


Fig. 7 Output displacement to step input command

항이 포함되어 나타나고 있음을 보여준다. 또한 출력저항이 고려됨으로 V_E 와 V_{Ea} 사이에서 대역폭의 동특성과 V_o 의 제한이 존재함이 확인된다.

압전구동기의 비선형특성은 온도변화에 따른 비선형특성, 크립현상, 이력현상, 전기적 비선형특성이 있는데, 여기서는 비선형선이 가장 크게 나타나는 이력현상과 전기적 비선형특성만을 구동모델에 고려하였다. 모델에서 이력현상에 의한 비선형특성은 비선형 증가함상수 $K_p(\cdot)$ 에 전기적 비선형특성인 구동기의 비선형 정전용량 $C_o(\cdot)$ 로 반영하였다. 선형모델에서 이들 변수는 평균값을 갖는 상수변수이다. 증가함상수와 정전용량이 비선형변수로 나타낸 것은 Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7의 실험결과를 근거로 하였다. Fig. 5(a)는 전기적 특성을 측정하는 것으로, 바이어스 전압 V_r 을 변화시켜가며, V_r 에서 계단입력 $\Delta V_E = 5V$ 을 인가하고 이때의 ΔV_{Ea} 거동을 측정하여 도시한 그림이다. 이 그림은 바이어스 전압에 따라 동특성이 변하고 있음을 보여준다. 이것은 R_o 는 상수이므로 C_o 가 입력의 상태에 따라 변하는 비선형특성이 있음을 의미한다. K_p 변수의 특성을 측정하기 위해 $5V$ 간격으로 입력을 증감시키며 계단입력을 인가하고 정상상태의 출력변위를 측정하였다. 이때의 변위검출은 $10nm$ 의 분해능을 갖는 레이저인터페로미터(HP5528A)을 사용하였다. 정상상태의 출력변위와 입력전압과의 관계는 식(2)와 같으므로 이를 이용한 계산된 결과가 Fig. 6에 도시되었다. $\frac{K_p}{K_e}$ 가 입력에 따른 다른 값을 보이고 있어, 역시 비선형특성을 갖고 있음을 보여준다. 구동기의 기계적 특성을 보기 위해 Fig. 5과 같은 조건으로 계단입력을 인가하고 출력변위의 변화 ΔU_2 를 측정하여 Fig. 7에 나타내

었다. 변위검출은 $10V$ $25\mu m$ 의 민감도를 갖는 용량형 변위 검출기를 사용하였다. 이때 전기적 특성을 줄이기 위해 R_o 를 3.3Ω 로 하여 전기적 차단 주파수가 기계적 고유진동수 보다 높게 하였다. 시스템의 동특성은 입력크기에 무관하게 같은 결과를 보여주고 있는 반면에 이득은 다른 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. 따라서 시스템의 동특성을 나타내는 변수는 선형특성을 가지고 있음을 알 수 있으므로 Fig. 6의 결과는 K_p 의 비선형특성에 의한 결과임을 유추할 수 있다.

4. 간략화된 비선형모델

Fig. 4에 도시된 비선형모델(simplified nonlinear model)을 사용하기 위해서는 각 변수들이 실험적으로 결정되어야 한다. 비선형변수는 여러 인자들의 영향정도를 정량화하여야 가능하지만 모든 비선형변수를 이와 같이 결정하는 것은 어렵다. 비선형특성을 억제하여 무시할 수 있다면 이것이 현실적으로 실제 시스템에 보다 쉽게 적용가능하다. 이러한 이유로 비선형특성을 억제하여 Fig. 3의 모델을 Fig. 8로 간략화하였다. 이것은 정량화하기 어려운 비선형 정전용량 변수의 영향을 억제시킨 결과이다.

비선형 정전용량은 고전압증폭기의 출력저항 R_o 와 곱해져 출력변위에 영향을 미치게 되므로, R_o 가 0이거나 전기적 특성이 무시될 수 있을 정도로 작다면, C_o 의 영향은 무시할 수 있다. 결과적으로 V_E 와 V_{Ea} 사이의 동특성은 소거되고 외부하에 의해 유기되는 압전전압 V_o 가 제거된다. 이 방법은 R_o 가 작아짐에 따라 순간적인 공급전류 I

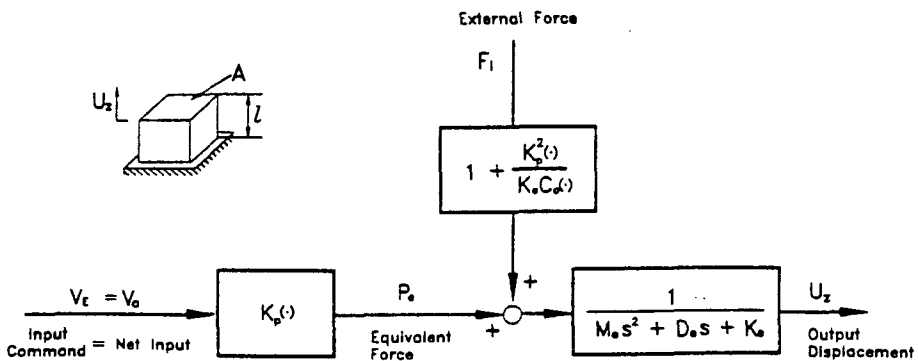


Fig. 8 Simplified nonlinear model of piezoelectric actuator

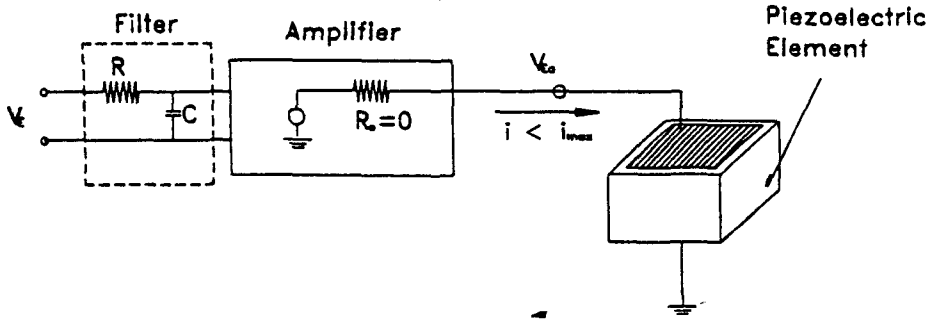


Fig. 9 Electrical circuit for decreasing electrical nonlinear effect

가 증가하게 되므로, 이 공급전류가 공급가능한 최대전류 I_{max} 이내에 있도록 식(8)과 같이 입력변화를 V_E 가 제한되어야 한다.

$$V_E \leq \frac{I_{max}}{C_o} \quad (8)$$

여기서, V_{max} , I_{max} 는 구동기에 인가하는 최대전압과 고전압증폭기의 최대전류를 말한다.

본 연구에서는 비선형 정전용량의 효과를 억제하며 입력을 제한하는 한가지 방법으로 Fig. 9와 같이 RC 저 대역필터를 고전압증폭기 입력 단에 삽입하고, 고전압증폭기의 출력저항을 0 또는 무시할 수 있도록 작게 하였다. 이는 저 대역필터를 사용하여 순간적으로 흐르는 최대전류를 제한하고자 하는 것이다. 구동기에 흐르는 최대전류는 고전압증폭기에 의해서 제한되므로, 제한된 전류를 만족하여 삽입되는 가장 작은 RC 값은 이 그림에서 계단입력이 인가될 때 식(9)와 같이 계산된다. 즉,

$$RC > \frac{V_{max}C_o}{I_{max}} \quad (9)$$

여기서, R, C는 삽입된 저 대역필터의 저항과 정전용량이고, C_o 는 입전재료의 정전용량이다. 여기서는 고전압증폭기의 사양에 의해 식(9)로부터 RC값을 7.01×10^{-4} 로 선택하였다.

적층형 구동기를 사용하여 구동할 경우, 일반적으로 기계적 시스템의 동특성은 전기적 시스템의 동특성보다 훨씬 높은 동특성을 갖게 되므로, 구동기의 전체적인 동특성은 전기적 특성에 지배된다. 예로 본연구에서 사용된 적층형 구동기가 197.5 g의 질량을 구동할 때, 기계적 동특성과 전기적 동특성에 대한 주파수특성을 비교하였다. 부착된 질량은 본 실험에서 사용되는 주사터널링현미경에서 구동기가 구동하는 질량보다 조금 큰 양이다. 기계

적 시스템의 주파수특성을 보기위해 질량 위에 가속도계(PCB Model 336B04)를 설치하고, 전하증폭기(PCB model 408D06)로 가속도계의 신호를 증폭하여 디지털오실로스코프(HP 54504)로 샘플링하였다.

컴퓨터로 만든 펄스와 입력은 고전압증폭기를 통해 구동기에 입력되고, 측정된 결과는 MSAMODAL 프로그램을 사용하여 주파수분석을 하였다. 이때 입력단에 필터는 사용되지 않았으며 입력신호는 증폭기에 의한 전류포화가 발생되지 않도록 1V의 작은 입력전압을 인가하였다. 입력신호와 출력신호의 파워스펙트럼(power spectrum)에 대한 전달함수 특성은 Fig. 10에 도시되었다. 이 그림은 9.101 kHz에서 뚜렷한 진동모드를 준다. 반면, 압전구동 시스템의 전기적 동특성은 구동 전원의 전류포화를 막기 위해 식(9)에 의해 약 24 Hz의 차단주파수를 갖는다. 전기적 특성에 의해 기계적 시스템에 입력되는 신호는 저주파 성분만 입력되므로, 구동기의 질량과 댐핑에 의한 특성은 무시할 수 있다.

주사터널링현미경은 시스템 특성상 외부부하가 작용하지 않으므로 주사터널링현미경에서 적층형구

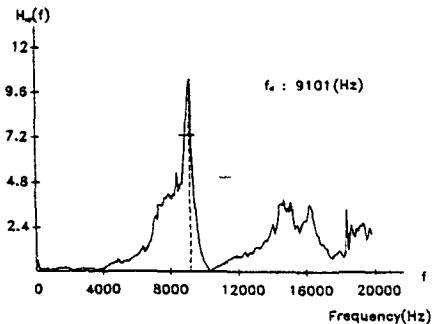


Fig. 10 Power spectrum of transfunction

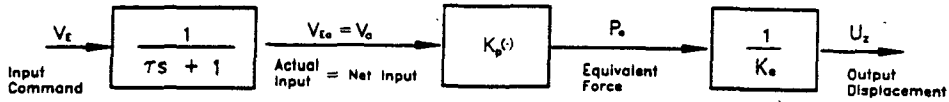
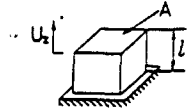


Fig. 11 Simplified nonlinear model of piezoelectric actuator for scanning tunneling microscopy

동기를 사용할 경우의 각략화된 구동모델은 Fig. 11의 모델이 사용가능하다. 본 연구에서는 이 모델을 압전구동기의 구동모델로 사용한다.

5. 비선형모델의 비선형변수

$K_p(\cdot)$ 의 결정

압전상수 $K_p(\cdot)$ 는 외부부하가 0일 때 입력전압 V_E 에 대한 정상상태의 출력변위 U_{z-ss} 의 관계식으로 식(10)과 같이 정의되므로

$$U_{z-ss} = \frac{K_p(\cdot)}{K_e} V_E \tag{10}$$

이를 실험적으로 결정하기 위해 입력전압에 따른 출력변위의 관계가 Fig. 12에 도시되었다. 이 그림은 입력전압이 증감될 경우의 정상상태의 출력변위를 측정할 것으로, 일반전압-변위의 특성곡선을 보여준다. 굵은 실선으로 도시된 변위경로 $H_f(V_E)$ 는 입력이 0에서 V_{max} 까지 증가할 경우의 변위경로를, 굵은 점선으로 도시된 경로 $H_r(V_E)$ 는 V_{max} 에서 0까지 감소될 경우의 변위경로

를 나타낸 것이다. 또한 가는 실선은 0V와 V_{max} 사이의 임의의 점에서 반전하여 증감될 경우의 경로 나타낸 것이다. 이들 입력전압-출력변위의 관계는 단순히 선형관계가 아닌 비선형관계를 갖고 있다. 본 연구에서는 출력변위 U_{z-ss} 를 입력전압 V_E 와 입력전압의 크기가 반전된 점 $R=(V_R, U_R)$ 과 입력전압의 증감방향 $\text{sign}(\dot{V}_E)$ 의 함수로서 식(11)와 같이 나타내고,

$$U_{z-ss} = H(V_E, R, \text{sign}(\dot{V}_E)) \tag{11}$$

이를 $H_f(V_E)$, $H_r(V_E)$ 와 이에 대한 편차양 ΔH 로서 다음과 같이 나타내었다.

$$U_{z-ss} = \begin{cases} H_f(V_E) + \Delta H(V_E, R) & \text{if } \text{sign}(\dot{V}_E) > 0 \\ H_r(V_E) - \Delta H(V_E, R) & \text{if } \text{sign}(\dot{V}_E) < 0 \end{cases} \tag{12}$$

여기서, $\dot{V}_E = \frac{dV_E}{dt}$ 이다. 입력이 증가된 경우($\text{sign}(\dot{V}_E) > 0$)의 편차양 ΔH 는 H_f 에 대한 편차양을, 입력이 감소할 경우($\text{sign}(\dot{V}_E) < 0$)의 편차양 ΔH 는 H_r 에 대한 편차양을 의미하는 것이다. 즉,

$$\Delta H = \begin{cases} U_{z-ss} - H_f(V_E) & \text{if } \text{sign}(\dot{V}_E) > 0 \\ H_r(V_E) - U_{z-ss} & \text{if } \text{sign}(\dot{V}_E) < 0 \end{cases} \tag{13}$$

$H_f(V)$ 와 $H_r(V)$ 는 과거경로에 관계없이 상당한 반복능을 갖고 있음이 실험을 통해 확인되어 식(14), (15)와 같이 다차식으로 나타내었다.

$$H_f(V) = \sum_{k=0}^n a_k V^k \tag{14}$$

$$H_r(V) = \sum_{k=0}^l \beta_k V^k \tag{15}$$

여기서, $a_0, a_1, \dots, a_n, \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{l-1}, \beta_l$ 는 상수이다. 임의의 점에서 반전한 경로의 편차양은 다음과 같이 무차원화된 다차식으로 근사화시켰다.

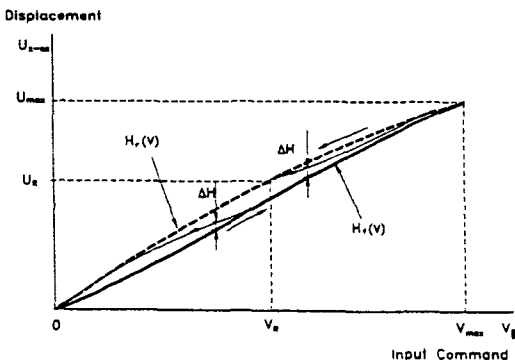


Fig. 12 Typical hysteresis curves of piezoelectric actuators

$$\frac{JH}{U_R - H_r} \frac{V_E}{V_R} \frac{R}{V_R} = \sum_{k=0}^n r_k \left(\frac{V_E - V_R}{V_{\max} - V_R} \right)^k$$

if sign $\dot{V}_E > 0$ 16

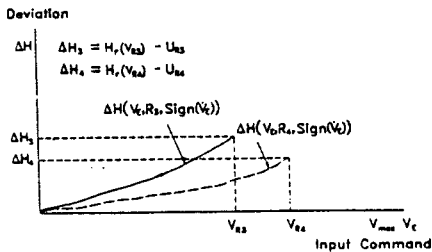
$$\frac{JH}{H_r} \frac{V_E}{V_R} \frac{R}{U_R - V_R} = \sum_{k=0}^n l_k \left(\frac{V_R - V_E}{V_{\max}} \right)^k$$

if sign $\dot{V}_E < 0$ 17

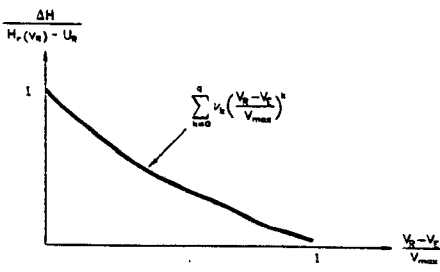
여기서, $R = V_R$, U_R 은 반전점을 나타내는 것이며, $r_0, r_1, \dots, r_{m-1}, r_m, l_1, l_2, \dots, l_{q-1}, V_q$ 는 상수이다. 이것은 입력전압이 임의의 점에서 반전되어 증감될 경우의 반전점에 따라 서로 다른 경로를 갖고 입력이 증감됨에 따라 감소하는 특성을 갖는 편차곡선을 특성화한 것이다. 예로 Fig. 13(a)는 입력이 증감될 경우 반전점에 따른 편차경로의 한 예를 보여 준다. 이들 경로는 식(16)으로 나타내면 Fig. 13(b)와 같이 근사적으로 같은 경로를 갖는 것으로 나타난다. 식(12), (13), (14), (15), (16), (17)로부터 변위경로 U_{z-ss} 는 다음과 같이 결정된다.

$$U_{z-ss} = \begin{cases} \sum_{k=0}^n \alpha_k V_E^k + (U_R - H_r(V_R)) \sum_{k=0}^m r_k \left(\frac{V_E - V_R}{V_{\max} - V_R} \right)^k & \text{if Sign}(\dot{V}_E) > 0 \\ \sum_{k=0}^n \beta_k V_E^k + (H_r(V_R) - U_R) \sum_{k=0}^q l_k \left(\frac{V_R - V_E}{V_{\max}} \right)^k & \text{if Sign}(\dot{V}_E) < 0 \end{cases}$$

(18)



(a) Deviation paths according to reversing points



(b) Normalization

Fig. 13 Normalization of deviation paths

압전구동기의 탄성계수 K_E 는 Fig. 10의 실험결과로부터 계산하고 식(10)으로 비선형 힘상수를 결정한다.

6. 실험 및 검토

K_p 상수의 결정방법에 대한 타당성을 검토하기 위해 먼저 압전구동기의 각 상수들을 결정하였다. 이를 위해 Fig. 14와 같이 0에서 120 V까지 증감하는 변위경로와 70 V에서 반전하여 감소하는 경로와 50 V에서 반전하여 증가하는 경로를 측정하였다. 이로부터 식(14), (15), (16), (17)의 상수들을 최소자승법을 사용하여 오차가 적게나는 적절한 차수로 곡선맞춤을 하여 결정하였다. 함수의 차수는 클수록 오차가 적게 되나 3차로 맞추는 것이 적절한 것으로 보정결과 확인되었다. 각 상수 값은 Table 2에 도시하였다.

임의의 기준위치를 입력으로 하고 이에 상당하는 전압을 식(2)와 식(10)으로 결정하여 인가하고 정상상태의 출력변위를 레이저인터페로미터로 측정하였다. Fig. 15(a)는 식(2)를 사용한 경우의 측정된 경우이고, Fig. 15(b)는 식(10)을 사용한 경우의 측정결과이다. 실험결과 식(2)를 사용하였을 경우에는 최대범위(15.452 μm)에 대해 최대오차가 2.015 μm 로 계산되었으며, 식(10)을 사용한 경우는 0.213 μm 로 계산되었다. 이 결과는 1.34%의 오차범위 내에서 식(18)이 잘 정의되었음을 보인다.

간략화된 압전구동 시스템의 모델링에 대한 타당성을 검토하기 위해 입력 단에 기준전압 $V_r = 20$, 계단입력 $\Delta V_E = 20$ 을 인가하고 압전구동기에 인가되는 실제전압과 구동기의 응답곡선을 측정하였다.

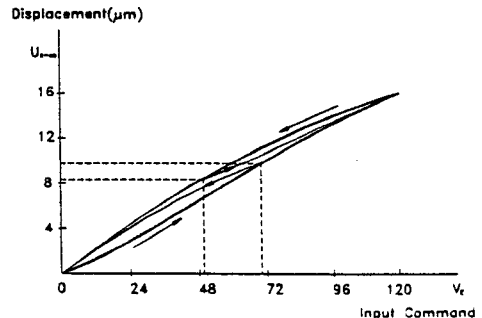
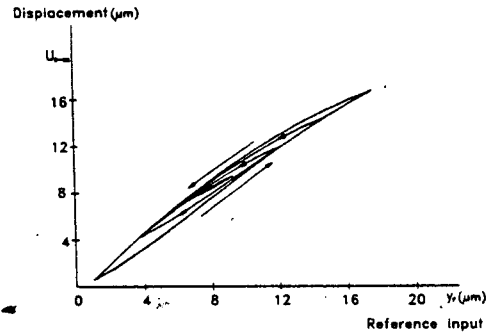


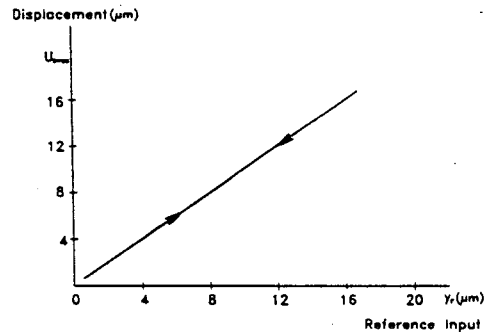
Fig. 14 Calibration for parameter identification

Table 2 Polynomial fitting coefficient of piezoelectric actuator

H _f (V)	α_0 :	8.4351×10^{-6}	
	α_1 :	1.15790×10^{-4}	
	α_2 :	6.57429×10^{-7}	
	α_3 :	-4.5822×10^{-9}	
H _r (V)	β_0 :	1.21434×10^{-6}	
	β_1 :	1.95145×10^{-2}	
	β_2 :	-5.16722×10^{-7}	
	β_3 :	1.00604×10^{-10}	
ΔH	Sign(\dot{V}) > 0	γ_0 :	0.9944799
		γ_1 :	-2.6178784
		γ_2 :	2.4477937
		γ_3 :	-0.8280179
	Sign(\dot{V}) < 0	ν_0 :	0.98910218
		ν_1 :	-1.7717359
		ν_2 :	1.3647084
		ν_3 :	-0.57446539



(a) Linear model

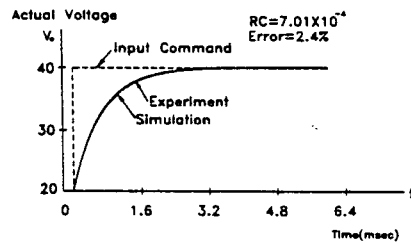


(b) Simplified nonlinear model

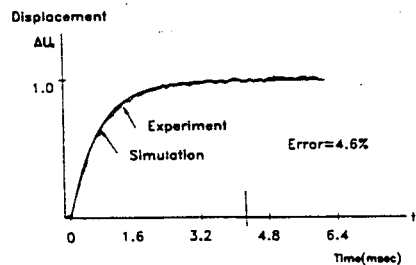
Fig. 15 Positioning with linear and simplified nonlinear model

각각의 측정결과와 시뮬레이션결과가 비교되어 Fig. 16(a), (b)에 도시되었다. Fig. 16(a)은 입력 전압에 대한 실제구동기에 입력되는 전압을 비교한 것이며, Fig. 16(b)는 입력전압에 대한 출력변위를 비교한 것이다. 전기적 특성을 나타내는 등가모델은 천이구역에서 최대오차가 2.4% (0.48V)로 계산되었고, 기계적 특성을 나타내는 등가모델은 천이 구역에서 최대오차가 4.6% (0.1315 μm/2.858 μm)로 계산되었다. 이상의 결과로서 간략화된 모델은 4.6%의 오차범위 내에서 잘 선정되었음이 검토되었다.

Fig. 17은 등간격과 등고를 갖도록 가공된 반도체 표면의 한 부분을 2차 형태로 주사하고, 이때 각 압전구동기의 입력전압을 근거로 식(2)의 선형 관계식과 식(10)의 비선형 관계식으로부터 구동기의 변위량을 환산하여 도시한 한 예이다. 식(10)을 사용하기 위해 주사터널링현미경의 각축의 상수값은 Table 3에 도시하였다. Fig. 17(a)는 시편의 형상을 SEM으로 찍은 사진이며, Fig. 17(b)는 식(2)을 사용하여 계산된 결과이다. 그림의 좌측은



(a) Actual voltage response

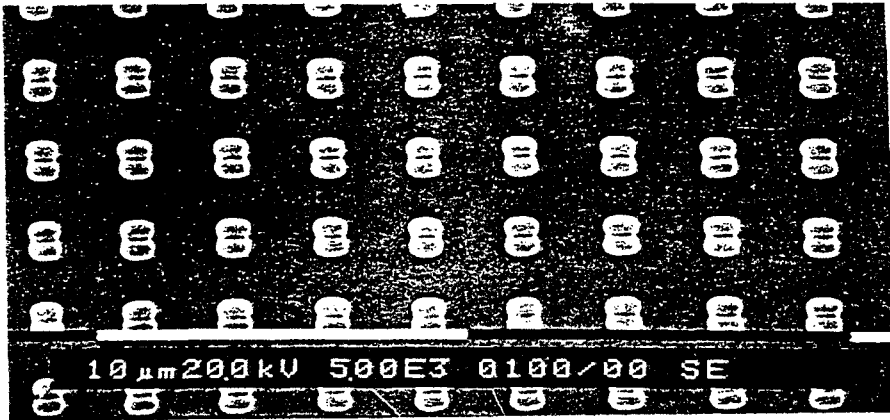


(b) Displacement response

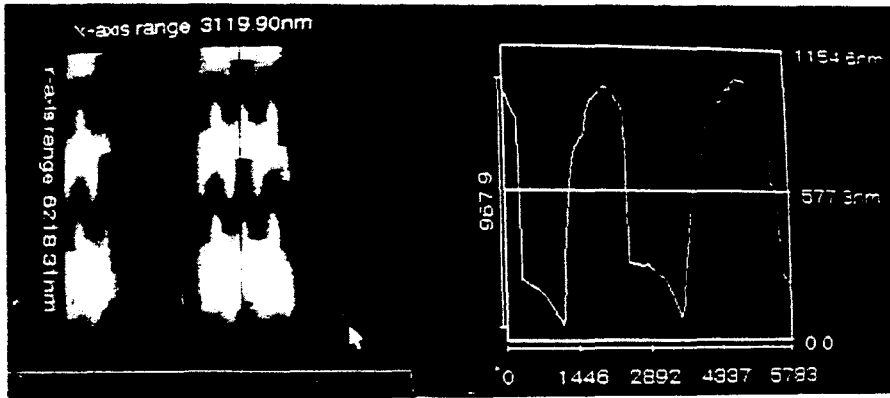
Fig. 16 Discussion of simplified nonlinear model for scanning tunneling microscopy

형상의 높이를 색의 명도로 나타낸 결과이며, 우측은 형상의 한 단면을 나타낸 그림이다. 이 그림은 모델오차에 추정된 형상이 왜곡됨을 보여주고 있다. 이러한 형상왜곡은 Y축과 Z축의 비선형에 의

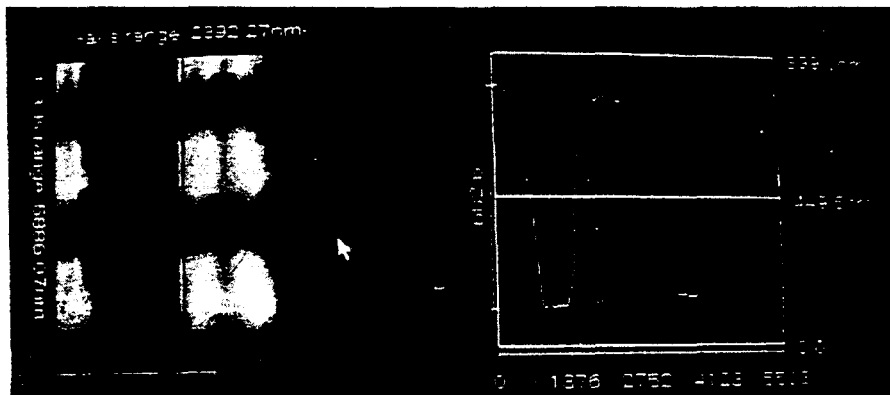
해서 복합적으로 나타나고 있다. 일정한 형상을 갖는 표면의 요철(凹凸)이 주사방향에 따라 다른 위치에 다른 두께를 갖고 있는 것으로 나타나는 것은 주사축의 이력현상에 의해 나타난 왜곡이며 또한,



(a) SEM photograph of specimen



(b) Linear model



(c) Simplified nonlinear model

Fig. 17 A measurement example of scanning tunneling microscopy

Table 3 Polynomial fitting coefficients of actuators in scanning tunneling microscope

Axis		X	Y	Z
H _r (V)		α_0 : -3.6030929e-05	α_0 : -2.9974717e-05	α_0 : 0.8190740e-06
		α_1 : 1.1172265e-04	α_1 : 1.1264431e-04	α_1 : 4.5307890e-05
		α_2 : 7.8095167e-07	α_2 : 8.4634837e-07	α_2 : 4.0173776e-07
		α_3 : -5.3168661e-09	α_3 : -5.43637226e-09	α_3 : -2.6868032e-09
H _r (V)		β_0 : -1.3278698e-06	β_0 : -7.7258055e-05	β_0 : 0.4724920e-06
		β_1 : 1.8919524e-04	β_1 : 1.9657255e-04	β_1 : 8.2315615e-05
		β_2 : -4.6801878e-07	β_2 : -4.5783526e-07	β_2 : 1.7815971e-07
		β_3 : -5.6681076e-10	β_3 : -7.6976447e-10	β_3 : -4.984919e-10
ΔH	Sign(\dot{V}) > 0	γ_0 : 0.99397093	γ_0 : 1.0030094	γ_0 : 1.0101061
		γ_1 : -2.24925931	γ_1 : -2.2816381	γ_1 : -2.5941600
		γ_2 : 2.1732717	γ_2 : 1.7302356	γ_2 : 2.4816141
		γ_3 : -0.69925082	γ_3 : -0.45111632	γ_3 : -0.9079467
	Sign(\dot{V}) < 0	ν_0 : 0.9905012	ν_0 : 0.99803066	ν_0 : 0.9521409
		ν_1 : -2.2311699	ν_1 : -1.8815808	ν_1 : -1.8943356
		ν_2 : 2.2257528	ν_2 : 1.3034474	ν_2 : 1.2053363
		ν_3 : -1.0018612	ν_3 : 0.37978849	ν_3 : -0.2651927

요철의 간격이 등간격으로 나타나지 않은 것은 주사축이 갖는 비선형성에 의해 나타나는 왜곡현상이다. 같은 높이의 요철이 위치에 따라 다른 높이를 갖는 요철처럼 나타나는 것은 Z축의 비선형과 이력현상에 의해 나타나는 왜곡이다. Fig. 17(c)는 식(10)을 가지고 주사축과 Z축의 비선형이 보정된 결과이다. 이 그림은 표면형상의 왜곡이 보상되어 표면요철의 간격이 일정하고, 균일한 높이를 갖는 형상을 보여주고 있다. 식(10)의 비선형 결정식이 비선형성에 의한 측정형상의 왜곡을 보사하여 줄을 알 수 있다. SEM사진과 주사터널링현미경과 철의 간격이 다르게 나타나는 것은 주사터널링현미경의 탐침형상에 의한 오차 때문이다.

7. 결 론

본 연구에서는 센서로 변위를 검출할 수 없거나 개회로 제어를 실시하여야 하는 시스템의 경우에도 정확한 압전구동기의 모델을 사용함으로써 측정 또는 구동정밀도를 향상시키고자 적층형 구동기에 대한

비선형 모델에 관한 연구를 진행하였다. 이를 위해 압전선형이론과 구동전원과 구동기의 비선형특성을 고려한 일반적 비선형모델을 제시하였다. 이것은 선형모델에 비선형특성을 갖는 변수를 비선형변수로 나타낸 것이다. 이로부터 실제 시스템에 적용하여 사용하기 위해 간략화된 비선형모델을 제시하였다. 간략화된 모델은 구동기의 비선형 정전용량의 영향을 하드웨어로 억제하여 나타낸 것이다. 이 모델을 구동기의 구동모델을 사용하기 위해 비선형 변수를 결정하는 방법도 제시하였다. 비선형변수의 결정방법에 대한 타당성을 실험을 통해 검토하여 본 결과 오차가 1.34%내에 있음이 확인되었다. 간략화된 전체 모델에 대한 동특성을 검토하여 본 결과 선형모델을 사용할 경우에 천이구역에서 최대 34%의 오차가 발생되는데 반해, 비선형모델의 전기적 동특성은 2.4%의 오차범위 내에서, 기계적 시스템의 동특성은 4.6%의 오차범위 내에서 잘 선 정되었음이 입증되었다.

간략화된 모델을 주사터널링현미경에 실제 적용하여 측정된 형상을 보정한 결과 식(2)을 사용하였

을 경우의 형상왜곡이 제시된 간략한 모델에 의해 보정됨이 확인되었다.

참고문헌

- (1) Mills, A. A. and Hurst, A. W. A., 1981, "Piezoceramic Fine Movement Control," *J. Phys. E : Sci. Instrum.*, 14, pp.295~296.
- (2) Scire, F. E. and Teague, E. C., 1978, "Piezo-driven 50 μm Range Stage with Subnanometer Resolution," *Rev. Sci. Instrum.*, 49(2), pp.1735~1740.
- (3) Sunny Stalnaker, Lex Straaijer and Judon Stoeldraijer, 1991, "System and metrology improvement to achieve 85nm overlay", *Semico/Korea 91, Technical Proc*, pp.170~138
- (4) Hosaka, S., Hasegawa, T., Hosoki, S. and Takata, K., 1983, "Dynamic Observation of Si (111) Surface Using a Fast Scanning Tunneling Microscopy," *Appl. Phys. Lett.*, 57(2), pp.138~140.
- (5) Hallmark, V. M., Chiag, S., Rabott, J.F., Swalen, J.D. and Wilson, R.J., 1987, "Observation of Atomic Corrugation on Au(111) by Scanning Tunneling Microscopy," *Phys. Rev. Lett.*, 59, pp.2879~2882.
- (6) Park, S. I. and Quate, C. F., 1986, "Tunneling Microscopy of Graphite in Air," *Appl. Phys. Lett.*, 48, pp.112~114
- (7) Okazaki, Y., 1990, "A Micro-Positioning Tool Post Using Machinings," *Precision Engineering*, Vol. 12, No.3 pp.151~156.
- (8) Burleigh, *The piezo book*
- (9) Stoll, E., Baratoiff, A., Selloni, A. and Carnevali, P., 1984, "Current Distribution in the Scanning Tunnel Microscopy: a Free-Electron Model," *J. Phys. C : Solid State Phys.*, Vol. 17, pp.3073~3086
- (10) Simmons, J., 1963, "Generalized Formula for the Electric Tunnel Effect between Similar Electrodes Separated by a Thin Insulation Film," *J. Appl. Phys.* 34, pp.1793~1803
- (11) *IEEE Standard on Piezoelectricity*, 1978, IEEE Standard 176.
- (12) Ernest, O. and Eoebelin, *Measurement System -Application and Design*, McGraw-Hill Publishing Company.
- (13) Tiersten, H. F., 1969, *Linear piezoelectric plate vibration*, PLENUM Press, NewYork.