

# 원자간력 현미경의 자율교정법

권현규\* · 고영채\*\*

New Calibration Methods for improving the Accuracy of AFM

Hyunkyu Kweon, Youngchae Go

**Key Words:** Shape Measurement(형상측정), PZT actuator(PZT 액추에이터), Linearity Error(선형오차), Z-direction calibration(Z방향 교정)

## Abstract

In this paper presents an accurate AFM used that is free from the Z-directional distortion of a servo actuator is described. Two mathematical correction methods by the in-situ self-calibration are employed in this AFM. One is the method by the integration, and the other is the method by inverse function of the calibration curve. The in situ self-calibration method by the integration, the derivative of the calibration curve function of the PZT actuator is calculated from the profile measurement data sets which are obtained by repeating measurements after a small Z-directional shift. Input displacement at each sampling point is approximately estimated first by using a straight calibration line. The derivative is integrated with reference to the approximate input to obtain the approximate calibration curve. Then the approximation of the input value of each sampling point is improved using the obtained calibration curve. Next the integral of the derivative is improved using the newly estimated input values. As a result of repeating these improving process, the calibration curve converges to the correct one, and the distortion of the AFM image can be corrected. In the in situ self-calibration through evaluating the inverse function of the calibration curve, the profile measurement data sets were used during the data processing technique. Principles and experimental results of the two methods are presented.

## 1. 서론

AFM과 같은 주사형 프로브 현미경(SPM)은 XYZ축 주사용 소자로서 압전소자를 이용하고 있다. 압전 소자는 그 변위가 나노미터(nm)의 분해능으로 제어가 가능하다. 그러나, 이러한 높은 분해능에도 불구하고 그 변위 특성에서 생기는 오차 즉, 히스테리시스 현상과 그것에 동반된 비선형오차(직선으로부터의 오차)가 존재한다. 이것으로 인해, 얻어진 형상측정결과에는 변형이 발생하며, 특히 측정범위가 커질수록 그 영향은 무시할 수 없다<sup>(1)</sup>.

액중구동형 AFM<sup>(2)(3)(4)</sup>은 캔틸레버(cantilever)를 물 속에 담겨둔 상태이기 때문에 표면흡착수분의

영향을 받지 않고, 대기 중에서 보다 적은 힘으로서 형상측정이 가능하다<sup>(5)</sup>. 그러므로, 생체재료 등의 부드러운 재료에는 표면 손상 없이 측정이 가능하다. 또한, 세포를 특별한 처리과정을 거치지 않고, 살아있는 세포의 형태로 측정이 가능하며, 생체공학, 의학, 바이오·유기재료 등의 연구개발이 기대되고 있다. 생체세포와 같은 3차원적으로 큰 시료를 많이 취급하고 있기 때문에 액중구동형 AFM은 위에서 논한 변형문제가 무시되지 않는 일례이다. 변화하는 대상을 취급하면 반복 측정된 결과의 차이가 대상물의 실제의 변화인지 드리프트에 의한 측정범위의 차에 의한 변형인지가 추측되지 않는 경우도 있다.

압전소자의 오차 교정법에는 종래의 소프트웨어 교정법<sup>(6)(7)</sup>과 직접 계측법<sup>(8)(9)</sup>이 이용되어지고 있다. 소프트웨어 교정법은 주사패턴이 고정되어진 XY방향에 대해서는 유효한 방법이나, 압전소자의 움직임이 불규칙한 Z방향에 적용하기는 다

\* 금오공과대학교

\*\* 금오공과대학교 대학원

소 문제가 있다. 한편, 직접 계측법은 원리적으로 Z방향의 교정이 가능하나, SPM의 기구구조, 컴팩트성, 강성의 노화문제 등으로 그다지 실용적이지 못한 경우가 많다. 특히 액중 구동형 AFM이 되면, 캔틸레버 선단이 물 속에 잠기므로, 그 선단을 직접 측정하는 유효한 방법은 없다.

이 문제에 대처하기 위해서, 자율교정법(In-situ self calibration)의 원리를 응용하여, 측정 데이터를 사용하는 방법을 제안했다. 본 연구에서는, 형상 데이터로부터의 교정을 두 가지 수학적 방법에 의해, 형상의 오차와 압전소자의 비선형오차를 구했다.

## 2. 액중구동형 AFM

Fig.1은 본 연구에 사용한 액중 구동형 AFM을 나타내고 있다. 캔틸레버의 각도 변위 검출형을 이용한 AFM은 캔틸레버 및 그것을 구동하기 위한 프로브(Probe)부분, 캔틸레버의 기울기를 검출하기 위한 각도 센서부분, 시료의 주사를 행하기 위한 스테이지(stage)부분으로 구성되어 있다.

AFM 프로브 부분은 캔틸레버의 위치 결정을 행하는 조동용의 마이크로헤드와 미동용의 적층형 압전소자 PZT2, 캔틸레버가 시료표면을 따라 움직이도록 하기 위한 피이드 백(Feedback)용 적층형 압전소자 PZT1과 기울기가 약 $15^\circ$ 로 고정된 캔틸레버 홀더(holder)로 구성되어 있다.

## 3. 자율교정의 원리 및 실험결과

### 3.1 적분연산을 이용한 In-situ 자율교정법

#### 3.1.1 원리

본 연구에 사용된 AFM에는 피이드백용 압전소자 외에도 캔틸레버 위치의 미세조정을 행하는 미동용 압전소자도 구성되어 있다. 여기서는, AFM의 특징을 살려서 외부기준과 추가장치를 필요로 하지 않는 In-situ 자율교정법<sup>(10)</sup>을 발전시켜, 형상측정데이터를 사용한 프로브의 비선형오차를 보정하는 방법에 대해 진술했다.

In-situ 자율교정법에는 하나의 시료에 대해서 2회 측정을 행하여, 이 데이터로부터 피이드백용 압전소자 PZT1의 출력특성 및 본래의 정확한 형

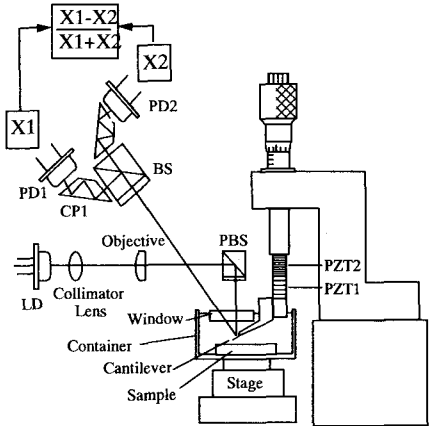


Fig. 1 An Atomic Force Microscope working in liquid

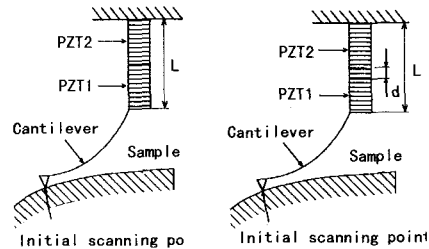


Fig. 2 Principle of the in situ self-calibration method

상(진형상, 眞形狀) 얻었다.

Fig.2와 같이, 첫 번째 형상측정에는 미동용 압전소자 PZT2에 임의의 전압을 인가한 상태로 주사 스테이지를 움직여, 캔틸레버를 시료의 표면형상에 피이드백시킨다. 측정데이터로서는 스테이지의 주사거리  $X_i$ 에 대해서 AFM의 출력(PZT1의 인가전압) $V_{1i}$ 를 얻었다(Fig.3). 두 번째 측정은 같은 측정 개시점에서 스테이지를 주사하기 전에 PZT2에 인가하는 전압을 변화시켜  $d$ 만큼 변위를 일으켜 같은 형상을 측정했다. 이 때, 스테이지의 주사거리  $X_i$ 에 대해서 AFM의 출력을  $V_{2i}$ 로 둔다. 여기서, PZT1이 Fig.4에 나타낸 것과 같은 변위-전압특성곡선  $f_r(z)$ 를 가정했다. 다음으로, 형상측정에서 얻어진  $V_{1i}$ ,  $V_{2i}$ 로부터 식 (1)에 나타낸  $K_i$  값을 얻었다.

$$K_i = (v_{2i} - v_{1i})/d \quad (1)$$

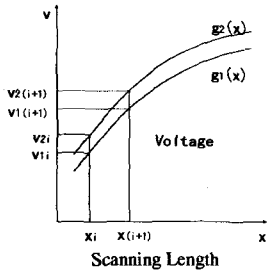


Fig. 3 Output data of the two measurements

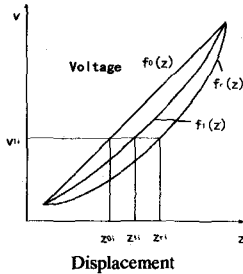


Fig. 4 Calculation procedure for the self-calibration method

이 식은,  $V_{1i}$ 에 따른 PZT1의 실제의 변위  $Z_{ji}$ 에서의  $f_r(z)$ 의 미분값에 상당한다. 그러나,  $Z_{ji}$ 가 불분명하기 때문에 이  $K_i$ 값을 임의로 결정한  $f_r(z)$ (최초는 직선  $f_0(z)$ )로 결정되는  $Z_{ji}(j=0)$ 에 따른 미분값으로서 식(2)에 나타내는 식의 적분연산을 행한다.

$$f_r(z) \cong \sum_i k_i \cdot d \quad (2)$$

이 때 얻어진 곡선을  $f_j(z)$ (단,  $j=1$ )로 한다(그림 4). 이  $f_j(z)$ 로부터  $V_{1i}$ 에 대응하는  $Z_{ji}$ 를 구한다. 이  $Z_{ji}$ 를 이용해서 다시 식(2)의 연산을 행한다. 이 후, 계산을 반복함에 따라 최종적으로는 교정 곡선  $f_j(z)$ 가  $f_r(z)$ 에 수렴하고, 그것과 동시에 시료의 진형상을 얻었다.

### 3.1.2 시뮬레이션 및 실험결과

본 보정법의 유효성을 확인하기 위하여, 계산기 시뮬레이션을 행했다. 우선 경사면을 사용한 시료의 적분연산 과정을 Fig.5에서 나타내고 있다. 그림에서 1회 적분한 결과와 보정이 없을 때

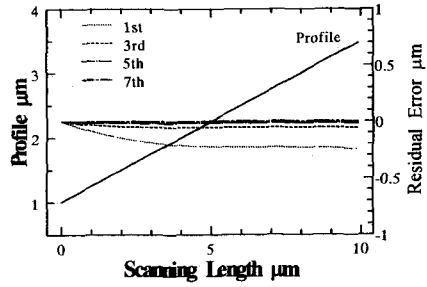


Fig. 5 Simulation result 1 of the self-calibration method

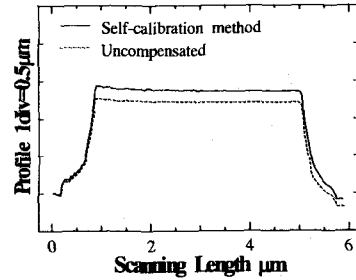


Fig. 6 Measured results by the in situ self-calibration method (Measured results of a step-wise profile)

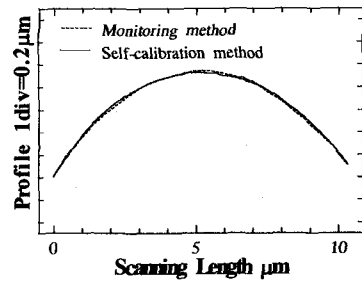


Fig. 7 Comparison of the results obtained by the two methods

의 값과의 차이의 최대 값이 약 250nm를 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이, 7회 이후의 적분연산 이후의 결과의 형상은 진 형상에 대해서 나노미터(nm)이하의 단위로 일치함을 알 수 있었다.

Fig.6은 In-situ 자율교정법을 이용하여 형상 데이터를 보정한 결과이다. 이 교정법에 의한 형상 데이터의 오차 보정량은 약 0.2µm인 것을 알 수 있다. Fig.7은 내피세포(구형단면)에 대해서, 외부 모니터법<sup>(8)</sup>과 In-situ 자율교정법의 보정결과를 비교한 것이다. 그림으로부터, 두 방법의 결과는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이때 양자의

차는 최대 약 50nm이고, 이것은 반복측정에 의한 In-situ 자율교정법의 보정량의 오차라고 생각된다.

### 3.2 역함수를 이용한 In-situ 자율교정법

#### 3.2.1 원리

본 방법에서의 기본원리는 앞 절에서 진술한 자율교정법과 같이, AFM프로브에 의한 형상측정을 동일 시료면에 대해서 2회 행하여, 그 데이터의 의한 압전소자(PZT1, Fig.1참조)의 교정곡선을 얻어 형상 데이터의 보정을 행했다. 먼저, Fig.3으로부터  $g_1(x)$ ,  $g_2(x)$ 를 얻었다. 여기서 PZT1은 Fig.8과 같이 전위-전압곡선(교정곡선)을 가지고, 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$h=f(z)=kz+g(z), \quad (3)$$

여기서,  $g(z)$ 는 선형오차,  $k$ 는 평균감도이다. 또한, 교정곡선의 역함수를

$$h_i=m_i, \quad (4)$$

$$f^{-1}(h_i)=(1/k)h_i-b(h). \quad (5)$$

로 나타내면,  $b(h)$ 의 역함수는

$$b'(h)=(1/k)-d/(m_{i+1}-m_i). \quad (6)$$

가 된다(Fig.9).  $d$ 를 기지(既知)로 하는 변수  $h_i$ 와 함께 식(6)의 우변은 기지(既知)가 되고, 1회의 적분으로  $b(h)$ 가 구해져, 자율교정법의 데이터 처리를 보다 간단하게 실현되었다.

#### 3.2.2 시뮬레이션 및 실험결과

Fig.10은 경사면의 형상에 대해 시뮬레이션을 행한 결과이다. 샘플링시의 오차를 0.1nm(AFM의 횡분해능에 상당한다)로 설정하여 보정을 행했다. 또한, 압전소자 PZT2에는 0.025 $\mu$ m의  $d$ 를 설정했다. 그림에서 알 수 있듯이 0.1nm 우연오차를 가진 단면은 진형상에 대해서 0.2nm의 값을 가지며, 이것은 우연오차의 약 2배가 됨을 알 수 있었다. Fig.11은 압전소자의 교정곡선을 나타내고 있다. Fig.12는 경사를 가진 단면에 대해 소프트웨어법과 In-situ 자율교정법에 의한 방법을 비교

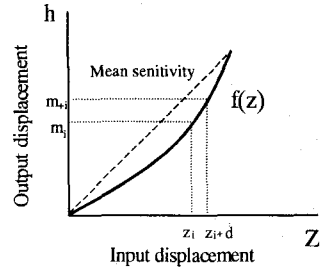


Fig. 8 Calibration curve  $f(z)$  of PZT1.

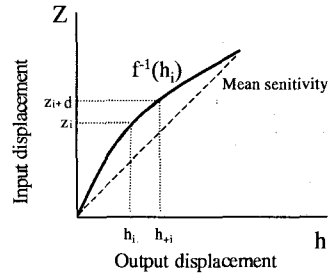


Fig. 9 Inverse function of calibration curve.

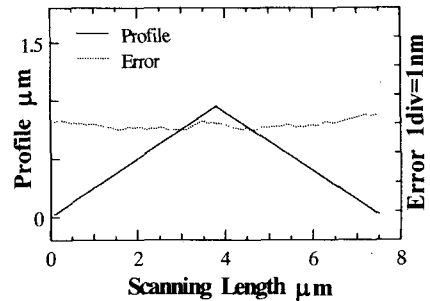


Fig. 10 Simulation result (Profile calibration).

한 결과이다. 소프트웨어 방법은 주사스캐너의 변위-전압특성곡선을 2차식으로 근이한 것으로서 데이터를 보정하고 있다. 그림에서는 각각의 보정법에 따른 보정결과와 보정전의 형상과의 차를 나타낸 것이다. 양자의 차는 거의 일치하는 결과를 가짐을 알 수 있다. Fig.13은 구형단면에 대해서 보정전후의 형상과 보정량을 나타낸 결과이다. 보정량은 최대 약 50nm인 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

(1)외부의 기준과 추가장치를 이용하지 않고,

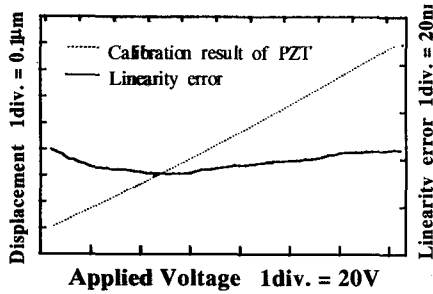


Fig. 11 Calibration result of PZT.

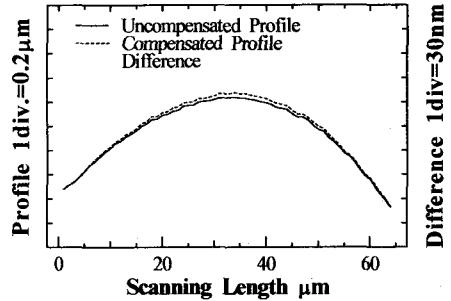


Fig. 13 Calibration result (spherical surface).

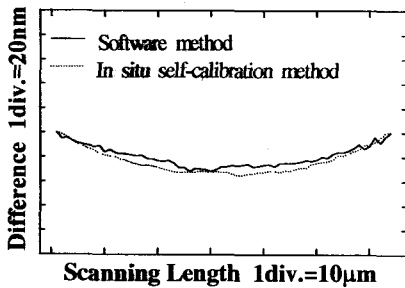


Fig. 12 Comparison of the results by two methods : in-situ self-calibration method and software method.

압전소자를 AFM에 구성되어진 상태로 그것의 비선형성을 형상데이터로부터 교정하는 In-situ 자율교정법을 제안했다. 형상데이터로부터의 교정 과정은 적분과 역함수이용의 두 가지 수학적 인 방법에 의해 보정을 행했다.

(2)계산기 시뮬레이션에 의해서 본 연구의 유효성을 확인하였고, 형상측정의 교정실험에서는 원리가 완전히 다른 외부모니터 및 소프트웨어 법에 의한 비선형 오차의 형상 변형에 대해서도 우수한 재현성으로 보정이 가능했고, 어느 쪽의 방법도 본 연구에 사용된 액중 AFM의 고정도화에 유효한 방법임을 알 수 있었다.

## 후기

본 논문은 금오공과대학교 BK21 기계기술선도 사업단에 의한 결과임을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Butt H. J., Wolff E. K., Gould S. A., Northern B. D., Peterson C. M. and Hansma P. K., 1990, "Imaging Cell with Atomic force Microscope", J. Structural Biology, 105, pp. 54-61.
- (2) Weisenhorn A. L., Hansma P. K., 1989, "Forces in atomic force microscopy in air and water", Appl. Phys. Lett. 54 (26), pp. 2651-2653.
- (3) Hudlet S., Jean M. S., Royer D., Berger J., and Guthmann C., 1995, "In situ measurement of large piezoelectric displacements in resonant atomic force microscopy", Rev. Sci. Instrument, 66-4, pp. 2848-2852.
- (4) Barrett R. C. and Quate C. F., 1991, "Optical scan-correction system applied to atomic force microscopy", Rev. Sci. Instrument, 62-6, pp. 1393-1399.
- (5) Holman A. E., et al, 1996, "A calibrated scanning tunneling microscope equipped with capacitive sensors", Rev. Sci. Instrument, 67-6, pp. 2274-2279.
- (6) Kiyono S., Satoh M., Nanjyo T., and Gao W., 1996, "Highly accurate technique for SPM measurement", Proc. of ASPE 11th Annual Meeting, Monterey, pp. 186-189.
- (7) Kiyono S., Gao W., Ogra I. and Seino H., 1997, "In situ self-calibration of metrological sensors", to appear in Proc. of IMEKO 13 World Congress, Tampere, Finland.
- (8) Kiyono S., Shan X., and Sato H., 1993, "Development of an atomic force microscope using a critical angular sensor", Int. J. of JSPE, 27-4, pp. 373-378.
- (9) Huang P. S., Kiyono S. and Kamada O., 1992, "Angle measurement based on the internal-reflection effect : a new method", Applied Optics, 21-28, pp. 6047-6055.
- (10) Kiyono S., Sugibuchi T. and Morishima K., 1992, Proceedings of ASPE 7th Annual Meeting, Florida, pp. 305-308.