

## 원자간력 현미경을 이용한 대면적 표면 형상 측정 방법

신영현\*(금오공대 대학원), 고명준(금오공대 대학원), 홍성욱(금오공대), 권현규(금오공대)

A large surface-shape measurement method by using Atomic Force Microscope

Y. H. Shin(Graduated school, KIT), M. J. Ko(Graduated school, KIT), S. W. Hong(KIT), H. K. Kwon(KIT)

### ABSTRACT

This paper presents a method to measure a large surface shape using atomic force microscopy, which has been used mostly for measuring over very tiny surfaces. Experiments are performed to measure a step height and a slope of a test sample. The proposed method is rigorously compared with the coordinate measuring machine. The repetition accuracy and the effects of the set point are also studied. The experimental results show that the proposed method is reliable and should be effective to measure both the nano-accuracy surface profile as well as the micro-accuracy global shape of a macro/micro parts using atomic force microscope.

**Key Words** : Atomic Force Microscope(원자간력 현미경), Coordinate Measuring Machine(3차원 측정기), Noncontact Measurement(비접촉측정), Force Gradient(힘구배)

### 1. 서론

초소형, 초정밀, 나노 기술 등의 발전과 더불어 미세형상의 정밀 측정이 요구되고 있다. 초정밀 측정 장비의 하나인 원자간력 현미경은 시료와 프로브 팁간의 원자간력(반데르 발스 힘)을 이용하여 시료의 미세 표면을 측정하는 장비로서 시료의 전기적 성질에 관계없이 시료의 표면을 원자단위까지 측정할 수 있기 때문에 초정밀/나노 관련 생산/개발/연구에 많이 활용되고 있다. 그러나 일반적인 측정범위는  $100 \sim 000 \mu\text{m}^3$  이하로 대단히 제한적이므로 표면의 정밀측정 목적으로 사용되며 대상 측정물의 형상 정밀도 등 매크로 특성에 대한 측정에는 한계가 있다. 원자간력 현미경의 활용도 확대를 위해 이송장치를 장착하여 보다 큰 시료에 대한 측정에 대응하고 있으나 지정된 위치에서 미소면적의 정밀표면 측정 목적에 국한되고 있다. 따라서 본 연구에서는 원자간력 현미경에 이송계가 포함된 시스템을 이용하여 대면적 부품의 형상을 측정하는 방법에 대해 논의하였다.<sup>1</sup>

원자간력 현미경은 그 측정 원리상 접촉 및 비접촉식의 두 가지 방식으로 운용되는데 접촉 방식에서

는 시료와 탐침이 매우 근접하게 뒹으로서 사실상 접촉상태를 유지하며 시료와 탐침간의 척력을 직접적으로 이용하는 반면 비접촉식 방식은 시료와 탐침의 거리가 좀 더 먼 상태에서 시료와 탐침간의 인력구배(Attractive Force Gradient)를 이용하는 방식으로 시료 및 탐침에 훼손이 적다는 장점이 있다.

본 연구에서는 원자간력 현미경의 접촉 및 비접촉식 측정 원리를 이용하여 임의형상을 갖는 대면적 부품의 표면 형상을 3차원 측정기와 유사한 원리로 측정할 수 있는 방법을 제시하였다. 즉 시료를 이송계로 이송하고 측정을 원하는 위치에서 탐침을 시료 표면에 접근시켜 척력(접촉식)이나 인력구배(비접촉식)가 원하는 값이 되었을 때 좌표를 기록하는 방식으로 시료의 표면 형상을 측정하였다. 제안된 방법의 특성을 살펴보기 위해 측정 조건의 변화에 따른 반복 측정했을 때에 대한 정밀도를 검토하였다.

### 2. 원자간력 현미경의 표면 좌표 획득 방법

원자간력 현미경은 마이크로 머시닝으로 제조된 캔틸레버라 불리는 작은 막대를 사용하고 캔틸레버의 끝에는 탐침이 부착되어 있다. 이 탐침의 끝단은 원자 몇 개 정도의 크기로 매우 첨예하기 때문에 이

러한 캔틸레버를 시료 표면에 접근시키게 되면 탐침과 시료의 간격에 따라 인력, 혹은 척력이 작용하여 캔틸레버가 변형하게 되고 이러한 변형량을 이용하여 시료 표면 형상을 측정하게 된다. 본 연구에서는 이와같이 캔틸레버를 시료 표면에 접근시키면 원자간력이 작용한다는 점을 해당 좌표를 측정하기 위한 트리거(Trigger)로 활용하여 시료 표면의 위치 좌표를 측정하였다.

### 2.1 접촉식 측정

원자간력 현미경의 측정 방법 중 접촉식 원자간력 현미경은 원자간력 중 척력 구간에서 캔틸레버의 변형이 일정하게 유지되도록 주사하면서 좌표를 읽는 방식으로 시료 표면의 데이터를 획득한다.<sup>2</sup> 따라서 탐침을 시료에 접근시켜 캔틸레버의 변형이 지정된 값보다 커지게 되었을 때를 트리거 신호로 이용하여 그 때의 좌표를 읽는 방식을 적용하였다.

캔틸레버에 가해지는 힘 또는 변형량을 조절할 수 있도록 설정을 변경할 수 있으므로 이를 변경하였을 때의 효과에 대해서도 분석하였다.

### 2.2 비접촉식 측정

원자간력 현미경의 측정 방법 중 비접촉식 방법은 원자간력 중 인력 구간에서 시료의 표면데이터를 획득하는데 척력 구간과는 다르게 원자간 거리변화에 따른 힘의 변화가 적기 때문에 직접적으로 캔틸레버의 변형량을 측정할 수 없다. 따라서 캔틸레버의 고유진동수를 이용하는데 캔틸레버의 고유진동수 부근에서 기계적으로 진동을 시키고, 캔틸레버가 시료 표면에 접근하게 되면 원자간력의 인력 구배에 의해 캔틸레버의 고유진동수가 변하게 되는 양상을 보인다. 그 결과로 진폭과 위상에 변화가 생기고 그 변화가 일정하게 유지되도록 주사함으로써 최종적으로 상하 좌표를 읽게 된다.<sup>3,4</sup> 또한 탐침이 시료에 근접하기 전 캔틸레버 자체의 주파수 응답으로부터 응답의 크기(또는 가진주파수)를 설정함으로써 측정 장치가 반응하는 원자간력의 인력구배 크기를 간접적으로 결정하게 되므로 응답 크기를 변경하면서 그 효과를 관측할 수 있다.

### 2.3 실험 방법

접촉식과 비접촉식 모두 시료의 표면측정에 앞서 접근 과정을 거치게 되고 접근 과정이 완료되는 지점에서 Z축 스캐너 본체는 항상 중앙에 위치하게 된다. 본 연구에서는 이러한 특성을 이용하여 이송장치가 포함된 원자간력 현미경으로 이송계의 XY좌표를 기록하고 그 위치에서 접촉식과 비접촉식의 접근

이 완료되는 지점에서 Z축 데이터를 획득하는 방법으로 시료의 3차원 형상을 획득하였다. 접촉식과 비접촉식 각각의 Z축의 접근에 대한 반복 정밀도를 측정하였으며 500 $\mu\text{m}$  이상의 단차를 가지는 시료를 이송계에 장착한 후 시료 표면의 위치 좌표를 획득하여 면을 구성하였고 그 후 두 면의 상대적인 높이 값으로 단차를 측정하였다. 또한 같은 방식으로 경사면을 가지는 시료표면의 위치 좌표를 획득하여 면을 구성하고 두 면의 각도를 측정하였다.

Fig. 1은 실험에 사용된 원자간력 현미경으로서 Z축 스캐너와 XY 평면이동 스테이지로 구성되어있다. Z축 스캐너는 3축의 원통형 PZT가 장착된 스캐너 본체와 0.4 $\mu\text{m}$ 의 분해능을 가지는 Z축으로 구성되어있으며 시료를 장착하는 XY 스테이지는 X축, Y축 방향으로 각각 2.5 $\mu\text{m}$ 의 분해능을 가지고 있다. Fig. 2는 단차측정을 위해 선정된 1mm 이하의 단차를 가지고 있는 연마된 정밀 기계부품과 경사면 측정을 위해 선정된 3차원 측정기의 다각형 표준 시료를 나타내고 있으며 이 시료에 대한 측정부분을 보여주고 있다.

측정값의 비교를 위해 직경 D=500 $\mu\text{m}$ 인 접촉식 볼 프로브를 사용하는 3차원 측정기를 사용하였으며 최소 4지점의 위치 좌표로 각각의 평면을 구성한 후 단차와 각도를 측정하였다.

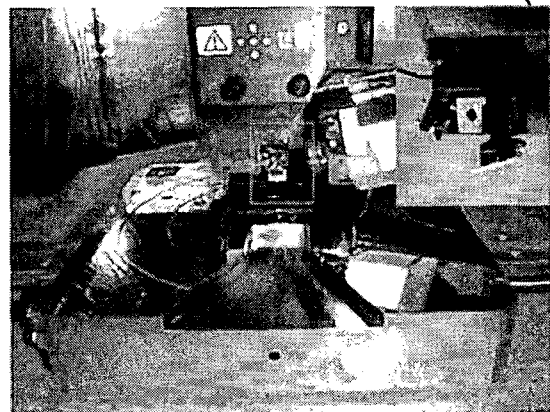


Fig. 1 Atomic Force Microscope



Fig. 2 Samples and measured point

### 3. 실험 결과 및 토의

#### 3.1 단차 및 각도 측정

Fig.2의 시편에 대하여 제안된 방법과 3차원 측정기를 이용하여 단차 및 각도를 측정하였다. 단차의 측정을 위해 각 평면에 대하여 10곳 이상의 위치에서 위치 좌표를 획득하여 평면을 구성하였으며 이를 바탕으로 단차에 의해 구분되는 상면과 하면의 평균적인 상대높이를 측정하였다. 측정결과의 신뢰성을 위해 20회 반복측정을 수행하였으며 각도 측정을 위해 단차 측정과 동일한 방식으로 기준평면과 경사면을 측정하고 이를 기초로 두 평면 사이의 각도를 측정하였다.

Table 1은 제안된 방법과 3차원 측정기에 의해 측정된 시편의 단차 및 각도를 나타내고 있으며 두 방법 간의 단차에 대한 오차는  $1\mu\text{m}$  이내임을 알 수 있고 각도의 경우 0.03 로서 단차 측정 결과에 비해 상대적으로 오차가 크다는 것을 확인할 수 있다. 단차에 대한  $1\mu\text{m}$  이내의 오차는 원자간력 현미경의 수직축 해상도가  $0.4\mu\text{m}$ 이고 3차원 측정기의 해상도가  $0.5\mu\text{m}$ 임을 고려해 볼 때 충분한 신뢰성을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 원자간력 현미경의 접촉식 방법과 비접촉식 방법을 비교하였을 때  $1.3\mu\text{m}$ 의 오차가 발생함으로써 이송정밀도 보다 큰 오차를 보이고 있는데 이와 같은 오차의 가장 직접적인 원인은 시료의 표면 거칠기인 것으로 추정된다.

3차원 측정기와는 달리 원자간력 현미경은 미세 표면 형상이 측정결과에 많은 영향을 미치게 되기 때문에 원자간력을 이용한 측정 시에는 시료의 표면 거칠기에 대한 고려가 필요하다. 따라서 표면 거칠기의 영향을 고려하기 위해 측정 범위에서의 표면 미세형상을 측정하였다. 원자간력 현미경의 접촉식 방법을 이용하여 상면과 하면 각각 16개의 영역을 선택하였고  $100 \times 100\mu\text{m}^2$ 의 크기로 표면형상을 측정하였다. 측정결과 표면 거칠기는 평균적으로 상면에서  $R_{\text{max}} = 3.384\mu\text{m}$ , 하면에서  $R_{\text{max}} = 2.988\mu\text{m}$ 를 보이고 있다. Fig. 3은 16개의 영역 중에서 시료에 대한 표면 거칠기의 형상을 가장 잘 나타내는 영역으로 두 면의 표면형상은 X축 방향으로 산과 골이 반복되는 양상을 보이고 있으며 평균적으로 산과 골의 폭은  $10\sim 20\mu\text{m}$ , 깊이는  $1\sim 2\mu\text{m}$ 이다. 이러한 결과로부터 3차원 측정기에서는 무시되던 표면 거칠기의 영향이 원자간력 현미경에서는 결과에 중요한 변수로 작용함을 알 수 있다.

한편 각도 측정결과에 의하면 원자간력 현미경의 접촉식과 비접촉식 방법 간의 차이는 매우 작으나 원자간력 현미경과 3차원 측정기와의 차이는 상대적

Table 1 Measured relative height and angle

	Height( $\mu\text{m}$ )	Angle(?)
Contact mode AFM	530.3	45.157
Non-Contact mode AFM	529.0	45.162
CMM	530.0	45.130

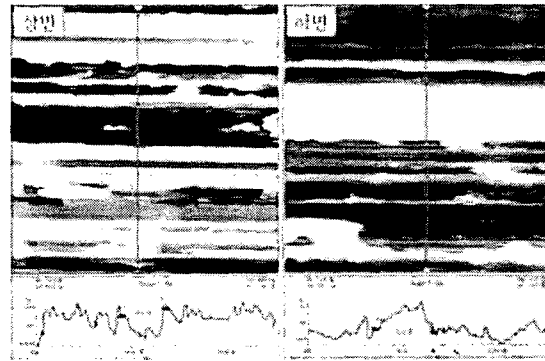


Fig. 3 Surface-shapes and height profiles for upper and lower planes of the test sample.

으로 크다는 것을 확인할 수 있다. 이는 원자간력 현미경을 이용한 경사면 측정 시 복합적인 원자간력의 작용으로 인하여 경사면 측정의 정도가 떨어졌기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 원자간력 현미경의 정밀도를 높이기 위해서는 탐침을 물체의 표면에 수직으로 접근시킬 필요가 있으며 이와 같은 특성을 개선하기 위한 방법으로 시편을 회전시킬 수 있는 구동 장치를 적용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 이밖에 결과에 영향을 미칠 수 있는 또 다른 오차 원인으로 이미 앞서서도 검토한 바와 같이 3차원 측정기에서는 고려되지 않던 표면 거칠기가 측정결과에 영향을 미친 것으로 추정된다. 이 오차성분은 측정점을 일정 개 이상 확보함으로써 충분히 낮출 수 있을 것으로 생각된다.

#### 3.2 반복정도 및 설정조건에 의한 변화 평가

접촉식 측정에서 트리거 설정값은 캔틸레버에 가해지는 힘의 크기로 주어진다. 트리거 설정값에 따른 변화를 관찰하기 위해  $R_{\text{max}} = 28.44\text{nm}$ 인 표준시료를 선정하였으며 기준값으로 주어지는 설정값(Set point)에서  $0.1\text{nN}$  간격으로 힘을 증가시키며 10회 반복측정을 수행하였다. Table 2에서 보는 바와 같이 설정값 증가에 따라 좌표 값이 증가함을 확인할 수 있으며 반복 측정된 결과로부터 동일한 트리거 설정값에 대한 최대표준편차( $\sigma_{\text{max}}$ )는  $0.2\sim 0.3\mu\text{m}$ 로 측정분해능을 벗어나지 않음을 알 수 있다.

비접촉식 측정 방법에서 트리거 설정값은 가진주

과수에서의 캔틸레버 응답 크기를 나타낸다. 트리거 설정값에 따른 변화를 관찰하기 위해 접촉식 측정에서와 동일한  $R_{max} = 28.44nm$ 인 표준시료를 선정하였으며 기준값으로 주어지는 설정값에서  $5nm$  간격으로 설정값을 감소(주파수 증가)시키며 10회 반복측정을 수행하였다. Table 3에서 보는 바와 같이 설정값에 대한 좌표 값이 비례적으로 증가함을 확인할 수 있으며 반복측정 결과로부터 동일한 트리거 설정값에 대한 최대표준편차는 접촉식 측정결과와 비슷한  $0.2\sim 0.3\mu m$ 임을 확인할 수 있다.

Table 2 Experimental results for repetition accuracy and effects of set point (contact mode)

	Contact mode Set-point (nN)				
	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0
	Measured coordinates ( $\mu m$ )				
1	1450.0	1450.8	1451.2	1451.2	1451.2
2	1450.4	1450.8	1451.2	1451.2	1451.6
3	1450.4	1450.8	1451.2	1451.2	1451.6
4	1450.0	1450.4	1451.2	1450.8	1451.6
5	1450.0	1450.8	1451.2	1451.2	1451.6
6	1450.0	1450.8	1450.4	1450.8	1451.6
7	1450.4	1451.2	1451.2	1451.2	1451.2
8	1450.4	1451.2	1451.2	1450.8	1451.2
9	1450.4	1450.4	1451.2	1451.2	1451.2
10	1450.4	1451.2	1451.2	1451.2	1451.6
Avg.	1450.2	1450.8	1451.1	1451.1	1451.4
$\sigma_{max}$	0.21	0.30	0.25	0.19	0.21

Table 3 Experimental results for repetition accuracy and effects of set point (non-contact mode)

	Non-contact mode Set-Point ( $\mu m$ )				
	0(ref)	-0.005	-0.010	-0.015	-0.020
	Measured coordinates ( $\mu m$ )				
1	1405.6	1406.0	1406.0	1406.8	1406.8
2	1405.2	1406.0	1406.4	1406.8	1406.8
3	1405.2	1405.6	1406.4	1406.8	1407.2
4	1405.2	1406.0	1406.0	1406.4	1407.2
5	1405.6	1406.0	1406.4	1406.0	1406.8
6	1405.6	1406.0	1406.0	1406.8	1407.2
7	1406.0	1406.0	1406.4	1406.8	1406.8
8	1405.6	1406.0	1406.4	1406.8	1406.8
9	1406.0	1406.4	1406.4	1407.2	1407.2
10	1405.6	1406.0	1406.4	1406.8	1406.8
Avg.	1405.6	1406.00	1406.3	1406.7	1407.0
$\sigma_{max}$	0.30	0.19	0.19	0.32	0.21

#### 4. 결론

본 연구에서는 대면적 측정을 위해 이송계를 장착한 원자간력 현미경을 이용하여 대형 시편의 표면 형상을 3차원 측정기와 유사한 방식으로 측정하는 방법을 제안하였다. 측정을 위한 트리거 신호로 기존 원자간력 현미경의 원리인 원자간력을 사용하는 방법을 이용하였다. 단차 및 각도 측정 실험을 통하여 제안된 방법에 대한 측정의 정확도를 확인하였으며 이송계가 포함된 원자간력 현미경의 경우 이송계의 오차범위내에서 시료의 전체 형상 측정이 가능한 것을 확인하였다. 또한 반복정밀도 분석을 통해 동일조건에서 반복정밀도가 우수함을 확인하였다. 이 방법에서는 기존의 원자간력 현미경의 원리를 훼손하지 않으면서 대형 시편의 형상을 측정할 수 있게 함으로서 미세표면 형상과 시편 전체의 형상을 동일한 설정 상태에서 측정할 수 있게 되는 장점을 갖게 된다. 따라서 미세한 부품의 형상정보와 특정 부분의 표면형상정밀도를 측정해야하는 경우, 미세표면 형상을 측정하기 위한 장비와 전체 형상을 측정하는 장비로 구분하여 측정을 실시하였는데 본 연구에서 제안된 방법을 사용하게 되면 시료의 미세표면형상과 전체 표면형상 정보를 한 번의 설정으로 모두 얻을 수 있기 때문에 측정에 소요되는 시간을 줄이고 시료의 손상을 예방 할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. 홍성욱,고명준,신영현,이득우, 초정밀 마이크로 표면 측정 시스템 개발? 한국공작기계학회 춘계학술대회, 금오공과대학교, 2005. 5.
2. 구자용,김달현, 딥FM에서의 미세힘 측정의 원리 및 응용,? 한국정밀공학회지 제19권 제3호 통권 132호, (2002. 3) pp.13-18
3. 박준기,권현규,홍성욱, 비접촉 원자간력 현미경의 탐침 외팔보 진동특성에 따른 성능평가,? 한국소음진동공학회논문집, 제14권 제6호 통권 87호, pp.495-502, 2004. 6.
4. User's Guide to Autoprobe CP and M5, TM Microscopes, 2001.