

나노 힘 측정 및 표준

김민석*, 박연규, 최재혁, 김종호, 강대임 (KRISS 물리표준부)

Nano Force Metrology and Standards

M. S. Kim, Y. K. Park, J. H. Choi, J. H. Kim, and D. I. Kang (Div. of Physical Metrology, KRISS)

ABSTRACT

Small force measurements ranging from 1 pN to 100 μ N, we call it Nano Force, become the questions of common interests of biomechanics, nanomechanics, material researches, and so on. However, unfortunately, quantitative and accurate force measurements have not been taken so far. This is because there are no traceable force standards and a calibration scheme. This paper introduces a quantitative force metrology, which provides traceable link to SI (International Systems of Units). We realize SI traceable force ranging from 1 nN to 100 μ N using an electrostatic balance and disseminate it through transfer standards, which are self-sensing cantilevers that have integrated piezoresistive strain gages. We have been built a prototype electrostatic balance and Nano Force Calibrator (NFC), which is an AFM cantilever calibration system. As a first experiment, we calibrated normal spring constants of commercial AFM cantilevers using NFC. Calibration results show that the spring constants of them are quite differ from each other and nominal values provided by a manufacturer (up to 240 % deviation).

Key Words : Nano Force (나노힘), Atomic Force Microscope (원자힘 현미경), Cantilever (캔티레버), Spring Constant (스프링 상수), Calibration (교정), Force Standard (힘 표준)

1. 서론

나노힘이란 1 pN ~ 1000 μ N 의 크기에 해당하는 매우 작은 힘을 측정하는 것으로 20 년 전부터 발전한 나노 기술을 바탕으로 인류가 원자 수준의 물체를 관찰하고 원자 수준에서 일어나는 현상을 규명하면서 나노힘을 측정하는 일들이 많아지고 있다. 예를 들면, 원자구조를 관찰할 수 있는 원자간힘 현미경(Atomic Force Microscope, 이하 AFM)은 수 pN ~ 수 nN 정도의 원자간 상호 작용력을 이용하고 있으며 박막의 기계적 특성을 측정하는 장치인 나노 압입기(nano indenter), 나노 스크래치 테스터(nano scratch tester) 등도 수 mN ~ 수 nN 영역의 힘을 사용하고 있다. 이 밖에도 MEMS(Micro Electro Mechanical System)의 기계적 특성 측정, 공유 결합의 측정, 탄소나노튜브의 물성치 측정 그리고 생체 분자간 결합력 측정 등 나노힘 측정은 나노 물질의 제작, 나노 세계 현상 탐구, 생명현상 규명 등에 광범위하게 응용되고 있다.

하지만 이러한 측정 수요에 비하여 믿을 수 있고 정량적인 힘 측정은 거의 전무하다. 전통적인 방식인 실하중을 이용한 힘의 표준 - 질량과 중력 가속도를 이용한 힘 표준 - 은 한국표준과학연구원이 개발하여 보유하고 있는 200 N 용량의 힘표준기를 이용하면 최소 10 N 의 힘 발생이 가능하다. 현재 교정 가능한 최소 분동은 1 mg 으로 이 분동을 이용하여 발생할 수 있는 실하중은 약 10 μ N 이다. 하지만 이보다 작은 힘은 추 제작의 어려움으로 인해 발생하기 힘든 문제점이 있다. 따라서 10 μ N ~ 100 N 까지의 영역은 저울을 이용하여 힘 측정의 소급성(traceability)을 유지하려는 연구가 진행되고 있다.

그러면 최소 분동으로도 발생할 수 없을 만큼 작은 힘의 영역은 어떻게 표준을 확립할 수 있을까? 정전기력을 이용한 힘 발생이 하나의 대안으로 제시되고 있다. 동심을 갖는 두 개의 원통형 실린더를 이용하여 정전기를 발생한다. 정전기력은 두 원통간의 전위차와 정전용량으로부터 알 수 있으며

국제단위계 (SI)로의 소급성은 전기 표준으로부터 얻는다.

나노힘 표준기만 만들어졌다고 현장에서 나노힘 측정이 정확하고 믿을만해 지는 것이 아니다. 표준기에서 발생한 힘을 이용하여 현장에서 사용하는 AFM 이나 나노 인텐터 그리고 나노 인장기와 같은 측정기를 교정할 수 있는 보급 수단, 즉 전달용 표준기가 필요하다. 전달용 표준기는 일종의 힘센서로서 나노힘 표준기에서 발생한 힘에 비례하는 전기적인 신호를 출력해야 하며 이동하여 설치하기 쉬어야 하며 특성이 우수해야 한다. 또한 이 전달용 표준기를 교정할 수 있는 교정 기법 및 교정 불확도 산출 기법 등이 개발되어야 한다.

본 논문에서는 나노힘의 정확한 측정 및 보급을 위한 세가지 체계 - 나노힘 표준, 나노힘 교정기, 전달용 표준기 - 에 대한 소개와 현재 KRISS 의 연구내용 현황에 대해 발표하겠다.

2. 나노힘 표준기

나노힘 표준기에 대한 원리와 구조 등은 이미 정밀공학회지의 여러 논문에 소개하였으므로[1,2] 자세한 설명은 생략하기로 한다. Fig. 1 은 현재 구축되어 있는 나노힘 표준기의 사진이다.

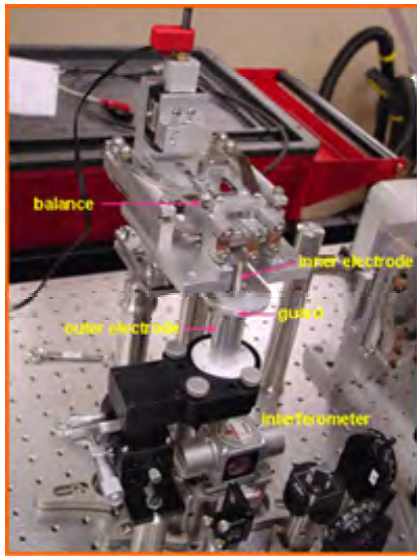


Fig. 1 Photograph of electrostatic balance

동심형 축전기에서 발생하는 힘은 다음의 식으로 표현된다.

$$F = \frac{dU}{dZ} = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{dZ} \quad (1)$$

여기서 C는 축전기의 정전용량, V는 양극의 전위차, Z는 안쪽 전극의 중력방향의 변위이다. dC/dZ 는 원리적으로 두 전극이 동심이고 무한히 길 경우 안쪽 전극의 외경과 바깥쪽 전극의 내경에 의해 결정되는 상수 값이다. $dC/dZ = 1 \text{ pF/mm}$ 으로 설계했다면, 최소 정전기력은 1 V의 전위차를 가할 때, 약 0.5 nN이며 1000 V의 전위차일 때, 약 500 μN 이다. 정전기력에서 발생한 힘과 분동으로 발생할 수 있는 최소 실하중 10 μN 과 겹치는 부분이 있으므로 정전기력과 실하중과의 비교 검증은 할 수 있다.

현재 축전기의 dC/dZ 측정을 수행하고 있으며 발란스 제어 방식인 영위법 (null-balancing method)을 이용하여 정전기력과 실하중과의 비교 실험을 수행할 예정이다.

3. 나노힘 교정기

표준기로부터 나노힘에 대한 소급성을 확보하였다고 하더라도 정전기력을 이용한 표준기는 비용도 많이 들고 시스템도 복잡하므로 실질적으로 산업체 등에서 AFM 캔틸레버의 스프링 상수를 결정하거나 각종 나노힘 센서를 교정하는 데에 적합하지 않다. 따라서 나노힘 영역에서 소급성을 유지하진 않지만 상용 정밀 저울을 이용하는 방법이 더 실용적이라고 할 수 있다. 나노힘 교정기에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [3]을 참고하기 바란다.



Fig. 2 Photograph of Nano Force Calibrator (NFC)

Veeco사에서 제작한 두 종류의 캔틸레버의 스프링 상수를 교정하였다. 하나는 Piezolever™로 압저항이 캔틸레버에 삽입되어 있어 캔틸레버 끝단의 변형 또는 끝단에 작용하는 힘에 비례하는 저항 신호를 줄 수 있다. 캔틸레버의 길이는 약 300 μm , 폭

은 50 μm 이며 제조사에서 제공한 명목 스프링 상수 값은 1 N/m이었다.

다른 하나는 Reference Cantilever로 Cantilever-on-Cantilever 방법으로 일반 AFM 캔티레버를 교정할 때 사용한다[4]. 기준으로 사용되는 캔티레버인 만큼 특별한 반도체 공정을 이용하여 비교적 치수가 잘 정의되어 있으며 팁이 없는 직사각형 모양이다. 하나의 칩에 두께, 너비는 같고 길이가 429, 229, 129 μm 로 다른 세 개의 캔티레버가 있으며 본 연구에서는 가장 긴 캔티레버를 교정하였다. 제조사에서 제공한 명목 스프링 상수는 0.711 N/m 이다. Fig. 3(a) 와 Fig. 3(b)는 Piezolever 와 Reference Cantilever 를 각각 나타낸 그림이다.

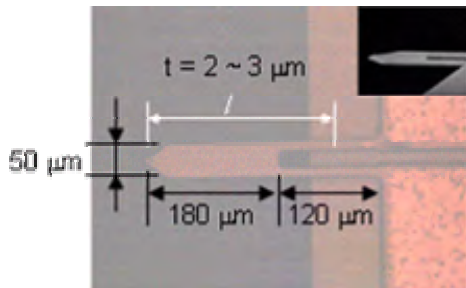


Fig. 3(a): A micrograph of the Piezolever, SEM image is shown in the inset

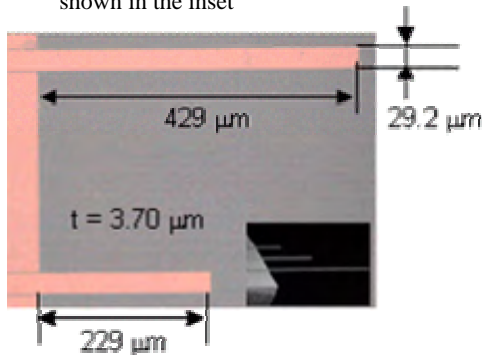


Fig. 3(b): A micrograph of the reference lever, SEM image is shown in the inset

Table 1 과 Table 2 는 각각 Piezolever 와 Reference Cantilever 의 스프링 상수를 교정한 결과이다. 스프링 상수를 얻기 위해 캔티레버를 저울의 하중 버튼에 눌러 저울에서 얻어진 하중 값과 끝단의 변형값을 동시에 기록하였다. (하중, 변형)의 순서쌍을 10 개를 얻어 하중-변형의 그래프를 그린 후 선형 회귀를 통해 기울기 값을 구하고 이 값을 스프링 상수로 하였다. Fig. 4 의 그래프를 보면 힘과 변위의 관계는 선형적이며 최대 비선형성은 0.25 %이었다. 각각의 캔티레버에 대해 스프링 상수를 30 번 구한 후 평균을 구하고 표준편차를 산출하였다.

결과를 보면 알 수 있듯이 Piezolever 의 스프링 상수 값은 명목값과 매우 큰 차이를 보이고 있으며 캔티레버 사이의 편차가 매우 큼을 알 수 있다. 이들 캔티레버는 모두 같은 웨이퍼에서 생산이 되었지만 큰 편차를 보였다.

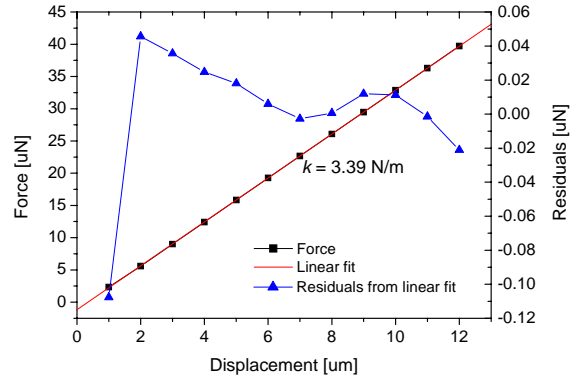


Fig. 4: Force-Deflection graph of a cantilever

Cantilever #	Spring Constant (N/m)	Standard Deviation (%)	Difference from nominal value (%)
1	3.41	0.66	240
2	0.31	0.55	-69
3	0.49	0.67	-51
4	2.32	0.60	132

Table 1 Calibration results of Piezolevers

Cantilever #	Spring Constant (N/m)	Standard Deviation (%)	Difference from nominal value (%)
1	0.658	0.45	-7.5
2	0.701	0.59	-1.4
3	0.685	0.67	-3.5
4	0.655	0.64	-7.8
5	0.693	0.33	-2.5

Table 2 Calibration results of Reference Cantilevers

이에 비하여 Reference Cantilever 의 경우 상대적으로 명목값과 잘 일치하고 있고 캔티레버간의 편차도 적음을 알 수 있다. 이는 캔티레버의 각 치수가 다른 캔티레버에 비해 잘 조절이 되었음을 나타낸다. 하지만 명목값과의 최대 편차는 약 8 % 정도로 다른 캔티레버를 교정하기에는 오차가 큰 편이

라 할 수 있다.

4. 나노힘 센서

나노힘을 측정하고 나노힘 표준기로 발생한 힘을 이용하여 각종 측정기 - 나노 인텐더나 AFM - 을 교정하려면 정밀한 힘 센서가 필요하다. 앞서 교정한 Piezolever 도 하나의 힘 센서가 될 수 있다.

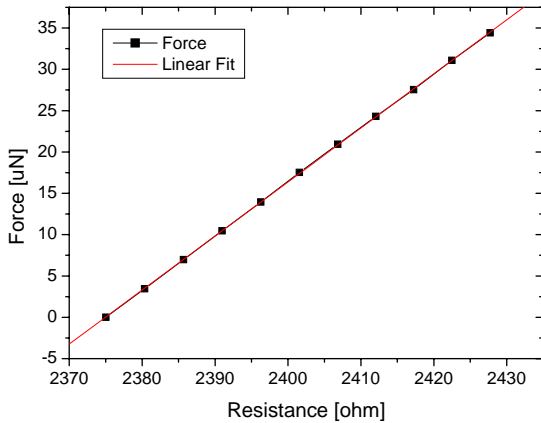


Fig. 5 Force/Resistance characteristics of the Piezolever

Fig. 5 는 NFC 로 구한 Piezolever 의 힘-저항 출력 곡선이다. 이 그래프 또한 선형적인 특성을 보이며 기울기는 $0.655 \mu\text{N}/\Omega$ 이었다. 즉 1Ω 의 출력 변화는 $0.655 \mu\text{N}$ 의 변화에 해당한다. 하지만 Piezolever 는 힘 센서로 설계되었기 보다는 AFM 캔티레버로 설계되었기 때문에 각종 측정기를 교정하기에는 적합하지 않으며 저항 값이 캔티레버의 변형뿐만 아니라 온도에도 민감하게 변하여 정밀 힘 센서로는 적합하지 않다.

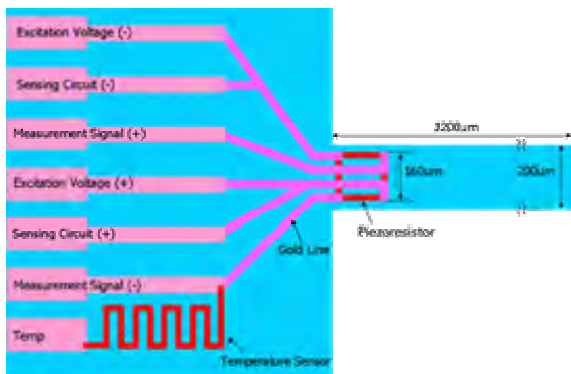


Fig. 6 Schematic of the prototype Nano Force Sensor

Fig. 6 은 현재 제작하고 있는 나노힘 센서의 개략도이다. 캔티레버의 길이는 $1200 \mu\text{m}$, 너비는 200

μm , 두께는 $1 \mu\text{m}$ 로 예상 스프링 상수는 0.005 N/m 이다. 캔티레버 자체에 압저항을 4 개 사용함으로써 완전한 Full-Bridge 회로를 꾸밀 수 있도록 했으며 온도 변화에 덜 민감하도록 설계하였다. 또한 압저항 온도 센서를 칩에 만들어 놓아 온도를 측정하여 출력을 보상할 수 있도록 하였다.

제작이 완료되면 나노힘 표준기 또는 교정기로 특성을 평가할 예정이며 AFM 캔티레버의 스프링 상수 교정에 사용될 것이다.

4. 결론

나노힘의 신뢰성 있는 측정을 위하여 나노힘 표준, 교정, 센서의 세가지 요소가 갖춰져야 한다. 나노힘 표준은 정전기력 방식을 사용하여 구현한다. 나노힘 교정기를 이용하여 상용 AFM 캔티레버를 교정한 결과 명목값과 매우 큰 차이를 보였으며 교정하지 않고 측정할 경우 오차가 매우 클 것으로 예상된다. 또한 나노힘의 보급을 위하여 정밀 나노힘 센서를 제작하고 있다.

참고문헌

1. 김민석, 최인목, 박연규, 강대임, "정전기력을 이용한 나노 힘 표준기," 한국 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 571-574, 2004.
2. 김민석, 최인목, 박연규, 김종호, 강대임, "나노힘이란 무엇인가?," 한국 정밀공학회지, 제 21 권, 제 9 호, pp. 12 - 19, 2004.
3. 김민석, 최인목, 박연규, 최재혁, 김종호, "정밀저울을 이용한 원자힘 현미경 캔티레버의 특성평가," 한국 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 637-640, 2005.
4. Tortonese M., and Kirk M., "Characterization of application specific probes for SPMs," Proceedings of SPIE, Vol. 3009, San Jose/California, pp. 53-60, 1997.