

◆특집◆ 미세 힘 측정 및 응용

나노 힘 측정표준의 국제 연구동향

박연규*, 강대임*, 김종호*

The State of Art in Nano-Force Standards and Measurement

Yon-Kyu Park*, Dae-Im Kang* and Jong-Ho Kim*

Key Words : Nano Force (나노 힘), Force Standards (힘표준), Electrostatic Force (정전기력), Transfer Standard (전달용 표준기), Force Measurement (힘측정), Atomic Force Microscope (원자간힘현미경), Cantilever (외팔보)

1. 서론

반도체 기술의 발달은 수많은 미세 소자의 개발을 가져왔으며, 이는 현대 산업의 많은 변화를 가져 왔다. 아울러 반도체 기술의 개발로 파생된 MEMS(Micro Electro Mechanical System) 기술은 과거에는 불가능하였던 미세한 구조물의 개발을 가능하게 하였다. 이러한 미세 소자 및 구조물은 실리콘과 같은 유연한 재료로 만들어진다.

미세 구조물의 재료학적 특성은 거대 구조물과는 다른 거동을 보인다. 따라서 미세 구조물에 사용되는 재료의 특성을 파악하기 위해서는 거대 구조물 재료의 평가에 사용되었던 일반적인 재료 평가 방법을 대체할 수 있는 새로운 방법이 필요하며, 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 재료 평가의 일반적인 방법은 재료에 일정한 힘을 가하고 그 변형정도를 관찰하는 것이다. 미세 구조물의 재료평가도 이와 같은 범주를 벗어날 수는 없다. 미세 구조물 재료의 평가를 위해서는 미세한 힘을 가하여야 하며, 평가의 정확도를 위해서는 가해지는 힘이 정밀하게 제어 및 측정되어야 함은 자명한 사실이다.

AFM(Atomic Force Microscope)과 같은 표면 형

상 측정 장치는 탐촉자와 표면 사이의 힘을 정밀하게 유지하며 표면의 정보를 측정한다. 따라서, 표면 측정의 정밀도는 탐촉자와 표면 사이의 힘에 대한 제어 정밀도와 밀접하게 관련된다. AFM의 경우 전술한 힘의 정도가 나노 뉴턴 수준이고, 따라서 나노 뉴턴 수준의 힘에 대한 정밀한 제어 및 측정이 필요하다.

생명 공학의 발달과 더불어, 생명체 내의 미세한 힘을 정밀하게 제어하고 측정할 필요가 점차 대두되고 있다. 생명 공학 분야는 나노 뉴턴 수준의 힘 측정 및 제어가 중요한 또다른 분야 중 하나이다.

전술한 바와 같이 나노 힘의 정밀 측정 및 제어는 날로 그 중요성을 더해간다. 힘 측정 및 제어의 정밀도 행상을 위해서는 힘 측정의 평가 기술이 확립되어야 한다. 평가를 통한 기준의 확립이 없는 측정은 사상누각에 불과하기 때문이다. 측정결과가 맞는가에 대한 평가는 모든 측정을 위한 필수조건이다. 힘의 평가를 위해서는 정확한 힘의 발생이라는 표준 확립이 선행되어야 한다. 현재 국내에서는 한국표준과학연구원에서 50 N에서 10 MN의 범위에 걸쳐 힘표준을 확립하고 있다. 그러나, 그보다 작은 범위의 힘에 대해서는 아

* 한국표준과학연구원
Tel : 042-868-5240, e-mail : ykpark@kriss.re.kr

직 국가표준이 확립되지 않은 상태이다. 따라서, 이에 대한 국가 표준의 확립이 시급한 상황이다.

확립된 힘표준을 효과적으로 보급하기 위해서는 전달용 표준기가 사용된다. 전달용 표준기는 정밀한 힘측정이 가능한 센서로서, 각종 힘표준기의 비교 및 힘표준의 소급에 사용된다. 나노 힘의 효과적인 보급을 위해서는 나노 뉴턴 수준의 힘을 정밀하게 측정할 수 있는 전달용 표준기의 개발이 필요함을 알 수 있다.

나노 힘표준의 확립과 나노 힘의 정밀 측정이 가능한 전달용 표준기의 개발은 관련 산업 및 기술의 개발을 위해 필수적인 국가적 과제라 할 수 있다. 따라서, 이와 관련된 선진 표준 기관들의 연구 동향을 살펴봄으로써 현재의 선진 기술 수준을 파악하고 우리나라 관련표준의 확립에 방향을 제시하고자 한다.

2. 미국 NIST 의 연구 동향[1]

현재 미국의 표준기관인 NIST (National Institute of Standards and Technology)에서는 44 N 에서 4.4×10^6 N 의 범위에서 수 10^6 의 불확도로 힘표준을 확립한 상태이다. 이는 질량을 아는 추와 중력 가속도를 이용하여 힘을 발생시키는 실하중 힘표준기를 통하여 달성되었다. 이보다 큰 범위의 힘에 대하여는 유압식 표준기를 사용하고 있다. 0.5 mg 의 질량을 이용한다면 약 5×10^6 N 의 실하중 힘을 발생시킬 수 있다. 그러나, 현재 NIST 에서는 0.5 mg 보다 작은 질량에 대한 교정을 수행하지 않으며, 또한 이보다 작은 질량은 다루기가 힘들며 그 교정 불확도가 증가한다는 사실을 고려할 때, 5×10^6 N 보다 작은 힘을 실하중 방식을 이용하여 높은 정밀도로 구현한다는 것은 현실적으로 많은 어려움을 갖는다. 실제로, 10^7 N 정도의 힘을 실하중 방식으로 구현할 때, 그 상대 불확도는 약 10^2 정도일 것으로 예측된다.

NIST 에서는 2000 년 10 월 10^8 N 에서 10^2 N 까지의 힘 발생을 목표로 하는 5 년 기한의 프로젝트를 시작했다. 이 프로젝트의 주 목표는 10^6 N 이하의 힘 발생을 10^4 의 불확도 수준으로 달성하는 것이다. 이를 위하여 NIST 에서는 정전기력을 이용하여 원하는 크기와 방향의 힘을 발생시킬 수 있는 장치를 개발하고 있다. 이는 특별하게 설계된 콘덴서를 이용하는 것으로, 이로부터 작은 힘

을 실하중 방식을 이용하여 구현할 때의 어려움을 극복할 수 있다.

2.1 기본 원리

콘덴서에 가해지는 전압을 일정하게 유지한 상태에서, 콘덴서의 두 전극 사이의 간격을 변화시키는데 필요한 기계적 일은 다음과 같이 표현된다.

$$dW = Fdz = \frac{1}{2}V^2dC \quad (1)$$

여기서, dW 는 에너지 변화량을, F 는 기계적 힘을, dz 는 간격의 변화량을, V 는 전압을, dC 는 콘덴서의 변화량을 나타낸다. 따라서, 기계적 힘은 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

(2)식으로부터, 기계적 힘은 콘덴서에 가해지는 전압과 콘덴서값의 거리에 대한 기울기로부터 계산될 수 있음을 알 수 있다.

2.2 장치의 기본 요소

정전기력 발생기는 제작된 장치에 전압을 인가함으로써 정밀한 힘을 발생한다. 예를 들어, 콘덴서값의 거리에 대한 기울기가 1 pF/mm 라면 1 V 의 전압 인가 시 5×10^{-10} N 의 힘을 발생시킬 수 있으며, 1000 V 인가 시 5×10^{-4} N 의 힘을 발생시킬 수 있다. 전압 인가 및 측정의 정확도 수준, 콘덴서값의 거리에 대한 기울기 측정 시 필요한 콘덴서값 측정 및 레이저 간섭계를 이용한 거리 측정의 정확도 수준을 고려할 때, 5×10^{-10} N 의 힘 발생 시 약 10^{-14} N 의 불확도 수준이 가능하다.

콘덴서의 형상은 정밀한 콘덴서값의 거리에 대한 기울기의 측정이 가능하도록 최적화될 수 있다. 두개의 무한히 긴 동심축을 갖는 실린더로 구성되는 콘덴서는 단위 길이당 일정한 콘덴서값을 나타낸다. 따라서, NIST 에서는 이와 비슷한 구조인 두개의 긴 실린더로 구성된 콘덴서를 사용하였다. 바깥의 실린더는 고정된 상태에서, 안쪽의 실린더는 자유롭게 직선운동을 할 수 있는 구조이다. 힘의 발생은 안쪽의 실린더를 통해 이루어진다.

정전기력 발생기는 정확한 전압을 인가하여 힘을 발생시키는 데도 사용될 수 있지만, 콘덴서 전극의 간격을 일정하게 유지하는 제어를 수행하며 투입되는 전압을 모니터링 함으로써 힘을 측정

하는데도 사용될 수 있다. 따라서, 정밀하게 교정된 질량 표준을 정전기력 발생기에 얹은 후 힘을 측정함으로써, 정전기력과 실하중을 비교할 수 있다. 이 때, 정전기력의 발생 방향은 중력의 작용 방향, 즉 수직 방향과 10 mrad 이내로 일치되어야 한다. 또한, 초기 상태에서 안쪽의 실린더를 지지하기 위한 스프링이 필요한데, 이에 의한 스프링 복원력은 충분히 작아야 한다.

2.3 구현 장치

상기의 고려를 통해 구현된 정전기력 발생기는 Fig. 1 과 같다.

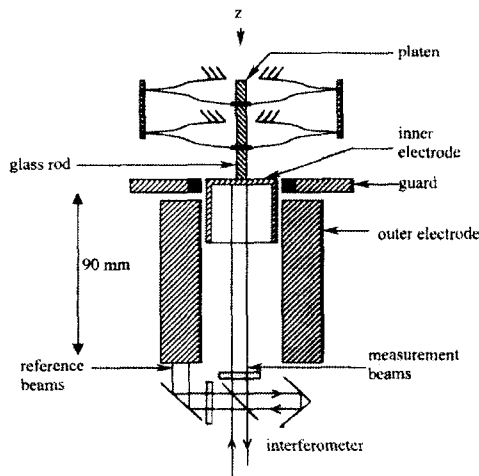


Fig. 1 Schematic of an electrostatic spring balance.

초기 상태에서 안쪽 실린더를 지지하기 위한 스프링으로는 compound-rectilinear leaf 스프링이 사용되었으며, 이 스프링은 적경 2 mm, 길이 46 mm 의 유리 막대를 지지하고 가이드하는 역할을 한다. 유리 막대의 위쪽 끝은 스프링의 위로 돌출되어 힘발생기의 가진판과 결합되며, 아래쪽 끝은 안쪽 실린더와 결합된다. 콘덴서의 안쪽 전극 역할을 하는 안쪽 실린더는 6061-T6 알루미늄으로 만들어졌으며, 그 직경은 15 mm, 길이는 15 mm, 벽 두께는 0.25 mm 이다. 안쪽 실린더 내부의 상부 평면은 다이아몬드 경면 가공되었는데, 이는 레이저 간섭계를 이용한 길이 측정의 반사면으로 사용하기 위함이다. 상기 장치는 외부 실린더와의 상대 위치를 정밀하게 맞추기 위한 5 자유도 stage 위에 장

착된다.

외부 실린더의 길이는 90 mm, 외부 직경은 44.5 mm, 다이아몬드 경면 가공된 내부의 직경은 15.9 mm 이다. 외부 실린더의 아래면 역시 경면 가공되었는데, 이는 레이저 간섭계의 기준 거울로 사용하기 위함이다.

상기 장치와 같은 직경을 갖는 두개의 무한히 긴 실린더로 구성된 콘덴서의 단위 길이당 콘덴서값은 0.98 pF/mm 로 계산된다.

실제로 장치를 구성한 후 정밀 측정을 실시하였다. 그 결과 콘덴서값의 거리에 대한 기울기는 $dC/dz = 0.94466 \pm 0.00005$ pF/mm 로 측정되었으며, 사용된 스프링 구조의 스프링 상수는 $k = 13.42 \pm 0.64$ N/m 로 측정되었다.

5 mg 의 표준 질량에 대하여, 실하중 힘과 정전기력에 대한 비교 측정을 수행하였다. 표준 질량의 교정값은 5.00085 ± 0.00027 mg 이었고, 이에 중력가속도를 곱한 후 부력 보정을 통하여 계산된 실하중값은 $(48.9921 \pm 0.0026) \times 10^{-6}$ N 이었다. 측정된 정전기력은 $(48.841 \pm 0.051) \times 10^{-6}$ N 이었으며, 이로부터 전기적 힘과 기계적 힘 사이의 편차는 약 3×10^{-3} 이 됨을 알 수 있다.

제작된 정전기력 발생기의 사진을 Fig. 2 에 나타내었다.



Fig. 2 Photograph of an electrostatic spring balance.

2.4 향후 연구 계획

정전기력 발생을 통해 확립된 나노 수준의 힘

표준을 효과적으로 보급하기 위해서는, 우수한 성능의 전달용 표준기가 필요하다. 전달용 표준기는 고 정밀도의 힘센서로서, 하나의 힘표준기와 다른 힘표준기 또는 교정기를 비교할 때 중간 매개 역할을 한다.

현재 NIST 에서는 전달용 표준기와 관련된 연구를 계획중에 있다. 전달용 표준기의 후보로는 외팔보 콘덴서와 상용의 피에조 저항식 AFM 외팔보를 고려중이다.

정밀한 측정을 위해서는 전기 잡음, 음향 잡음, 진동으로부터 격리된 실험실이 필요하다. 이를 위하여 NIST 에서는 2.4 m × 2.4 m × 5 m 크기의 전기적 및 음향적으로 차폐된 실험실을 구성하고, 그 안의 방진 테이블 위에서 측정을 수행하고자 한다. 실험실 내의 온도, 압력, 습도는 정밀제어되며 상시 모니터링 된다.

3. 독일 PTB 의 연구 동향[2,3]

독일의 표준기관인 PTB(Physikalisch-Technische Bundesanstalt)에서는 AFM 의 탐촉자로 쓰이는 외팔보에 대한 평가를 수행하였다. 상용으로 만들어진 피에조 저항을 포함하는 AFM 외팔보에 대한 특성 평가를 수행하고, 이를 이용한 힘측정을 시도하였다. Fig. 3 은 AFM 외팔보의 힘센서를 나타내며, Fig. 4 는 그 중에서 힘 측정 회로 부분을 확대한 그림을 나타낸다. Fig. 4 에서 화살표로 표시한 부분은 힘 측정을 위한 피에조 저항이다.

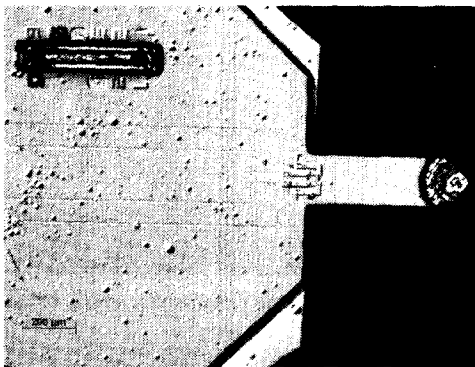


Fig. 3 Force sensor (commercial AFM-cantilever).

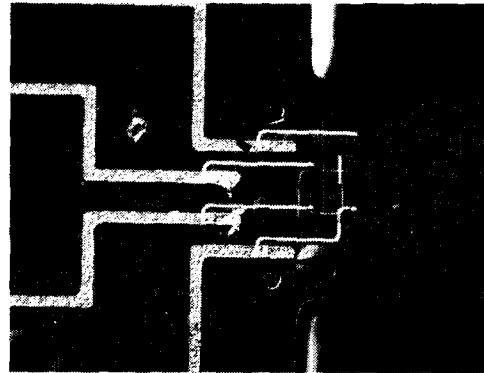


Fig. 4 Wheatstone bridge on a commercial Si-cantilever.

3.1 평가 시스템 및 측정 결과

AFM 외팔보 힘센서를 평가하기 위한 장치는 Fig. 5 와 같다. 외팔보의 시작 부분은 피에조 장치에 의해 정밀한 1 차원 운동이 가능한 stage 에 장착되었다. 1 차원 stage 의 위치 분해능은 1 nm 이고, 위치 재현도는 5 nm 이다.

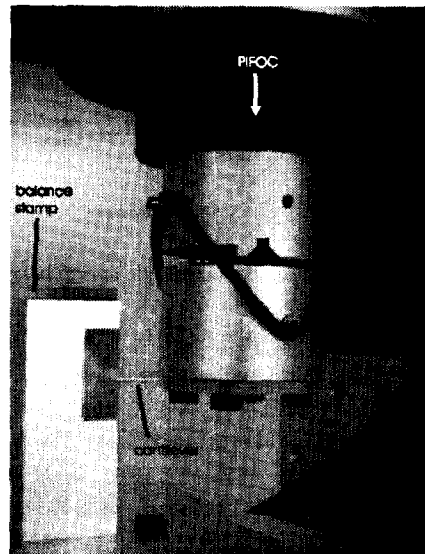


Fig. 5 Experimental set-up for the beam deflection and force measurement.

1 차원 stage 가 상하 왕복 운동을 할 때, 외팔보의 반대쪽 끝(외팔보 팁 부분)은 상용 저울 위에 설치된 어댑터에 의해 그 운동이 일정한 범위로 제한되며, 따라서 외팔보의 팁은 저울에 힘을 야기시킨다. 사용된 저울의 분해능은 0.2 μ N 이며

반복도는 0.5 μN 이다.

Fig. 3 에 나타낸 AFM 외팔보 힘센서에 대한 평가 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 외팔보의 변위는 1 차원 stage 의 이송 거리로부터 알 수 있으며, 실제 힘은 저울로부터 측정된다. 또한, AFM 외팔보 힘센서의 출력신호는 전압으로 표시되었다. 실제 힘과 출력전압 모두 변위에 대해 선형적인 기동을 보여준다. 힘과 출력전압 사이에는 $(1588 \pm 3.1) \mu\text{N/V}$ 의 관계를 갖는다. 또한, 측정 결과로부터 외팔보의 스프링 상수는 $k = 461.8 \text{ N/m}$ 임을 계산할 수 있다.

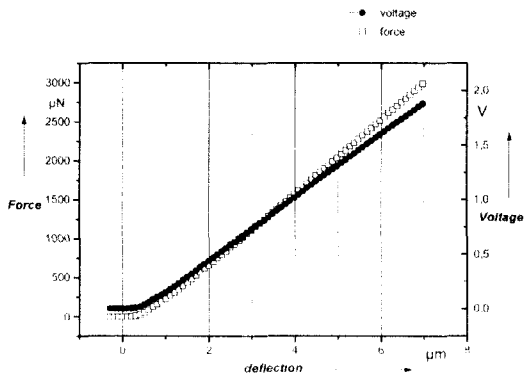


Fig. 6 Force and voltage characteristic of the AFM-cantilever.

3.2 AFM 외팔보를 이용한 힘 측정



Fig. 7 The fiber probe (top) and the AFM-cantilever (left).

PTB 에서는 평가된 AFM 외팔보를 이용하여 형상 측정에 사용되는 파이버 프로브의 특성을 평가하였다. Fig. 7 은 실험 장면을 나타낸다. 실험 시, 파이버 프로브를 외팔보 팁으로 최대한 밀착한 다음, 파이버 프로브를 외팔보 방향으로 전진 시키며 파이버 프로브의 이송 거리와 외팔보의 출력신호를 측정하였다. 이를 통해 파이버 프로브의 특성을 평가할 수 있었다.

PTB 에서는 재료의 특성 평가 등에 사용되는 탐침자 측정기의 특성 역시 AFM 외팔보를 이용하여 평가하였다. 이를 위하여 Fig. 8 과 같이 제작된 실린더에 AFM 외팔보의 아래면이 위로 향한 상태로 장착하였다. 이 때, 실린더는 탐침자 측정기에 장착하였는데, AFM 외팔보의 방향이 탐침자 측정기의 이송 방향과 같게 하였다. Fig. 9 는 AFM 외팔보 아래면의 사진을 나타낸다. 그림에서 화살표 방향이 측정 진행 경로를 나타낸다. 사진에서 AFM 외팔보 아래면의 표면이 거친 것은 외팔보 제작 시 식각에 의한 결과이다.

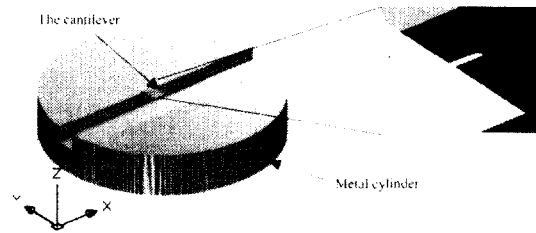


Fig. 8 The cantilever face down

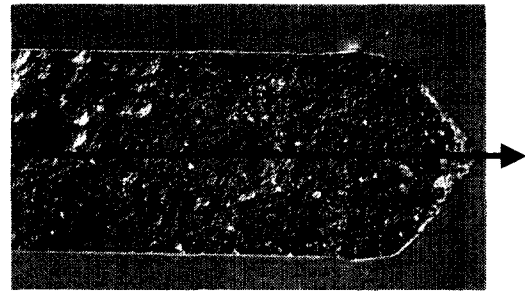


Fig. 9 Backside of the AFM-cantilever showing the surface roughness.

4. 결론

미국의 NIST 와 독일의 PTB 에서 수행중인 나

노 힘 관련 연구 동향을 살펴보았다. 선진 연구기관들은 관련 산업의 요구에 대응하여 신속하게 나노 힘 표준 확립 및 보급과 관련된 연구를 수행하고 있다.

미국의 NIST 는 정전기력을 이용한 나노 힘표준기를 개발중에 있으며, 표준 보급을 위한 전달용 표준기의 개발을 추진할 계획이다. 독일의 PTB 는 AFM 외팔보의 평가 기술을 개발하고, 이를 이용한 힘 측정을 시도하였다. 이를 통하여 AFM 외팔보에 대한 나노 힘 전달용 표준기에의 적용 가능성을 검토하였다.

나노 힘표준과 관련된 국내의 연구는 아직 이루어지지 않은 상황이다. 그러나, 선진국에서도 최근에야 나노 힘표준 관련 연구를 시작했음을 인식할 때, 선진국과 우리의 기술 격차는 크지 않다고 판단할 수 있다. 따라서, 우리도 관련 연구를 신속히 시작한다면 선진국과 대등한 기술의 확보가 가능할 것이다. 관련 기술의 발전 속도와 필요성을 감안할 때, 관련 연구의 조기 착수가 필요한 상황이다.

참고문헌

1. D.B. Newell, J.R. Pratt, J.A. Kramar, D.T. Smith, L.A. Feeney and E.R. Williams, "Si Traceability of Force at the Nano Newton Level," 2001 NCSL International Workshop & Symposium, 2001.
2. W. Hoffmann, S. Loheide, T. Kleine-Besten, U. Brand and A. Schlachetzki, "Methods of Characterising Micro Mechanical Beams and its Calibration for the Application in Micro force Measurement System," Proc. of the MICRO rec 2000 Conference, pp.819-823, 2000.
3. L. Doering and U. Brand, "Si-Cantilevers with Integrated Piezo Resistive Elements as Micro Force Transfer Standards," Pro. Nanoscale 2001, 2001.