

◆특집◆ 힘 측정 및 응용

나노 힘이란 무엇인가?

김민석*, 최인목**, 박연규**, 김종호**, 강대임***

What Is Nano-Force Metrology?

Min Seok Kim*, In Mook Choi**, Yon Kyu Park**, Jong Ho Kim** and Dae Im Kang***

Key Words : Nanonewton/piconewton force (나노/피코 힘), Atomic Force Microscopy (원자간힘 현미경학), Calibration (교정), Force Standards (힘 표준), Transfer Standard (전달용 표준기), Force Measurement (힘 측정), Cantilever (외팔보), Electrostatic Force (정전기력)

1. 서론

수십 MN(10^6 N) 이상의 하중을 다루는 건설 산업 및 중공업으로부터 수십 kN ~ 수 MN 의 힘을 사용하는 재료시험기, 프레스, 및 공장 자동화 설비 그리고 수십 N ~ 수 kN 용량의 상업용 저울 까지 힘 측정은 산업의 근간이 되는 기술이며 우리 실생활에 폭 넓게 이용되고 있다. 제품을 생산하고 대형 구조물을 건설하는 공장이나 건축현장에서 힘을 정확히 측정한다는 것은 공정을 일정하게 유지 관리하고 있다는 표시이므로 제품의 품질 관리나 건축물의 안전관리의 척도가 된다. 이러한 거시 세계와 더불어 지난 20 여년 간 마이크로/나노 기술의 발달로 마이크로/나노 미터 스케일에서 물질을 조작하고 구조물을 생성하는 것이 가능해졌으며 최근에 나노 기술과 생명공학 기술의 융합을 통해 나노 크기의 생체 분자 및 단백질의 메커니즘을 규명하기 위한 노력이 진행되고 있다.

다루고자 하는 영역이 작아지면 작아질수록

상대적으로 힘 측정의 중요성이 커지게 된다. 그 이유는 시스템이 작아질수록 그 자체의 질량에 의한 관성 및 중력보다 마찰력, 표면장력, 공기의 저항, 정전기력, 반데르 발스(van der Waals)힘 등의 영향이 커지기 때문이다. 따라서 마이크로 및 나노미터 수준의 시스템을 제작하고 제어하기 위해선 거시 세계와는 다른 접근을 요하며 여기에 있어서 힘의 정확한 측정 및 제어가 매우 중요해지고 있다.

미시 세계에서 작용하는 힘은 생체 분자에서 작용하는 수 pN (10^{-12} N) 정도의 크기부터[1] MEMS(Micro Electro Mechanical System) 구조물에 작용하는 수백 μ N (10^{-6} N)의 크기까지 범위가 넓다. 나노 힘이란 엄밀하게 말하면 나노 뉴턴 (nN)의 크기를 가지는 힘을 말하지만 나노 세계에서 존재하는 수 pN 에서 수 mN 까지의 미세 힘을 총칭하기로 한다.

전술하였듯이 거시 세계이던 마이크로/나노 세계이건 간에 신뢰성 있는 물질을 제조하고 제품을 생산하기 위해선 정확한 힘 측정 및 평가가 이루어져야 하며 그에 따르는 표준이 확립되어 있어야 한다. 한국표준과학연구원에서는 힘의 정확한 측정 및 보급을 위해 50 N에서 10 MN 범위의 거시 힘에 대한 힘표준을 확립하고 있다. Fig. 1에 나타내었듯이 거시 힘에 대해선 국제표준단위(SI Unit)에 소급 가능한 힘을 정확히 발생할 수 있는 표준

* 한국표준과학연구원 물리표준부 질량·힘 그룹

Tel. 042-868-5242, Fax. 042-868-5249

Email mink@kriss.re.kr

** 한국표준과학연구원 물리표준부 질량·힘 그룹

*** 한국표준과학연구원 물리표준부장

Email dikang@kriss.re.kr

힘 및 토크 표준 특히, 나노 힘 표준 및 보급 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다.

기, 힘표준을 보급하기위한 전달용 표준기, 측정기를 교정할 수 있는 힘 교정기, 교정 대상인 힘 측정기, 힘 측정기가 사용되는 시험기, 그리고 최종적으로 재료 평가에 이르는 소급 체계가(traceable system) 갖추어져 있다. 하지만 그 이하의 힘에 대해서 아직 표준이 확립되어 있지 않은 상태이다.

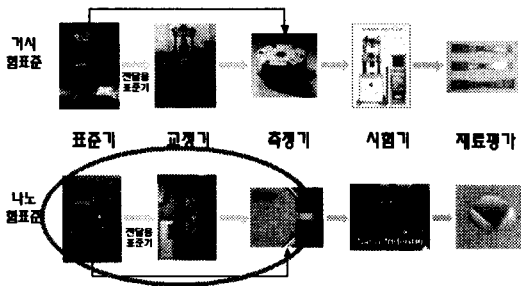


Fig. 1 Diagram illustrating how to maintain and disseminate force standards in a macro-force and nano-force region

한국표준과학연구원에서는 마이크로/나노 세계에서 힘 표준의 중요성을 인지하고 2002년부터 해외연구동향의 파악² 및 기초연구를 수행하였고 정전기력을 이용한 표준기를 제작³ 하고 있다. 연구의 목표는 나노 뉴턴까지 힘표준 및 소급 체계를 확립하여 나노 관련 산업체나 학계에 힘교정 서비스를 제공하는 것이다.

본 원고에서는 나노 힘 측정 기술에 대한 전반적인 흐름과 기술의 속성에 대해 살펴보고 한국표준과학연구원의 연구 현황을 소개하고자 한다. 그리고 나노 힘표준의 전망에 대한 고찰로 끝을 맺고자 한다.

2. 나노 힘 측정 기술

나노 힘 측정 기술은 크게 기술의 속성에 따라 나노 뉴턴크기의 힘을 정확히 발생하고 측정할 수 있는 나노 힘 표준기술, 표준기에 의해 발생한 힘을 전달 또는 보급하기 위한 전달용 표준기 제작(나노 힘 센서)기술, 그리고 나노 힘 응용기술로 분류할 수 있다.

2.1 나노 힘표준 기술

힘을 구현하는 쉬운 방법 중에 하나는 교정된

질량으로부터 실하중을 발생시키는 것이다. 현재 한국표준과학연구원에서 교정이 가능한 최소 분동 크기는 1 mg (10 μN)으로 2×10^{-3} 의 상대 불확도를 갖고 있다. 더 작은 질량도 이론상으로 교정이 가능하나 취급이 어렵고 불확도가 증가하기 때문에 실하중으로 나노 뉴턴 수준의 힘을 구현하기 어렵다. 또 다른 방법은 SI의 전기 단위로부터 유도되는 힘으로 구현하는 것이다. 이 힘으로는 전자기력과 정전기력이 있는데, 질량표준을 위해 사용되는 질량 비교기(mass comparator) 등에서 사용하는 전자기력은 정전기력에 비해 더 큰 힘을 구현할 수 있지만 힘 발생인자의 정확한 결정이 어렵기 때문에 나노 힘 표준을 위해서는 정전기력이 더 적합할 것이다.

미국표준과학연구원(NIST)에서는 2000년부터 microforce team을 조직하여 정전기력을 이용한 나노 힘표준기를 개발하였다⁴. Fig. 2는 구현된 힘표준기의 개략도를 나타낸다.

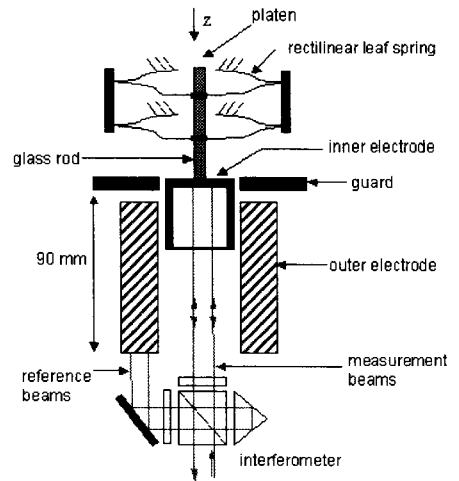


Fig. 2 Schematic of an electrostatic force balance

두개의 동심 실린더로 구성된 축전기를 이용하여 실린더간의 전위차의 제곱에 비례하는 정전기력을 발생시키고 이 정전기력과 platen에 가해지는 외부 힘과 평형을 이루도록 제어함으로써 힘을 측정하고 있다. 평형 상태에서 힘의 방정식은 다음과 같다.

$$F = \frac{1}{2} V^2 \frac{dC}{dz} = k \cdot z \quad (1)$$

여기서, V 는 축전기 양단의 전위차, C 는 축전기의 정전용량, z 는 중력방향의 변위, 그리고 k 는 가이드의 스프링 상수이다. 자세한 동작원리는 참고문헌^{2,3}을 참고하기 바란다.

정전기력 나노 힘표준기를 구현하는 요소기술로는 내부전극을 지지하는 스프링 가이드 설계 및 제작기술, 정전기력 발생기술 및 평가기술, 그리고 내부전극의 변위를 측정하는 레이저 간섭계 기술로 나눌 수 있다.

2.1.1 가이드 설계 및 제작기술

스프링 가이드는 초기상태에서 내부전극을 지지하고 중력방향으로 자유롭게 직선운동을 할 수 있도록 하는 기구로서 매우 작은 힘을 측정하기 위해선 스프링의 복원력이 충분히 작아야 한다. 복원력이 작으면 작을수록 작은 힘에 대해 내부전극이 움직이므로 힘 측정 분해능을 높일 수 있다. 가이드에 적합한 구조로는 중력방향 이외의 방향에 대해 큰 강성을 갖도록 하는 것이 바람직하다. 이러한 목적을 위해 사용되는 메커니즘 중에 가장 우수한 것은 Fig. 3 과 같은 Roberval 메커니즘이며 전자저울에서 채용하고 있다. 측정의 분해능을 높이기 위해 수직방향의 스프링 상수는 매우 작게 설계하고 분동의 위치에 대한 반복성을 위해 Load receptor 에 가해지는 모멘트 및 비틀림에 대한 스프링 상수가 매우 커서 코너 로딩 효과를 최소화 할 수 있다. 탄성 굽힘체(Flexure)를 이용한 구조와 안쪽으로 기울인 빔의 구조를 사용하는 수정된 Roberval mechanism 을 사용하게 되면 수직 힘에만 매우 민감한 메커니즘을 제작할 수 있다⁵.

NIST 에서 2 차 prototype 으로 제작되는 정전기력 힘표준기에는 Fig. 4 에 나타내었듯이 8 개의 cross-strip flexure pivot 을 사용하여 양팔저울 형의 평행운동 메커니즘을 구현하였다⁶. 사용한 pivot 은 상용제품으로 강성은 0.0013 Nm/rad 이었으며 100 mm 길이를 갖는 팔 끝에서의 유효 감도는 0.016 N/m 이다. 양팔저울 형의 장점은 대칭 구조인 점에 있다. 따라서 내부 전극의 자체 하중은 반대쪽 팔에 똑 같은 내부 전극을 달아주면 해결

되며 수직 방향의 진동에 강인하다. 또한 온도변화에도 둔감하게 된다. 하지만 하나의 몸체로 제작할 수 있는 Roverval 방식에 비해 pivot 과 팔을 연결하는 부위에서의 미끄러짐이나 비탄성 효과로 이력현상과 비선형성이 클 수 있다.

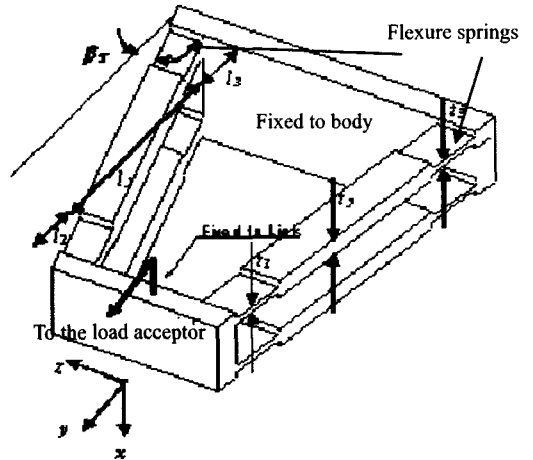


Fig. 3 Roberval mechanism for nano-force measurement

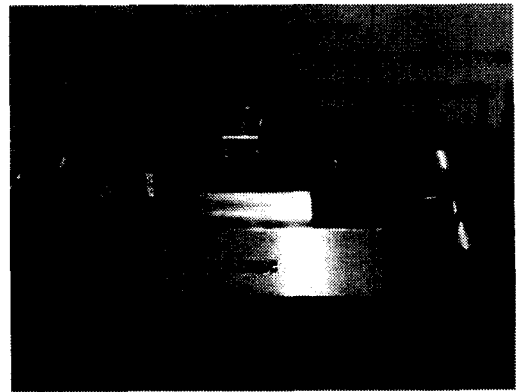


Fig. 4 Flexure balance mechanism

전술한 내용으로부터 유추할 수 있겠지만 가이드의 중요한 성능(민감도, 이력, 비탄성 특성)을 결정하는 것은 탄성 굽힘체이며 이것의 가공 및 열처리 그리고 조립이 매우 중요하다. 굽힘체를 최대한 얇게 하여 쉽게 잘 휘 수 있도록 하고 조립을 할 때, 굽힘체에 비틀림이 가해지지 않도록 조심해야 한다.

2.1.2 정전기력 발생 및 측정기술

반지름에 비하여 충분히 긴 동심 축전기는 길이에 비례하는 정전용량을 가진다. 따라서 길이 방향에 대한 정전용량의 변화율, dC/dZ 는 내부와 바깥 원통의 반지름, 그리고 매질의 유전율(permittivity)에 의해서만 결정이 되는 상수 값이다³. 따라서 미리 측정해 두어 결정해야 할 값이다. 축전기의 정전용량은 1 kHz 브릿지 회로를 이용하는 상용 정전용량 측정기를 사용하여 pF 용량을 10^{-6} 의 불확도로 측정 가능하다. 또한 내부전극의 변위를 레이저 간섭계로 측정하면 10^{-7} 이내의 불확도로 측정 가능하므로 dC/dZ 는 10^{-6} 불확도로 구할 수 있다.

그러나 앞 절에서 언급한 불확도를 구현하려면 많은 주의를 기울여야 한다. 첫째로 두 원통의 정렬 상태이다. 원통의 중심은 수 마이크로 미터 수준에서 일치해야 하며 두 원통의 평행도가 잘 맞고 중력 방향에 평행이어야 한다(평행도 오차 5 mrad 이내). 또한 레이저 빔과 내부 전극의 윗면(레이저 빔이 반사되는 면)과 수직이어야 한다. 둘째로 정전용량 측정 기술이다. 내부 전극과 바깥 전극에 전압을 가하기 위해서 전선을 연결해야 하는데 바깥 전극은 고정되어 있으므로 선에 의한 영향이 없지만 안쪽 전극은 자유롭게 움직여야 하므로 선이 연결되면 스프링 가이드의 강성에 선의 강성까지 더해지게 된다. 따라서 최대한 길고 직경이 작은 선을 사용하여 연결해야 한다. 또한 부유용량에 의한 오차를 최대한 줄이기 위해 선의 배치 및 주위 환경으로부터의 차폐가 중요하며 선 주위의 물체 표면에 전하가 분포하여 영향을 주지 않도록 그라운드 처리가 필요하다. 셋째로 공기의 유전율을 일정하게 유지하는 기술이다. 유전율은 온도, 압력, 습도에 따라 바뀌므로 여기에는 환경 제어 기술이 필요하게 된다. 아니면 진공 중에서 측정하는 방법을 고려할 수 있는데, 이때는 진공에서 방전이 일어나지 않도록 전극을 디자인 해야 한다. 또한 힘표준기 전체가 진공에서 동작하여야 하므로 모든 부품 및 시스템을 진공 중에서 사용할 수 있는 것으로 교체해야 하는 어려움이 있다.

2.1.3 변위 측정 기술

미약한 힘에 반응하여 움직이는 내부전극의 변위를 정밀하게 측정하면 할수록 힘 측정의 분해능은 높아진다. 표준기는 항상 평형상태에서 동작

하므로 내부 전극의 움직이는 범위는 수십 마이크로미터 이내이다. 정밀 변위 센서 중에 안정성이 좋고 분해능이 우수한 정전용량 변위 센서를 고려할 수 있으나 내부전극의 변위를 측정하기 위해 센서를 축전기 내에 삽입하게 되면 축전기의 정전용량에 영향을 끼치게 되므로 좋지 않다. 따라서 정전용량 측정에 영향을 미치지 않고 비접촉 측정이 가능하며 나노미터 이하의 분해능이 가능한 HeNe 레이저 간섭계가 적합하다고 할 수 있다.

레이저 간섭계가 제 성능을 발휘하기 위해선 환경에 대한 주의가 필요하며 공기 중에서 사용하면 공기 굴절율속을 이용하여 보상을 주어야 한다. 또한 사경로(dead path)에 의한 오차를 최소화하기 위해 차동 경로 간섭계(differential-path interferometer)를 사용하는 것이 좋다⁷. 레이저 빔이 반사되는 내부전극의 안쪽면은 최대한 반사율이 높도록 경면 가공해야 한다. 만약 반사율이 낮아 레이저 광이 산란 되면 측정 신호가 안 좋을 뿐만 아니라 열이 발생되어 주변의 공기를 데우게 되므로 국소적으로 난류가 형성되어 내부 전극의 움직임에 영향을 끼칠 수 있다.

변위 측정의 분해능을 더 올리려면 주파수 추적형 파브리-페롯 간섭계(Frequency-tracking Fabry-Perot interferometer)를 사용하여도 된다. 측정영역이 수십 um 정도 이고 분해능은 1 pm 수준이다[8]. 하지만 시스템이 복잡해지는 단점이 있고 또한 스프링 가이드가 매우 작은 변위에서 비선형적인 거동을 보일 수 있기 때문에 1 pm 으로 변위를 측정한다고 해도 힘 측정의 분해능이 비례하여 높아진다고 보기 어렵다.

2.2 나노 힘센서 기술(전달용 표준기)

전술한 바와 같이 힘표준기에서 발생한 힘을 산업체나 고정기로 보급하기 위해서 거시 힘에서의 로드셀과 같은 나노 힘 측정기가 필요하다. 표준기가 매우 정확한 힘을 발생하더라도 산업체에서나 학계에서 표준기 급의 정전기력 측정기를 구비할 수도 없을 뿐더러 바로 측정하고자 하는 곳(가령 AFM 에서의 힘 측정)에 이용할 수 없기 때문이다. 따라서 이러한 힘센서를 제작하고 평가하는 기술은 나노 힘의 측정에 매우 중요하다고 할 수 있다.

거시 힘을 측정하는 로드셀은 힘을 받으면 변형을 일으키는 감지부와 그 변형을 감지하는 스트

라인 게이지로 구성되어 있다. 나노 힘 센서도 마찬가지로 기본적인 원리는 동일하다. 다만 MEMS 공정을 이용하여 제작하는 점이 다르다. 힘 센서의 구조는 외팔보(cantilever)형이 주종을 이루고 있으며 감지부의 변형을 측정하는 방법으로는 압저항(piezoresistor)를 이용하거나 정전용량의 변화를 이용한다. 지금까지 나노 힘센서 제작 및 평가 기술은 여러 선진 표준기관을 중심으로 연구가 이루어져왔다. 따라서 본 원고에서는 표준기관 별로 연구 결과에 대해 논의 하고자 한다.

2.2.1 독일 PTB의 마이크로 힘 센서⁹

Fig. 5 는 독일의 표준기관인 PTB(Physikalisch Technische Bundesanstalt)에서 제작한 마이크로 힘 센서를 나타낸 것이다. 캔틸레버 형이며 최대 변형이 발생하는 외팔보 지지대 부근에 압저항을 삽입하여 힘에 비례하는 전기 신호를 얻는다. AFM 캔틸레버도 압저항이 삽입된 제품이 출시되고 있으나 크기가 너무 작아 나노 인텐터나 다른 프로브를 교정할 때 어려움이 따르므로 힘 센서로 쓰기에 부적합하다. 이 문제를 고려하여 제작된 캔틸레버는 길이가 5 mm, 너비가 0.2 mm로 쉽게 교정이 가능하도록 하였다. 또한 Fig.5 의 삽입 그림에서 볼 수 있듯이 Full-bridge 회로를 위해 4 개의 압저항이 삽입되어 2 개의 저항은 힘에 의한 변형을 받고 나머지 2 개의 저항은 dummy 로 변형을 받지 않으면서 온도의 변화에 따른 출력변화를 보상해주는 역할을 하게 된다.

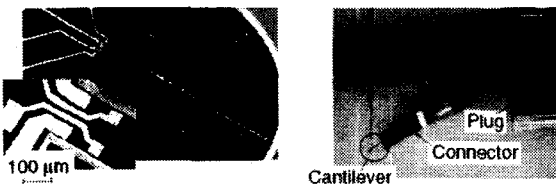


Fig. 5 Piezoresistive cantilever for micro-force measurement

정밀저울과 1 차원 스테이지를 이용하여 제작된 캔틸레버를 교정한 결과 스프링 상수 $k = 7.604 \pm 0.007 \text{ N/m}$ 가 얻어졌으며 힘-출력 그래프에서 얻어지는 힘 민감도 값은 $18.18 \pm 0.04 \text{ V/N}$ 이며 힘 측정의 불확도는 μN 의 영역에서 $\pm 0.22 \%$ (1σ)로 보고하였다.

2.2.2 미국 NIST의 미세 힘 센서¹⁰

NIST에서는 1 mN ~ 10 mN 영역에서 서로 다른 타입의 힘 측정센서, NIST에서 디자인하고 제작한 정전용량 셀과 상업화된 캔틸레버형 힘센서(AE801, SensorOne™)의 특성을 비교하였다. Fig. 6(a)와 6(b)은 각각 정전용량 셀과 압저항이 삽입된 센서의 사진이다. 정전용량 셀은 그림에서 보듯이 청동 외관으로 덮여있지만 안에는 길이 15 mm, 너비 20 mm의 캔틸레버가 장착되어 있다. 캔틸레버에는 금코팅이 되어있어 반대편 고정 캔틸레버와 함께 축진기를 구성하고 있다. 외부에서 힘이 가해져 캔틸레버가 움직이면 전극의 간극이 달라지므로 정전용량이 바뀌게 된다. 압저항 캔틸레버는 5.0 mm 길이, 0.95 mm 너비, 그리고 0.15 mm의 두께를 가진 사각형의 실리콘 빔으로 이루어져 있고 빔의 앞면과 뒷면에 이온 주입공정으로 만든 1 kΩ 정도의 압저항이 장착되어 있다.

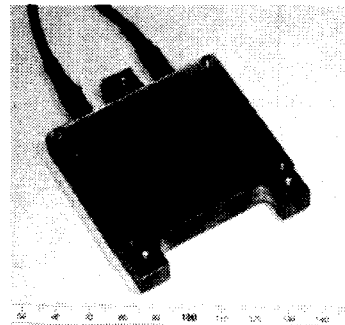


Fig. 6(a) Capacitance cell designed by NIST. External leads to the upper and lower electrodes is shown

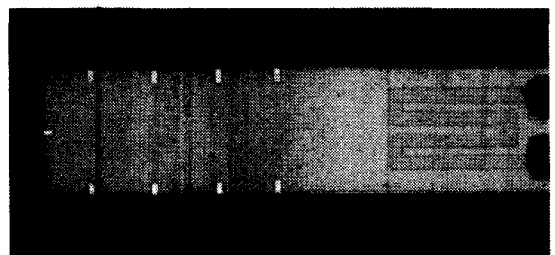


Fig. 6(b) A commercial piezoresistive cantilever(AE801). One ion-implanted strain element is clearly visible on the right, along with the ends of the electrodes

나노 인덴터로 힘을 가해 센서의 특성을 조사한 결과 정전용량 셀은 온도에 의한 드리프트와 크립 특성이 나빠 개선해야 하며 압저항 센서는 1 mN ~ 10 mN 영역에서 0.1%의 불확도를 갖는다고 보고하였다.

2.2.3 영국 NPL의 미세 힘 센서^{11,12,13}

다른 선진기관보다 늦게 연구에 착수한 영국의 NPL(National Physical Laboratory)에서는 최근에 연구결과를 발표하고 있다. Fig. 7 에서처럼 MEMS 공정을 이용하여 나선 모양의 기준 스프링 어레이를 제작하여 AFM 을 교정하는 방식을 제안하였다¹¹.

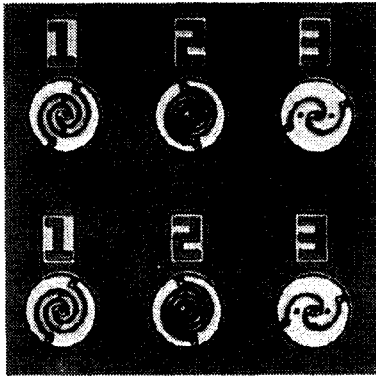


Fig. 7 Optical micrograph of a multi-array reference spring. A scale bar of 0.1 mm has been overlaid on this optical micrograph

어레이로 제작함으로써 다양한 스프링 상수를 가진 스프링을 한 디바이스 위에 구현하여 여러 힘의 범위를 커버할 수 있는 장점이 있으나 외부에서 정확한 힘과 변위를 가하지 않는 이상 공진 주파수를 이용하여 스프링 상수를 유추할 수 밖에 없고 센서 자체에서 전기적인 출력을 제공하지 못하는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 Fig. 과 같은 나노 저울을 제작하였다¹². 센서 안에 자체적으로 정전기력을 발생할 수 있는 comb 드라이브가 설치되어 있어 SI 에 소급가능한 힘을 발생할 수 있고 AFM 탐촉자가 접촉할 “landing stage”에 금코팅을 하여 간섭법을 이용한 변위 측정이 가능하도록 하였다. 이러한 방식으로 약 2%의 불확도로 캔틸레버를 교정할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

캔틸레버를 이용한 힘 센서는 접촉점이 어디냐에 따라 민감도가 달라지는 단점을 가진다. 즉, 캔틸레버 끝에 힘이 작용할 때의 스프링 상수와 중간 위치에 작용할 때와의 스프링 상수값은 큰 차이를 보이므로 압저항이 삽입된 캔틸레버형 힘 센서로 AFM 캔틸레버를 교정한다면 접촉점의 위치가 중요하다. 따라서 접촉점을 항상 일정하게 유지할 수 있는 기준이 필요하게 된다. 이를 위해 압저항 힘센서에 이진 코드로 된 마크를 삽입하여 항상 일정한 위치에 힘이 작용하도록 하였다¹³.

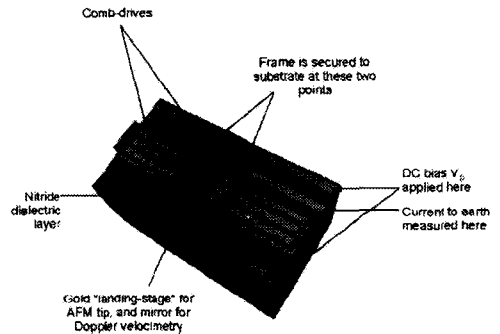


Fig. 8 Three-dimensional computer model of the electrical nanobalance device. The area shown is 0.98 mm × 0.56 mm

2.3 나노 힘 응용 기술

나노 힘 측정기술이 확립되면 힘 측정이 필요한 여러 분야에 응용이 가능하다. Fig. 9 는 표준기로 교정을 완료한 캔틸레버형 나노 힘센서를 이용해 AFM 을 교정하는 방법을 나타낸 것이다. 이외에도 나노 인덴터(nano indenter) 교정 기술, 생체 분자력 측정 기술, 표면 장력 측정 기술, 그리고 광 집게(optical tweezer)의 광력 측정 기술 등의 무한한 응용 기술 개발이 가능하다.

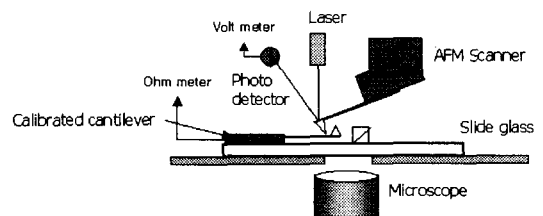


Fig. 9 Arrangement of the experimental components used for atomic force microscope calibration

3. 나노 힘 측정의 기술지도와 전망

한국표준과학연구원에서는 나노 힘표준 → 교정기 → 나노 힘 센서 → 나노 힘 응용기술 개발에 이르는 체계를 확립하여 국내외의 나노 및 바이오 기술 발전의 기반을 제공하고자 한다. 이를 위하여 Fig. 10 와 같은 향후 10 년간의 기술 지도를 제시하고자 한다. 1 단계에서는 나노 힘 측정의 요소기술 확보에 주력하며 힘 측정 불확도 10 nN 을 구현한다. 또한 1 단계가 끝나는 2008 년경에 AFM 캔티레버의 스프링 상수를 1% 이내의 불확도로 교정 서비스를 제공하는 것을 목표로 하고 있다. 2 단계에 있어서는 확보된 요소 기술을 바탕으로 시스템의 성능을 개선하고 문제점을 보완하는 기간이며 나노 힘 측정을 이용한 응용 기술도 개발한다. 2 단계에서 목표로 하는 힘 측정 불확도는 1 nN 이다. 3 단계에서는 0.1 nN 을 목표로 하며 기존의 힘 측정기술의 극한을 뛰어넘는 신개념의 측정기술의 개발 및 응용 기술에 집중한다.

현재까지 나노 기술을 가능하게 했던 핵심 장비인 AFM 은 주로 관찰과 표면분석에 사용되어 왔다. 이 경우 AFM 캔티레버는 물체 표면을 따라 움직이기만 하면 되었고 따라서 캔티레버의 스프링 상수와 캔티레버 팁과 표면 원자사이에 작용하

는 힘을 정확히 측정할 필요가 없었다. 하지만 최근부터 AFM 은 나노 스케일에서 물질을 조작하고 제어하는 데에 널리 사용되고 있다. 이 때 핵심적인 물리량 중의 하나는 힘이므로 정량적이고 정확한 힘 측정이 중요해진다. Fig. 11 은 AFM 에서 힘 측정이 응용되는 분야를 나타낸 것으로 한국표준과학연구원은 AFM 사용자나 제조사에게 교정된 시편(전달용 표준기)이나 교정 서비스를 제공하고 자 한다.

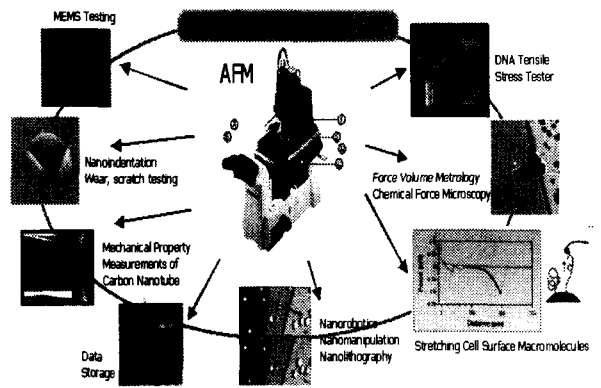


Fig. 11 AFM application area, in which nano-force measurements are needed

구분	1 단계			2 단계			3 단계			
	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14
고감도 발란스 기술	Reverbal Mechanism			Equal Arm Balance Mechanism			Horizontal Arm Balance Mechanism			
	감도: 1 N/m			감도: 0.01 N/m			감도: 0.001 N/m			
초정밀 변위측정	코호디안 변위측정기			저상변위 변위측정기			Fabry-Perot 광선계			
	분해능: 1 nm			분해능: 0.1 nm			분해능: 1 pm			
환경 제어	± 1 K, Active Vibration Isolation			± 0.1 K, Class 100			± 0.001 K, Class 1000			
나노 힘 발생 기술	제어오차: < 10 nN			제어오차: < 1 nN			제어오차: < 0.1 nN			
나노 힘 센서 기술	Piezoelectric			Optical Waveguide			Carbon Nanotube, Buckyball			
	분해능: 10 nN			분해능: 0.1 nN			분해능: 0.001 nN			
나노 힘 응용 기술	AFM 측정 기술			Sensor 응용 기술			Planck Constant 측정			
	나노 연면터 교정 기술			나노 연면터 교정 기술			실제 분자력 측정, 광검거 교정 기술			
나노 힘센서 및 교정 서비스	AFM 캔티레버 교정, 전달용 표준기			나노 힘센서 교정, 전달용 표준기			나노 힘센서 교정, 전달용 표준기			
	마이크로 힘 센서			나노 힘 센서			나노 연면터 교정기, 실제 분자력 측정기, 나노 구조 재료 시험기			

Fig. 10 Technology roadmap of nano-force standards and measurement

4. 결론

마이크로 및 나노 세계에서 작용하는 pN 부터 mN 까지의 힘표준 및 측정 기술에 대해 살펴보았다. 거시 세계와 마찬가지로 나노 스케일에서의 물질 생산 및 공정(NT)과 생명현상 규명, 신약 생산(BT)에 있어서 신뢰성 있는 힘 측정이 중요해 질 것이며, 따라서 나노 힘표준의 확립과 그에 따르는 보급 및 응용기술은 필수적이라고 할 수 있다. 본문에서 살펴보았듯이 나노 힘을 측정하고 구현하는 기술은 전통적인 나노 기술이기 보다는 정밀측정기술 및 기계기술을 결합한 정밀공학에 가까우며 나노 기술과 생명공학 기술 발전의 기반이 되는 성격을 지니고 있다. 한국표준과학연구원 힘 연구실은 필요성을 인지하고 나노 힘표준 확립 및 보급을 목적으로 프로젝트를 시작하였으며 2008 년 AFM 교정서비스 제공을 목표로 하고 있다.

참고문헌

- Mehta, Amit D., Rief, Matthias, Spudich, James A., Smith, David A. and Simmons, Robert M., "Single-Molecule Biomechanics with Optical Methods," *Science*, Vol. 283, pp. 1689-1695, 1999.
- Park, Y. K., Kang, D. I. and Kim, J. H., "The State of the Art in Nano-Force Standards and Measurement," *J. of the KSPE*, Vol. 19, No. 3, pp. 27-32, 2002.
- Kim, M. S., Choi, I. M., Park, Y. K. and Kang, D. I., "SI Traceable Force Balance At the Nanonewton Level," *Proc. of KSPE*, pp. 571-574 May 2004.
- Pratt, J. R., Smith, D. T., Newell, D. B., Kramar, J. A. and Whitenton, E., "Progress toward Systeme International d'Unites traceable force metrology for nanomechanics," *J. Mater. Res.*, Vol. 19, No. 1, pp. 366-379, 2004.
- Choi, I. M., Kim, M. S., Woo, S. Y. and Kim, S. H., "Parallelism error analysis and compensation for micro-force measurement," *Meas. Sci. Tech.*, Vol. 15, pp. 237-243, 2004.
- Pratt, J. R., Newell, D. B. and Kramar, J. A., "A Flexure Balance with Adjustable Restoring Torque For Nanonewton Force Measurement," *Proc. of IMEKO (TC3/ TC5/ TC20)*, paper ID-49 Sept. 2002.
- Hosoe, S., "Highly precise and stable laser displacement measurement interferometer with differential optical passes in practical use," *Nanotechnology*, Vol. 4, pp. 81-84, 1993.
- Howard, L., Stone, J. and Fu, J., "Real-time displacement measurements with a Fabry-Perot cavity and a diode laser," *Prec. Engg.*, Vol. 25, pp. 321-334, 2001.
- Behrens, I., Doering, L. and Peiner, E., "Piezoresistive cantilever as portable micro force calibration standard," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, pp. 171-177, 2003.
- Smith, D.T., Woody, Sh. and Pratt, J.R., "Compact Force Sensors for Low-Force Mechanical Probe Calibration," *Proc. of IMEKO (TC3/ TC5/ TC20)*, paper ID-047 Sept. 2002.
- Cumpson, P. J., Hedley, J. and Zhdan, P., "Accurate force measurement in the atomic force microscope: a microfabricated array of reference springs for easy cantilever calibration," *Nanotechnology*, Vol. 14, pp. 918-924, 2003.
- Cumpson, P. J. and Hedley, J., "Accurate analytical measurements in the atomic force microscope: a microfabricated spring constant standard potentially traceable to the SI," *Nanotechnology*, Vol. 14, pp. 1279 - 1288, 2003.
- Cumpson, P. J., Clifford, C. A. and Hedley, J., "Quantitative analytical atomic force microscopy: a cantilever reference device for easy and accurate AFM spring-constant calibration," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 15, pp. 1337 - 1346, 2004.