

힘 센서 NT, BT, RT에의 응용

강대임[†]·김민석*·김종호*·박연규*

Applications of Force Sensors for NT, BT and RT

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

Key Words: Strain Gage(스트레인 게이지), Force Sensor(힘센서), MEMS(미소기전집적시스템), Cantilever(외팔보)

Abstract

In this lecture, we reviewed the principle and types of force sensors with strain gages, tactile sensors based on MEMS and force sensor as well as nano force sensors. Also we investigated applications of force sensors for NT, BT and RT.

1. 서 론

산업과 연구 현장에서 측정되는 힘의 범위를 살펴보면 크기는 수십 MN(10^{-6} N) 크기의 우주선에서 발생하는 추진력에서부터 작게는 수 pN(10^{-12} N) 크기의 원자들 사이의 결합력까지 그 범위가 매우 광범위하다. 힘 측정은 상업용 저울, 산업용 저울, 재료시험기, 힘 측정기와 같은 계측기기산업분야, 자동화 및 물류관리와 같은 프로세스분야, 구조물 거동 해석, 항공기 및 선박모형시험, 교량관리, 첨단교통시스템의 교통량 제어와 같은 산업 안전분야 그리고 가상환경 하에서의 촉각 제시, 마이크로 내시경의 촉각감지, 로봇이나 로켓의 미세 정밀제어 등 첨단산업

분야, 원자현미경과 나노인텐터 등의 NT분야 그리고 생체 분자력 측정 등의 BT분야 등 우리 일상생활에서부터 전통산업분야 및 신기술분야에 직접 또는 간접으로 활용되고 있다.

힘 측정에 사용되는 힘센서는 측정하고자 하는 힘에 대응하여 기계적 변형을 발생시키는 감지부(spring element), 발생된 변형을 감지하는 센서부 및 감지된 신호를 적절히 처리하는 전자회로로 구성되어있다. 변형 감지에는 스트레인 게이지, 압전소자, 전자력 방법, 광학적 방법 등이 이용되고 있으며, 스트레인 게이지가 정밀도가 우수하고 사용이 간편하여 가장 많이 활용되고 있다.

본 강연에서는 첫째 스트레인 게이지를 이용한 힘센서의 실용화 수준을 살펴보고 로봇의 정밀제어에 사용되는 다축 힘센서 그리고 compact 구조의 대용량 힘센서 개발 등 최근의 연구동향을 살펴보고자 한다. 둘째 MEMS 기술 및 반도체 공정의 고집적회로 제작기술을 활용한 미세 힘센서의 연구동향 및 응용 사례를 살펴볼 것이다. 이들 미세 힘센서는 단순히 힘만을 측정하는 것이 아니라 표면의 마찰 특성, 표면의 거칠기, 열전도

[†] 책임저자 ; 회원, 한국표준과학연구원 물리표준부

E-mail : dikang@kriss.re.kr

TEL : (042)868-5010 FAX : (042)868-5012

* 한국표준과학연구원 물리표준부 질량힘그룹

특성, 표면의 딱딱함의 정도를 측정할 수 있는 기능을 갖고 있어 인공지능로봇의 인공피부로 활용될 수 있을 것이다. 마지막으로 AFM을 이용한 나노 표면의 특성 분석이나 DNA 분자간의 결합력 측정 등 마이크로 뉴턴에서 나노 뉴턴에 이르는 힘 측정의 NT, BT에의 응용 예 및 연구동향을 살펴보고자 한다.

2. 스트레인 게이지식 힘센서

스트레인 게이지식 힘센서(이하 로드셀로 칭함)는 정밀도와 내구성이 우수하여 전자저울, 재료시험기, 구조물 해석, 각종 역학시험 등의 감지센서로 많이 사용되고 있다. 로드셀은 감지부(sensing element), 스트레인 게이지, 보상회로, 보호케이스로 구성되어 있다. 감지부는 측정하고자 하는 하중에 대응하여 적절한 기계적 스트레인을 발생시키는 일종의 스프링과 같은 것이다. 스트레인 게이지는 감지부에 발생된 기계적 변형률을 전기적인 신호로 변환하는 역할을 한다. 보상회로는 로드셀의 정밀도를 높이기 위하여 사용되는 것으로서 온도 변화에 따른 영점출력 및 온도변화에 따른 감도변화 등을 보상하는 회로로 구성되어 있다. 보호케이스는 로드셀의 내구성과 과부하 특성을 높이는 역할을 한다.

로드셀 감지부의 구조로는 굽힘 변형률을 감지하는 구조로 외팔보형, 쌍안경형, 다이아프램형, S자형 등이 있으며, 전단 변형률을 감지하는 구조로 수레바퀴형, 전단빔(shear beam)형 등이 있고 수직변형률을 감지하는 구조로 기둥형이 있다. 설계자들은 로드셀의 용량, 측정범위, 요구정밀도 및 사용 대상 등을 고려하여 감지부의 형상을 결정한다. 설계 및 제작되는 로드셀들의 용량은 작게는 mN에서 크게는 수십 MN까지 그 범위가 매우 넓다.

로드셀은 많은 형태들이 상품화되어 시장에 출시되고 있으며 힘센서의 시장을 주도하고 있다. 로드셀의 연구동향을 살펴보면 힘표준기의 정확도 평가에 사용할 수 있는 고정밀 로드셀, 극한환경이나 특수한 환경에 사용할 수 있는 로드셀 그리고 힘과 모멘트를 동시에 측정하는 다축 로드셀 개발 등을 들 수 있다. 또한 로드셀의 사용환경이 동적환경임을 고려하여 로드셀의 동적거동 및 동특성향상에 관한 연구들이 진행되고 있

다.

Fig. 1은 표준연구원에서 개발한 compact형 구조의 기둥형 감지부를 갖는 대용량 로드셀이다. 경계조건에 의한 로드셀의 성능변화를 최소화할 수 있도록 설계되었다.



Fig. 1 10 MN load cell with column sensing element designed by KRISS.

3. 촉각센서 개발 동향⁽¹⁾

지금까지 로봇의 감각기능은 주로 시각, 청각에 집중된 반면 촉각, 후각, 미각기능을 갖는 센서개발 연구는 미비한 실정이었다. 그러나 지능형 로봇이나 유비커터스 환경에서 로봇의 촉각기능은 매우 중요한 요소가 될 것이다. 현재 산업용 로봇에서 사용되고 있는 촉각관련 센서는 6자유도의 힘/토크 센서로 로봇의 손목, 팔꿈치 등 관절에 장착되어진다. 힘/토크센서는 로봇 그리퍼의 파지력을 파악하는데 유용하지만 손 끝의 촉각 감지 기능을 수행하지 못한다. 최근에 반도체 집적회로 제조기술의 하나인 미소기전집적시스템(MEMS) 제작기술을 이용하여 손 끝의 촉각기능을 할 수 있는 촉각센서 개발 연구들이 시도되고 있다. Mei등은 반도체 미세가공기술을 이용하여 사각형박막 형태의 3축 힘센서로 이루어진 촉각센서를 제작하여 물체의 형상인식 가능성을 보여주었다. 스탠포드 대학에서는 CMOS 공정을 통해 신호처리부와 100 μm x 100 μm 크기의 3축 힘센서 감지부로 이루어진 4096(64 x 64)개의 어레이를 갖는 촉각센서를 개발하였다. 캘리포니아 공대에서는 고분자와 실리콘웨이퍼를 융합한 반

도체 공정 프로세스를 확립하여 유연성을 갖는 촉각센서를 개발하고 있다.

본 절에서는 표준연에서의 촉각센서 연구동향을 간단히 소개하고자 한다.

3.1 FSR 기반 촉각센서

Fig 2는 FSR(force sensitive resistor) 센서와 PVDF 필름을 융합한 촉각센서 감지부를 보여준다. 먼저 수직력을 측정하기 위하여 8x8어레이로 구성된 FSR센서들을 밑바닥에 배치시킨다. 한편 외부물체와의 접촉시 접촉력이 각 센서들에게 쉽게 전달되도록 변형이 쉬운 고무판(soft layer)을 FSR센서들 위에 부착시켰다. 다음은 미끄러짐을 쉽게 감지할 수 있는 PVDF 필름을 위에 깔고 접촉하는 물체의 미끄러짐으로 인한 전단력이 PVDF 필름에 잘 전달되도록 인간의 피부표면과 같은 돌기(knob)를 부착하였다. 본 촉각센서는 64개의 FSR 센서 채널과 1개의 PVDF 채널로 이루어졌으며 0.1 N - 20 N 크기의 수직력을 측정할 수 있다. 그리고 신호샘플링 속도는 100 ms 이다.

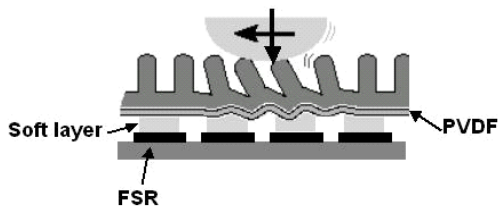


Fig. 2 Schematic diagram of a sensing element of tactile sensor using FSR sensor and PVDF film.

Fig 3은 제작된 촉각센서를 보여주고 있다. Fig 2처럼 물체의 접촉에 의한 미끄러짐이 잘 전달될 수 있도록 고무를 이용하여 돌기로 이루어진 외부표면을 제작하여 PVDF 필름에 부착하였다. 이 센서는 물체의 표면 즉 거칠기 정도를 측정할 수 있다. 그러나 FSR 기반 촉각센서는 분해능이 떨어지므로 사람의 등과 같이 분해능이 떨어지는 부위에 활용될 수 있을 것이다.



Fig. 3 A tactile sensor using FSR sensor(64 channels) and PVDF film(1 channel).

3.2 실리콘웨이퍼 기반 촉각센서

촉각센서의 분해능을 높이기 위해서는 반도체 공정기술을 이용한 MEMS 제작기술을 활용할 수 있다. Fig 4는 본 연구실에서 개발중인 3축 힘센서와 히터 기반의 열센서가 융합된 촉각센서의 개념도를 보여주고 있다. 촉각센서는 3축 힘센서 4개와 히터 기반 4개의 열센서로 구성되어 있다.

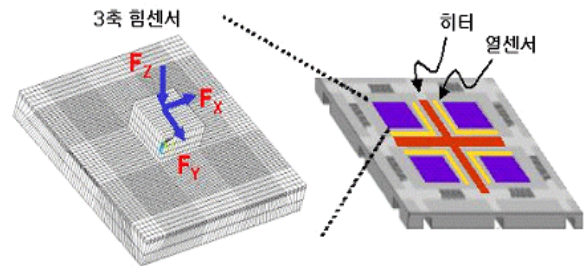


Fig. 4 Schematic diagram of a tactile sensor using three-component force sensor and thermal sensor based on heater.

3축 힘센서는 2.4 mm x 2.4 mm 크기의 유한사각형 박막을 가지며, 3축 힘을 동시에 측정하기 위하여 여러 개의 압저항(piezoresistor)으로 구성되었다. 또한 힘센서의 감도향상 및 온도보상을 고려하기 위해서 압저항의 위치를 최적화하였으며 상호간섭을 최소화 할 수 있는 완전브릿지(full bridge)로 회로가 구성된다.

Fig 5는 제작된 촉각센서를 보여준다. 개발된 촉각센서는 공간분해능이 3 mm이하이고 힘분해

능이 0.05 N 이하이며 온도 분해능이 1°C 이고 샘플링 속도가 100 ms 이하이다

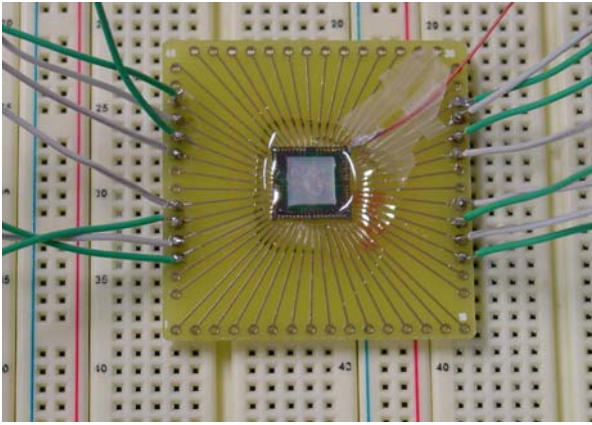


Fig. 5 The fabricated tactile sensor with four three-component force sensors and four thermal sensors.

3.3 유연성 기반 촉각센서

촉각센서가 지능로봇 등에 광범위하게 활용되기 위해서는 유연성을 가져야 한다.

Fig 6은 Flexible MEMS기술을 이용하여 제작된 인공피부 감지부이다. 3축 힘센서는 1 mm x 1mm 크기의 유한사각형 박막을 가지며 3축 힘을 동시에 측정하기 위하여 여러 개의 Ni-Cr 기반의 저항체를 이용하였다. 히터 및 열센서는 금을 사용하였다.

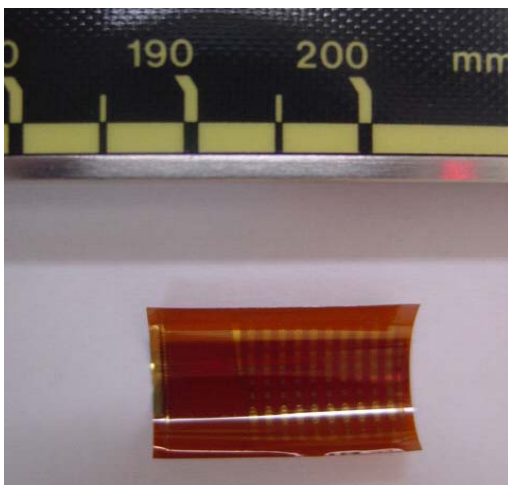


Fig. 6 The fabricated tactile sensor using surface micromachining based on polymer.

4. 나노 힘센서의 원리 및 응용

4-1. 원자간힘 현미경에서 힘 측정 응용분야

AFM은 시료와 탐침 사이에 작용하는 매우 미약한 반 데르 발스(van der Waals) 힘(피코뉴턴에서 나노뉴턴 크기)을 이용하기 때문에 시료의 재질에 상관없이 측정가능하고 대상물에 영향이 적어 표면 관찰에 널리 쓰이고 있다.

AFM이 미약한 힘을 이용하지만 시료의 표면형상만을 측정할 때는 단순히 외팔보(cantilever)의 형태를 가진 탐침의 움직임을 감지하여 되먹임 회로에서 탐침의 변위가 영이 되도록 제어해주므로 탐침과 시료사이의 힘을 측정할 필요가 없지만 그 외의 경우에 대해서는 대부분 힘 측정이 필요하게 된다. 그 이유는 다루는 영역이 마이크로 스케일 또는 나노 스케일과 같이 작아지면 질량에 의한 관성 및 중력보다 마찰력, 표면장력, 공기의 저항, 정전기력, 반데르 발스(van der Waals)힘 등의 영향이 커지기 때문이다. 따라서 AFM이 단순한 관찰의 역할 이외에 마이크로 및 나노미터 수준의 시스템을 제작하고 규명하기 위해선 힘의 정확한 측정 및 제어가 매우 중요하다.

최근 AFM의 기능이 다양화되고 전문화 되면서 단순한 시료의 촬영뿐만 아니라 분광(spectroscopies), 석판인쇄(lithographies), 나노 조작(nano-manipulation)의 기능까지 함께 갖춘 AFM이 출시되고 있으며 바이오 측정이나 고분자 재료 측정을 전문으로 하는 Bio-AFM, Polymer-AFM도 등장하고 있어 AFM에서의 미세 힘 측정은 선택이 아닌 필수로 자리잡아가고 있다. 특히 나노 및 바이오 물질의 조작, 기계적인 물성 측정, 분자간의 반응 측정에 정확한 힘의 측정이 중요하다. Fig. 7은 AFM에서 힘 측정이 응용되는 분야를 나타낸 것으로 NT 및 BT의 전분야에서 골고루 사용되고 있음을 알 수 있다.

AFM은 매우 작은 힘까지 측정할 수 있는 우수한 측정 장비임에도 불구하고 정확한 측정을 위해서는 AFM 외팔보 탐침의 스프링 상수를 교정해야 한다. 이를 위해 매우 작은 힘을 측정할 수 있는 힘센서가 필요하다.

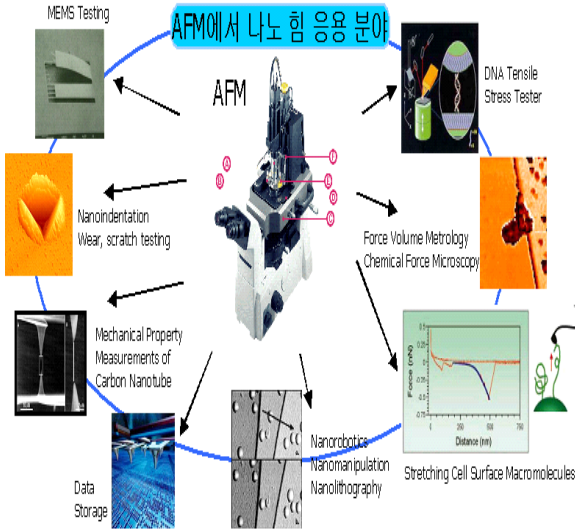


Fig. 7 AFM application area, in which nano-force measurements are needed.

4-2. 나노 힘센서

나노 힘 센서의 구조는 외팔보 형이 주종을 이루고 있으며 감지부의 변형을 측정하는 방법으로는 압저항(piezoresistor)를 이용하거나 정전용량의 변화를 이용한다.

(1) 압저항 외팔보형 (Piezoresistive cantilever type)

Fig. 8과 같이 최대 변형이 발생하는 외팔보 지지대 부근에 이온 주입 공정으로 압저항을 생성하여 힘에 비례하는 전기 신호를 얻는 방식으로 가장 널리 쓰이는 방법이다.

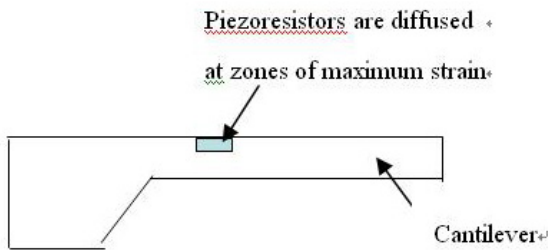


Fig. 8 Schematic diagram of a piezoresistive cantilever.

AFM 탐침도 압저항이 삽입된 제품이 출시되고 있으나 크기가 너무 작아 외팔보에 하중을 가하기 어려우므로 힘 센서로 쓰기에 부적합하다.

Fig. 9는 독일의 표준기관인 PTB에서 제작한 마이크로 힘 센서를 나타낸 것이다⁽²⁾. 외팔보 형이며 이 문제를 고려하여 제작된 캔티레버는 길이가 5 mm, 너비가 0.2 mm로 쉽게 교정이 가능하도록 하였다.

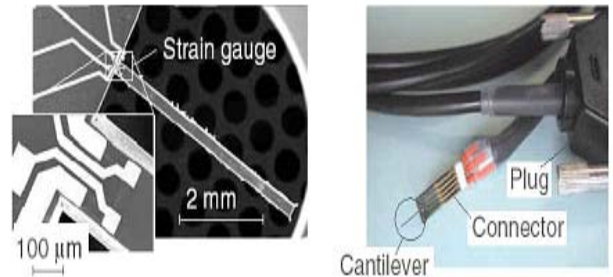


Fig. 9 Piezoresistive cantilever for micro-force measurement.

힘센서의 분해능은 외팔보의 스프링 상수와 압저항의 열잡음에 의해 주로 결정되며 외팔보의 두께를 0.1μm까지 낮춤으로써 8.5 fN/√Hz의 분해능을 구현하기도 하였다.

(2) 정전용량 형 (Capacitive sensor type)

정전용량 형은 감지부의 변형을 정전용량의 변화를 통해서 알아내는 방식을 택한다. Fig. 10은 미국표준연구소인 NIST에서 디자인하고 제작한 정전용량 힘센서의 사진이다⁽³⁾. 그림에서 보듯이 청동 외관으로 덮여있지만 안에는 길이 15 mm, 너비 20 mm의 캔티레버가 장착되어 있다. 캔티레버에는 금코팅이 되어있어 반대편 고정 캔티레버와 함께 축전기를 구성하고 있다. 외부에서 힘이 가해져 캔티레버가 움직이면 전극의 간극이 달라지므로 정전용량이 바뀌게 된다. 10⁻³ N 용량의 힘을 측정할 수 있다.

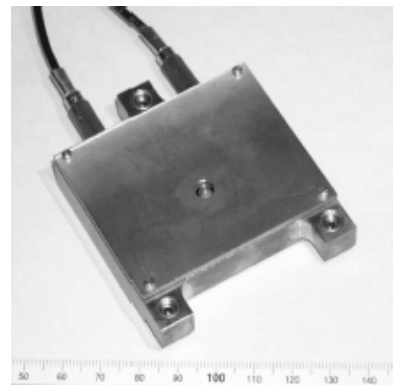


Fig. 10 Capacitance cell designed by NIST. External leads to the upper and lower electrodes is shown.

한편 영국 NPL에서는 Fig. 11과 같이 센서 안에 자체적으로 정전기력을 발생할 수 있는 comb 드라이브가 설치되어 있어 SI에 소급가능한 힘을 발생할 수 있고 AFM 탐촉자가 접촉할 "landing stage"에 금코팅을 하여 간섭법을 이용한 변위 측정이 가능한 나노 저울을 제작하였다. 이러한 방식으로 약 2%의 불확도로 캔티레버를 교정할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

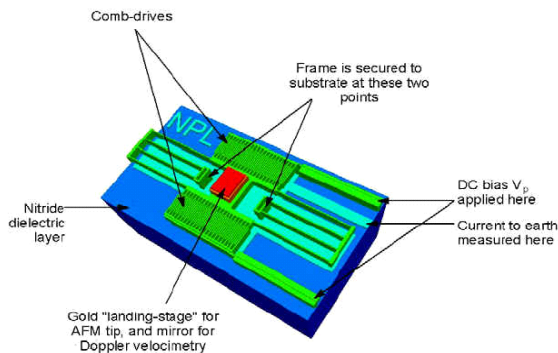


Fig. 11 Three-dimensional computer model of the electrical nanobalance device. The area shown is 0.98 mm X 0.56 mm.

4-3. 나노 힘센서의 응용

나노 힘센서는 진술한 AFM의 교정 이외에도 NT 및 BT 분야에 널리 쓰일 수 있다. Fig. 12는 각각 힘센서의 응용 예를 나타낸 것으로 금 입자와 표면에 작용하는 미세한 표면 장력 측정이나 금 분자 사이의 결합력 측정, 그리고 BT 분야에서 생체 분자를 조작하고 측정하는 데에 널리 쓰이는 광집계의 포획력 교정에 사용 될 수 있다. 또한 나노 힘센서 표면에 생체 분자와 결합하는 작용기를 코팅하면 생체 분자를 검출할 수 있는 바이오 센서로도 활용될 수 있다. 이와 같이 앞으로 나노 힘센서는 NT 및 BT의 발전과 더불어 무궁무진한 응용을 갖게 될 것이며 미세 힘 측정 기술은 NT와 BT 연구의 기반을 제공하게 될 것이다.

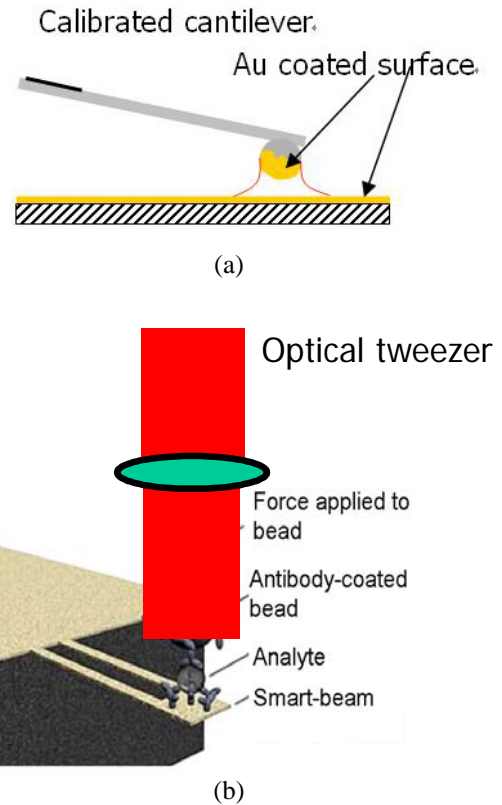


Fig. 12 Schematic of the set-ups for (a) surface tension measurements (b) calibration of the optical trapping force.

참고문헌

1. Jong-Ho Kim, Jeong-II Lee, Hyo-Jik Lee, Yon-kyu Park, Min-Seok Kim and Dae-Im Kang, 2004, "Development of tactile sensor and its application", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 21, No. 9, pp. 20-25
2. Beherens, I., Doering, L., and Peiner, E., 2003, "Piezoresistive cantilever as portable micro force calibration standard," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, pp. 171-177
3. Smith, D.T., Woody, Sh., and Pratt, J.R., 2002, "Compact Force Sensors for Low-Force Mechanical Probe Calibration," *Proc. of IMEKO (TC3/ TC5/ TC20)*, paper ID-047