

압력센서의 원리 및 응용

전 국 진

Principles and Applications of Pressure Sensors

Kukjin Chun



●전국진(서울대 반도체공동연구소)
●1955년생.
●반도체 공정 및 반도체 센서를 전공하였으며, MEMS중 마이크로머시닝 기술, Interface Electronics, Integrated Sensor에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

센서는 자연현상을 감지하는 소자로 계측 및 제어시스템의 구성요소로 이용되며, 센서를 이용하여 Closed-loop System의 구성을 가능케 하며, 지능화된 시스템을 구현할 수 있다. 센서는 압력, 유량, 온도, 자장, 광 등을 측정하는 물리적 센서, pH, 이온, 산소 등의 구성물을 감지하는 화학센서, 인체의 혈당량, 뇌의 상태, 냄새 등을 측정하는 바이오 센서로 대별될 수 있다. 이중 물리적 센서는 기계적 시스템에 많이 이용되며, 특히 압력, 유량센서는 자동차에 있어서 엔진의 Manifold, 엔진오일, 브레이크 오일, 타이어, 연료 등의 상태를 측정하는데 사용되고 있다. 예를 들어 1980년대에는 미국 Ford와 Motorola사가 공동으로 반도체공정 기술을 이용한 용량형(capacitive) 압력센서를 개발하여 엔진의 컨트롤시스템에 이용하였다.⁽¹⁾ 이러한 압력센서는 1988년에 15억 불의 매출을 기록하였으며, 1995년에는 30억 불로 늘어날 전망으로 있어 가장 많이 사용

되는 센서로 각광을 받고 있다. 이 글에서는 압력센서의 원리 및 종류에 대하여 알아보고, 마이크로머시닝 기술 등의 제작방법과 이의 응용에 대하여 논의하려 한다.

2. 마이크로머시닝 기술

2.1 마이크로머시닝 기술의 개요

마이크로머시닝(micromachining) 기술은 mm 이하의 미세구조를 실현하는 기술로서 Microelectronics의 핵심인 집적회로(IC) 가공기술 및 LIGA기술에 근거를 두며 2차원 및 3차원의 구조를 구현하는 기술을 말한다. 예를 들어, 일반기계가 m의 크기 및 mm의 정밀도를 가지며, 정밀기계가 cm의 크기와 μm 정도의 정밀도를 가지는 것에 반하여 마이크로머시닝 기술에 의하여 제작된 미세기계는 mm 이하의 크기 및 μm 이하의 정밀도를 이룩할 수 있다.

마이크로머시닝 기술로는 극소형 센서, 기계구조 및 액츄에이터(actuator)의 구현이 가능하며, 1970년대의 반도체 제작기술 및 주변회로를 내장한 센서의 개발을 필두로,

1980년대 초반의 스프링, 캔틸레버 등의 미세기계 요소, 1980년대 후반의 마이크로그리퍼, 모터, 기어 등의 기관에서 분리된 미세구조의 형성으로 연결되었으며, 1990년대에 이르러서는 센서, 논리회로 및 액츄에이터가 혼재한 마이크로메카트로닉스(micro mechatronix 또는 MEMS: micro electro mechanical system)로 발전되고 있다. 2000년대에는 생체내의 국부적인 수술 등을 가능케 하는 마이크로로봇이 실현되어 2010년경에는 실용화될 것으로 예상되고 있다.

마이크로머시닝 기술의 장점으로는 초정밀 패턴형성을 통한 소형화, 고성능화, 다기능화, 직접화, 지능화, 안정성 및 신뢰성의 향상을 들 수 있으며, 원자로 등의 극한 환경에서 사용이 가능하며 직접시스템(센서, 논리회로, 액츄에이터의 일체화)의 구현 가능으로 조립의 필요성이 감소되고, 일괄된 작업공정으로 양산이 가능하다.

마이크로머시닝 기술의 응용으로는 자기헤드, 프린터헤드 등의 정보화기기, 세포조작, 진단 및 수술, 인공장기 등의 의료기기, 마이크로매니플레이터, 센서, 집적자율분산제어시스템 등과 같은 제어계측기기, 광섬유통신, 광 스위치, 가변초점 미러 등의 광학기기, 필터, 노즐, 밸브, 모터 등의 극소형 기계 등을 들 수 있으며, 특히 근래에는 가속도 감지기와 압력센서 등을 이용한 자동차의 브레이크, 현가장치 및 방향조정장치 등의 응용이 급속히 증가하고 있다.^(2,3)

2.2 반도체 가공기술

반도체 가공기술을 이용한 마이크로머시닝 기술은 크게 Bulk Micromachining과 Surface Micromachining으로 구분될 수 있다. Bulk Micromachining은 실리콘과 같은 기관을 앞면에서 뒷면까지 상당한 부분을 식각하여 구조를 형성하는 방법이며, Surface Micromachining은 기관의 앞면만을 수 μm 가공하여 원하는 구조물을 제작하는 방법이

다. 마이크로머시닝 기술의 개발 초기인 1970년대에는 KOH, EDP(Ethylene-diamine-pyrocatechol), N_2H_4 등을 이용한 비등방성(anisotropic)식각 및 HNO_3 , HF 등을 이용한 등방성(isotropic)식각기술을 이용한 Bulk Micromachining 기술이 개발되어 다이아프램, 캔틸레버 등이 제작되었다.⁽⁴⁾ 비등방성식각은 식각물이 단결정의 방향에 따라 차이가 나는 것을 이용한 것이며, 예를 들어 실리콘에서는 <100>방향이 <111>방향보다 수십배 높은 식각률을 보인다. 그러나 이 공정은 기관 두께의 변화에 민감하여 정확한 두께의 조절이 어려우므로 Etch-Stop 공정이 개발되었다. Ethc-Stop 공정에는 고농도($>5 \times 10^{19}/\text{cm}^3$)의 Boron층 형성 및 p-n 접합을 이용한 전기화학적(electrochemical)인 방법이 있다.

Bulk Micromachining은 Submicron에서 수 백 μm 의 두께를 정확히 조절할 수 있는 기술이나, 오랜 식각시간이 요구되며, 식각에 필요한 Mask가 원하는 구조물의 크기보다 훨씬 커서 집적도가 감소하는 단점이 있다. 이를 극복하기 위하여 1980년대에 Surface Micromachining 기술이 개발되어 Micromotor 등이 제작되었다. 이 기술은 Silicon Dioxide를 희생층으로 하여 폴리실리콘과의 식각에 대한(주로 HF) 선택도를 이용하는 것으로 정확한 두께의 조절은 가능하며, 공정이 비교적 간단하나, 폴리실리콘이 수 μm 이상 증착되기 어려워, 두꺼운 구조물에는 사용이 어렵고, Stress 및 Oxide의 완전한 식각 등의 문제점이 있다.

위에 언급된 마이크로머시닝 기술은 반도체 가공기술인 직접회로 제작에 이용되는 단위공정들을 근간으로 한다. 단위공정들은 Silicon Dioxide를 형성하는 열산화(oxidation), 불순물을 원하는 부분에 주입하여 p-n 접합을 형성하는 이온주입(ion implantation), 금속 박막을 입히는 금속공정, Silicon Nitride, Polysilicon 등의 박막을 증착

하는 화학기상증착(chemical vapor deposition) 기술 등이다. 이들과 더불어 원하는 패턴을 형성하는 포토리소그라피기술 및 Etching 기술도 사용된다. 특히 Bulk Micromachining에는 앞면과 뒷면에 각각 패턴이 존재하므로 이들을 정렬할 필요가 있는데, 이에선 적외선을 이용한 Double-sided Aligner 등이 필요하다. 또한 압력센서 등의 제작에는 실리콘 기판과 지지대와의 Electrostatic Bonding이 필요한데, 이에선 열팽창 계수가 비슷한 유리(Corning #7740)가 사용되었으며, 최근에는 두 개의 실리콘을 직접 접합시키는 SDB(silicon direct bonding) 기술이 개발되어 많이 이용되고 있다.⁽⁵⁾ SDB 기술(또는 fusion bonding)은 기판을 NH_4OH , H_2SO_4 , HNO_3 등에서 처리하여 Hydration을 시킨 후에 두 기판을 누른 채로 1000°C 정도로 가열하는 방법으로 열팽창계수가 똑같은 기판간의 접합이므로 접합에서 야기되는 Stress가 없으며, 완전한 결합을 이룩할 수 있다. 예를 들어 그림 1의 압력센서중 (a), (b)는 Bulk Micromachining 및 Electrostatic Bonding을 이용하여 제작되었으며, (c)는 Surface 및 Bulk Micromachining을 이용하여 제작되었다.

2.3 LIGA 공정기술

LIGA(Lithographie Galvanoformung Abformung) 공정기술은 1980년경에 독일의 Karlsruhe nuclear research center에서 개발되었으며, $1\mu\text{m} \times 100\mu\text{m} \times 1000\mu\text{m}$ 크기의 3차원의 미세부품을 제작할 수 있다. 이 공정은 GeV 정도의 X-ray를 이용하여, $100\mu\text{m}$ 정도 두께의 Photoresist(X-ray에 민감한 유기물질)에 에너지를 전달하여 원하는 곳에 패턴을 형성하고, 전기도금으로 Photoresist가 없어진 부분을 금속으로 채운다. 다음으로 Photoresist를 제거하여 금속의 틀을 형성한다. 이는 제품으로 사용될 수도 있으며, 이 금속들을 Master로 하여 플라스틱 등을

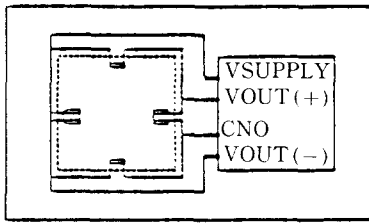
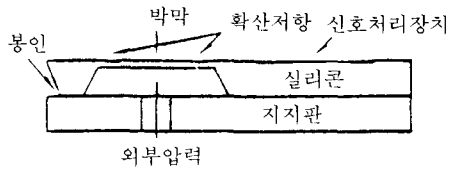
주조하여 복제물을 형성할 수도 있다. 현재는 이 기술을 이용하여 터빈, 필터, 기어, 물질분리기 등을 극소형으로 만들고 있다.

3. 압력센서의 종류 및 원리

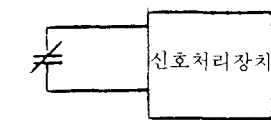
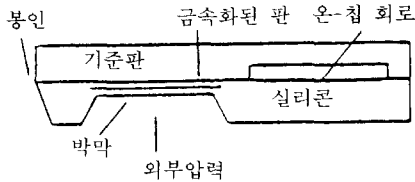
압력센서는 절대적인, 혹은 상대적인 압력을 측정하는 소자로, 감지원리에 따라 메탈(metal)형, 압저항형(piezoresistive), 용량형(capacitive), 압전형(piezoelectric), MOSFET형 및 Piezojunction형으로 구분될 수 있다. 이중 메탈형은 금속을 이용하나, 그 외에는 주로 반도체물질인 실리콘을 이용하며, 마이크로머시닝 기술로 제작된다.

메탈형은 Cu/Ni 등의 합금을 사용한 스트레인게이지 타입으로 만들어져 압력이 가해지면 스트레인게이지가 변형하여 저항의 변화가 일어나게 된다. 즉, 저항 R 은 $R = \rho(l/A)$ 로 주어지게 되는데, 이때 ρ 는 비저항(resistivity), l 은 길이, A 는 단면적이다. Gauge Factor K 는 $K = 1 + 2P$ 로 주어지게 되며, P 는 Poisson's ratio를 나타낸다. 메탈형은 제작은 매우 간단하나, 감도가 낮은 단점이 있다.

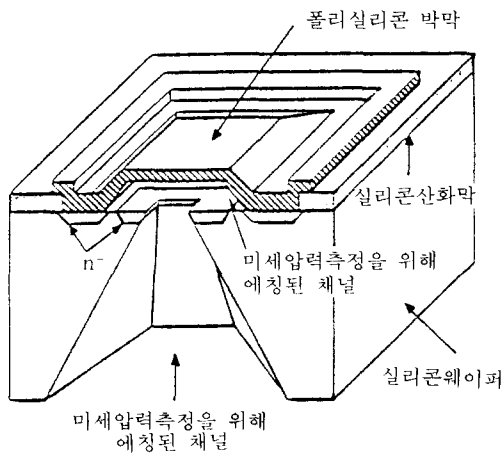
압저항형은 실리콘을 이용하며, 응력에 의한 실리콘 원자간 간격의 변형으로 전자와 Lattice간의 상호작용이 변화하여, 이동도 및 비저항의 변화가 일어나는 것을 이용한다. 따라서 스트레인게이지와 원리는 비슷하나 메탈형보다 감도가 크며, 마이크로머시닝 기술을 이용하여 제작된다. 가해진 응력과 비저항의 관계는 $\Delta\rho/\rho = \pi\sigma$ 로 주어지며, $\Delta\rho$ 는 응력이 가해졌을 때의 비저항의 변화, σ 는 가해진 응력, π 는 압저항계수를 나타낸다. π 는 전계, 전류 및 인가된 응력의 방향에 따라 π_{11} , π_{12} , π_{44} 의 세 가지가 직접적인 영향을 미치며, 물질의 종류(n-type 또는 p-type), 실리콘이 Bulk인가 박막인가에 따라 달라진다.⁽⁶⁾ 압저항형센서는 그림 1(a)와 같이 얇은 정사각형의 실리콘 다이아프램 위



(a) Piezoresistive형



(b) Capacitive형



(c) Polysilicon Diaphragm형

그림 1 압력센서의 종류

에 4개의 저항을 브리지형태로 형성하여 제작할 수 있는데, (7) 다이아프램은 Silicon, Polysilicon, Silicon Oxide 및 Silicon Nitride 등으로 만들어진다. L을 다이아프램의 길이, h를 다이아프램의 두께라 할 때 압력범위는 L^4/h^3 에 비례하며, 저항의 변화는 $dR/R = \pi_{11}\sigma_{11} + \pi_{\perp}\sigma_{\perp}$ 로 주어지고, 이때 11 및 \perp 는 평행, 수직방향의 변수를 나타낸다. 압저항형 압력센서는 직선적인 특성을 나타내며, 저항이 온도변화에 민감하므로 보상회로 등을 필요로 한다.

용량형은 그림 1(b)와 같이 실리콘 다이아프램과 지지대 사이의 Parallel Plate Capacitor를 형성한 후 다이아프램의 휨(deflection)에 따라 Capacitance, C가 증가하는 것을 감지하는 소자로 Capacitance는 다음과 같이 주어진다.

$$C = \iint \frac{\epsilon A}{W - S(X, Y)} dx dy \quad (1)$$

식 (1)에서 ϵ 는 Gap물질의 유전상수, W는 Zero-Pressure일 때의 Gap의 크기, S는 휘는 거리, A는 다이아프램의 면적을 나타낸다. 압력범위는 압저항형과 같으며, 압저항형에 비해 감도가 높고 온도변화에 덜 민감하나, 비직선적인 특성을 나타내며, 제작이 어려운 단점이 있다. 근래에는 그림 1(c)에 보여지는 것과 같은 폴리실리콘 다이아프램을 이용한 용량형 압력센서가 제작되어, 용이한 제작과 높은 감도를 얻을 수 있다. 그러나 얇은(1~2 μ m 정도) 폴리실리콘 다이아프램과 작은 Gap(1 μ m 이하)으로 인하여 압력범위가 적어지는 문제점이 있다. 그림 2에 전형적인 센서의 특성이 나타나 있으며, 같은 다이아프램 크기로 환산했을 경우, 용량형의 감도(pressure sensitivity)가 약 200 ppm/mmHg인데 비해 압저항형은 약 15 ppm/mmHg로 낮은 것을 알 수 있다.

압전형은 ZnO와 같은 Piezoelectric성질이 있는 물질을 박막으로 형성하여 그림 3

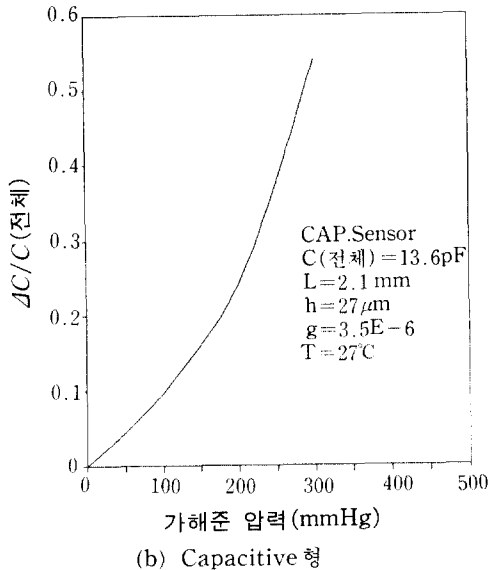
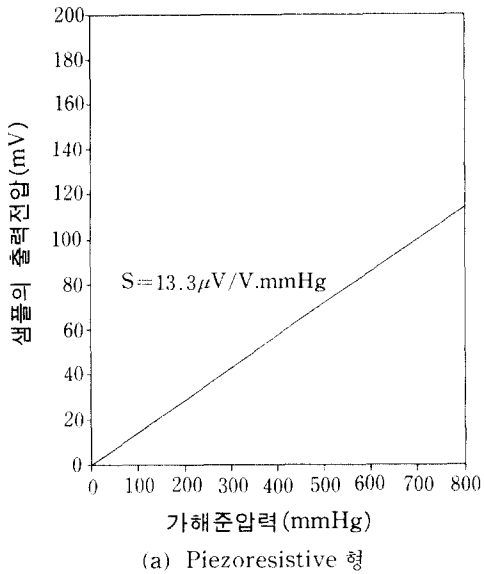


그림 2 인가된 압력에 대한 압력센서의 특성

과 같이 응력이 인가되면 분극현상에 의한 전계 (electric field)가 변화하여 MOSFET의 전하(charge)를 변화시키거나, 양단에서 Potential 차이를 유발하는 성질을 이용한다. 압전형은 공정이 비교적 간단하나, 생성되는 전하가 신속히 없어져서 과도적인 전하

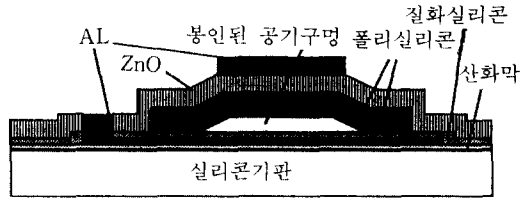


그림 3 Piezoelectric형 압력센서

를 측정하여야 하므로 고감도의 감지회로가 필요하다.

MOSFET 형은 일반적인 MOSFET에서 Gate Oxide를 제거하여 Capacitance를 측정하는 방법과 압저항형에서와 같이 응력이 인가되었을 경우 이동도의 변화를 가져와서 포화영역에서의 Drain전류가 증가하는 효과를 이용하는 것으로 Drain전류 I_D 는 다음과 같이 주어진다.

$$I_D = \frac{W}{Z} \mu C_o (V_{GS} - V_T)^2 \quad (2)$$

여기서, W, Z 은 채널폭 및 길이, μ 는 이동도, C_o 는 Gate Oxide의 단위면적당 Capacitance, V_{GS} 는 Gate에 인가된 전압 및 V_T 는 Threshold Voltage이다.

Piezojunction형은 반도체의 p-n접합에 응력이 인가되면, Energy Bandgap이 감소하고, Diffusion Length는 증가하여 Saturation Current가 증가하는 것을 이용한 것으로, 감도가 낮으며, Stylus 등으로 직접 응력을 가하여야 하므로 손상에 주의하여야 한다.

위에 언급한 압력센서의 종류중에서 압저항형과 용량형이 많이 쓰이고 있으며, 소형화 및 저렴한 가격을 유지하기 위하여 반도체 센서로 변환하는 추세에 있다.

4. Tactile 센서

앞 절에 언급한 압력센서와 유사한 원리를 이용하며, Array형태로 제작되어 힘을 감지

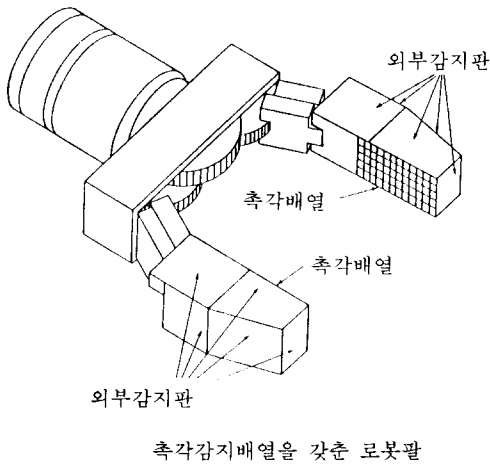


그림 4 Robot Gripper에서의 Tactile센서의 응용

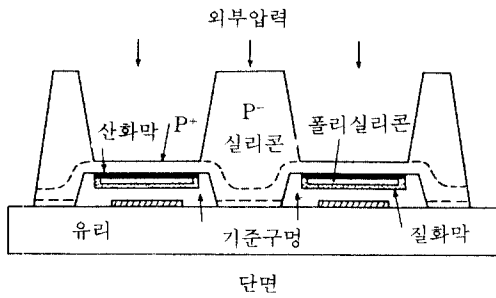
하는 센서로 Tactile센서가 이용되고 있다. Tactile센서는 그림 4와 같이 정돈되어 있지 않은 환경에서 작업을 수행하는 로봇의 그리퍼 등에 장착되어 로봇의 손에 잡혀 있는 물체에 가해지는 힘을 측정하여 미끄러짐이나 파손을 방지하고, 뜻하지 않은 장애물과의 충돌로 인한 피해를 없애는 목적으로 사용된다. Tactile센서는 종래의 Vision센서를 대체하거나, Vision센서와 협동으로 작업을 수행하는 데 이용될 수 있으며, 미세한 물체의 조립 및 운반, 어두운 곳 또는 보이지 않는 곳에서의 작업, 외계 및 해양에서의 작업, 장애인용 인공보철물, 물체표면의 상태를 인간의 손과 같이 접촉함으로써 인식하는 등의 응용분야에 사용될 수 있다.⁽⁸⁾

Tactile센서가 그리퍼 외부에 정착되는 경우에는 높은 Spatial Resolution을 요구하지 않으나, 내부에 장착되는 경우에는 각 방향에서의 힘을 감지하고, 잡고 있는 물체를 인식하여야 함으로 대개의 경우 Array형태로 제작되고, 각 Pixel이 단순한 on-off 스위치가 아닌 아날로그형태의 출력을 생성한다. 또한 메모리와 같은 2차원 Matrix로 구성되어 Row 및 Column의 선택에 따라 각

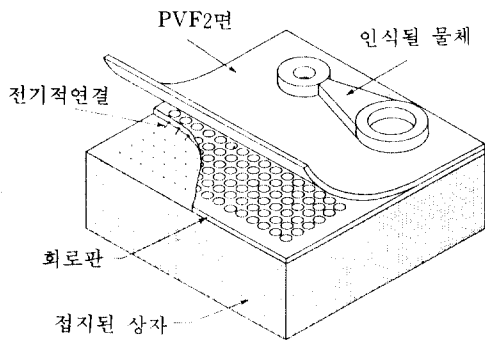
Pixel의 힘을 측정하여 Mapping할 수 있다. 따라서 분해능(resolution)의 향상을 위하여는 Pixel간의 간격을 줄이며, 각 Pixel의 감지능력을 향상시켜야 한다. 작동원리는 Resistive, Piezoelectric, 용량형 및 광학적인 방법이 있다. Resistive형은 압저항형과 접촉저항형이 있는데, 압저항형은 압력센서와 같은 구조에 힘을 전달하는 부분을 붙여서 제작하여 저항의 변화를 측정하며, 접촉저항형은 PCB기판과 전기전도성 고무(conductive rubber)로 구성되며, 그 사이에 분리물질(분리물질을 넣어 전도성고무와 기판위의 금속전극 사이의 접촉에 의한 저항을 측정한다. 이들은 간단한 구조로 구현될 수 있으나, 감도가 낮으며 Pixel간의 Crosstalk이 큰 단점이 있다.

용량형은 압력센서와 같은 구조에 힘을 압력으로 변환하는 Pad를 붙여 제작하며, 접촉에 의한 힘이 센서의 다이아프램에 전달되어 변형에 의한 Capacitance의 변화를 일으키는 원리를 이용한다.⁽⁹⁾ 압력센서와 마찬가지로 감도는 좋으나, 제작이 상대적으로 어려우며, Sensor Matrix 위에 Pad를 정착하므로, Pad를 통한 Pixel간의 Crosstalk을 최소화하여야 하는 문제점이 있다. 그림 5(a)에 구조가 나타나 있으며, Pixel간의 분리를 위하여 반도체공정에서 흔히 사용되는 절연체인 Silicon Oxide를 이용하였으며, Poly와 유리 기판위에 금속판 사이의 Capacitance를 측정한다.

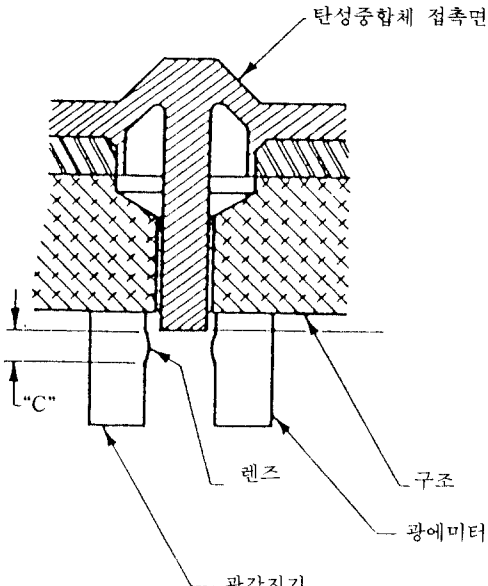
압전형은 PVDF(polyvinylidene fluoride)와 같은 Polymer를 그림 5(b)와 같이 형성하고, 접촉에 의한 Piezoelectric효과를 이용한다. 이 센서의 구조는 간단하나 DC 응답성이 없으며, 힘의 범위를 쉽게 조절할 수 없는 문제점이 있다. 광학적인 방법은 그림 5(c)에 보이는 미국 Lord사의 제품과 같이 Optical Fiber를 통한 광발신·수신기와 그 사이에 접촉힘에 의해 위, 아래로 움직이며 빛을 차단하는 봉으로 구성된다. 각 수신기



(a) Capacitive형



(b) Piezoelectric형



(c) Optical형

그림 5 Tactile센서의 종류

는 빛의 on-off 스위치에 해당되며, 고분해능을 얻으려면 많은(n-bit을 위하여는 2ⁿ개가 필요함) 소자가 필요하다.

5. 맺음말

시스템의 자동화, 지능화를 이루기 위해서 센서의 이용이 증가하는 추세에 있으며, 반도체 집적회로 제작기술을 근간으로 하는 마이크로머시닝 기술을 이용하여 센서의 소형화, 고성능화, 가격의 저렴화를 꾀할 수 있다. 이 글에서는 특히 기계장치와 연관이 많은 물리량을 측정하는 압력센서 및 이의 연장선상에서 Tactile센서의 원리와 종류에 대해 고찰해 보았다. 압력센서로는 상대압력 및 절대압력을 측정하며, 다이아프램 및 캔틸레버를 이용한 압저항형 (piezoresistive) 또는 용량형 (capacitive)이 고감도 및 소형화를 위해 널리 쓰이고 있다. 다이아프램과 같은 미세 기계구조는 마이크로머시닝 기술을 이용하여, 현재 μm 이하의 정확도로 제작이 가능하나, 2차원 및 3차원의 실제 응용에 쓸 수 있는 미세구조를 구현하기 위해서는 제작기술에 대한 연구가 필수적이며, 재료에 대한 개발도 병행되어야 할 것이다. 더욱이 센서가 동작하는 환경은 매우 험하므로, 저렴하고 신뢰성있는 패키징 기술 또한 개발이 필요하다. 미래의 풍요로운 생활을 위해서는 마이크로머신 자동화시스템, 의료기기, 수송수단에 이용될 마이크로센서의 개발이 필요하리라 생각된다.

참고문헌

- (1) Sulouff, R., 1991, "Silicon Sensors for Automotive Applications," Transducers '91, p. 170.
- (2) Howe, R., Muller, R., Gabriel, K. and Trimmer, S., 1990, IEEE Spectrum, p. 29.
- (3) Gopel, W., Hesse, J. and Zemel, J., Sen-

- sors, Vol. 1, p. 107.
- (4) Petersen, K., 1982. IEEE Proceedings, Vol. 70, No. 5, p. 420.
- (5) Quenzer, H., Benecke, W. and Dell, C., 1992, "Low Temperature Wafer Bonding for Micromechanical Applications," Proc. MEMS '92, p.49.
- (6) Middlehoek, S., 1989, "Silicon Sensors" Academic Press.
- (7) Tandeske, D., 1991, "Pressure Sensors" Marcel Dekker.
- (8) Harmon, L., 1982, "Automated Tactile Sensing," Robot IV Conf.
- (9) Suzuki, K., Najafi, K. and Wise K., 1989, "A 1024-Element High-Performance Silicon Tactile Imager," p. 674. 