

◆특집◆ 힘 측정 및 응용

촉각센서 개발 및 응용

김종호*, 이정일**, 이효직**, 박연규**, 김민석**, 강대임***

Development of tactile sensor and its application

Jong-Ho Kim*, Jeong-Il Lee**, Hyo-Jik Lee**, Yon-Kyu Park**, Min-Seok Kim**, Dae-Im Kang***

Key Words : Tactile sensor (촉각센서), Skin(피부), Force (힘), thermal conductivity(열전도도), MEMS (미소기전집적시스템), polymer(고분자)

1. 서론

최근 국가의 10 대 신성장 동력산업에 포함 되어 있는 RT(robot technology)는 향후 포스트 반도체 산업의 중요한 산업으로 국내 경제를 활성화 시키는 원동력이 될 것으로 전망된다. 이와 더불어 향후에는 현재의 산업용 로봇이 아닌 감각과 지능을 가진 인간친화적인 로봇이 출현할 것으로 기대된다. 즉 주변 환경을 인지하여 정보를 획득하고 지능적 판단, 행위 및 상호작용을 통하여 인간을 지원하는 지능형 로봇은 인간과의 상호작용을 통하여 감성을 이해하며 서비스 제공, 인간의 동작이나 작업을 지원 그리고 위험작업 수행, 인간이 불가능한 작업을 대신 할 수 있을 것이다. 따라서 이와 같은 임무를 효과적으로 수행하기 위해서는 추론, 판단을 할 수 있는 인공지능과 인간의 오감 기능인 센서 감지기술이 절대적으로 필요하다.

지금까지 로봇의 감각기능은 주로 시각, 청각에 집중된 반면 촉각, 후각, 미각기능을 갖는 센서 개발 연구는 미비한 상태이다. 특히 외부환경과의

접촉을 통한 접촉력 그리고 접촉부위에서의 미끄러지는 정도를 감지하는 촉각기능은 외부와의 상호교감을 일으키는 중요한 수단이다. 더 나아가 접촉부위의 표면조도, 접촉부위의 물성 등을 감지할 수 있는 기능부여는 보다 인간 친화적인 수단을 제공할 것이다. 또한 접촉 혹은 비접촉방식에 의해 대상물체나 주변환경에 대한 물리적 특성을 감지하고 제공하는 촉각 감지기술은 사람이나 로봇의 안전성, 로봇의 고성능화 및 지능화를 위해 절대적으로 필요한 기술이다. 한편 접촉을 통한 주변환경의 정보 즉 접촉력, 진동, 표면의 거칠기, 열전도도에 대한 온도변화 등을 획득하는 촉각기능은 인간 생활을 지원할 수 있는 개인용 로봇뿐만 아니라 혈관내의 미세 수술, 암 진단 등의 각종 의료진단 및 시술에 적용될 수 있기 때문에 그 중요성이 더해 지고 있다.

Fig. 1 은 평활피부의 단면구조로 대표적인 네 개의 수용기를 보여주고 있다. 각각의 수용기에 대한 설명은 다음과 같다. 먼저 Meissner 소체는 피부감각기의 40% 이상을 차지하여 피부 움직임 을 가장 잘 감지한다. 그리고 Merkel 수용기는 손의 피부 감각기관중 25%를 차지하며 피부를 누르는 감각에 가장 잘 반응하며, 진동에 대한 인식 기능을 일부 담당한다. 한편 Pacinian 소체는 피부 감각 중 가장 크며, 손의 피부 감각기관 중 13%를 차지한다. 이들은 피부의 가장 깊은 곳인 진피에 위치하고, 운동감과 미세한 접촉, 진동을 인식

* 표준과학연구원 물리표준부, 질량.힘 그룹

Tel. 042-868-5241, Fax. 042-868-5249

Email : jhk@kriss.re.kr

Flexible MEMS 특히, 촉각센서의 설계 및 개발 분야에 관심을 두고 연구활동을 하고 있다

** 표준과학연구원 물리표준부, 질량.힘 그룹

*** 표준과학연구원, 물리표준부

한다. 압력과 온도변화를 인지하는 Ruffini 소체는 방추형 구조로 피부감각기 중 약 19%를 차지한다.

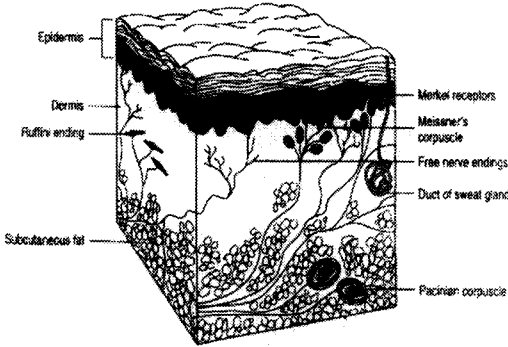


Fig. 1 A cross-sectional perspective of glabrous skin

Fig. 1 과 같이 사람의 피부는 여러 물리량을 감지할 수 있는 고감도의 센서라고 말할 수 있다. 특히 측정 물리량 중 힘과 열전도의 감지는 사람 피부의 기본적인 사양이다. 따라서 체감각 정보 중 힘 및 열을 동시에 측정할 수 있는 생체모방형 촉각센서는 향후 지능로봇의 촉각기능을 구현하는데 있어서 매우 중요하다. 한편 사람의 신체부위 중 손가락 끝, 혀 등은 공간 분해능이 1-2 mm 로 1 cm 이상인 등에 비해 매우 민감하다. 특히 다음과 같은 손가락 끝의 감각사양은 향후 지능로봇의 생체모방형 손을 개발하는데 있어서 매우 중요한 정보이다. 손가락 끝에 분포하고 있는 감각점은 5x10 에서 10x20 의 어레이 형태를 갖는다. 그리고 힘 감지 분해능은 0.005 - 0.1 N 이며 안정적이고 히스테리시스를 보이지 않는 것으로 밝혀지고 있다. 한편 동적범위폭은 1000:1 이며 히스테리시스가 없는 안정되고 반복적인 센서의 기능을 가지며 샘플링률은 100 Hz - 1000 Hz 이다¹.

현재 산업용 로봇에서 사용되고 있는 힘 측정 로드셀은 가장 초보적인 단계의 촉각센서라고 볼 수 있다. 그러나 로봇의 손목, 팔꿈치 등 관절에 사용되고 있는 6 자유도의 힘/토크 센서와 로봇의 그립퍼(gripper)용으로 압력 및 미끄러짐을 감지할 수 있는 다축 로드셀은 감지부 크기가 비교적 큰 관계로 감도가 낮은 문제점을 가지고 있다. 따라서 섬세한 힘제어를 요구하는 그립퍼 기능으로는 적합하지 않다. 한편 최근에 몇몇 연구자들은 반

도체 집적회로 제조기술의 하나인 미소기전집적시스템(MEMS) 제작기술을 이용하여 촉각센서 개발을 하고 있다. Mei 등² 은 반도체 미세가공기술을 이용하여 사각형박막 형태의 3 축 힘센서로 이루어진 촉각센서를 제작하여 물체의 형상인식 가능성을 보여 주었다. 특히 스탠포드 대학에서는 CMOS 공정을 통해 신호처리부와 100 μ m x 100 μ m 크기의 3 축 힘센서 감지부로 이루어진 4096(64 x 64)개의 어레이를 갖는 촉각센서를 개발하였다³. 그러나 이것은 실리콘 기반 MEMS 기술로 제작된 촉각센서로 유연성을 가지지 못하는 단점을 가지고 있다. 이런 문제를 해결하기 위해서 최근에는 flexible MEMS 기술 즉 고분자 기반의 촉각센서를 개발하려는 시도가 이루어지고 있다. 한 예로 캘리포니아 공대에서는 고분자와 실리콘 웨이퍼를 융합한 반도체 공정 프로세스를 확립하여 유동장의 압력 분포를 측정하는 센서를 제작하였다⁴. 그러나 이 센서는 외부물체와 접촉시 전단력만을 측정하기 때문에 지능로봇의 grasping 기능으로는 활용되는데 어려움이 있다. 물체를 원활하게 잡기 위해서는 접촉 압력뿐만 아니라 순간적인 미끄러짐을 감지할 수 있는 수평력 감지기능도 필요하다.

촉각센서가 지능로봇에서 유용하게 사용되기 위한 센서의 사양을 살펴보면 다음과 같다. 가장 우선 사양은 가능하면 센서가 사람의 피부처럼 유연성을 가져야 되는 것이다. 이것은 센서가 실리콘 기반이 아니라 실리콘 웨이퍼와 고분자의 융합 기술 또는 고분자 기반의 센서제작 기술이 필요하다는 것을 의미한다. 한편 지능로봇이 사람과 접촉할 경우 안전성은 매우 중요하다. 따라서 촉각센서 즉 인공피부는 수직력을 측정할 수 있어야 한다. 그리고 위에서도 언급한 것처럼 물체를 grasping 하기 위해서는 수직력과 수평력을 동시에 측정할 수 있어야 한다. 접촉에 의한 수직력과 미끄러짐에 의한 수평력을 독립적으로 동시에 측정기능은 물체의 질감 측정에도 역시 유용하다. 한편 지능로봇이 외부물체의 열질감 즉 열전도도 차이에 의한 물체인식을 하기 위해서는 히터기반의 열센서 기능이 추가되어야 한다. 한편 지능로봇에 사용되는 촉각센서는 수십 또는 수백 개의 센서 어레이 형태로 이루어지기 때문에 신호선 최적화 및 처리가 매우 중요하다. 따라서 센서 어레이 형태에 의한 여러 채널을 가지는 촉각센서가 주변과

원할한 상호작용을 하기 위해서는 다채널 어레이 센서들에 대한 고속 신호처리 시스템에 대한 개발과 이를 소형화 할 수 있는 IC 설계 및 제작기술이 요구된다.

지금까지 지능로봇과 촉각센서와의 관계, 촉각센서 사양 그리고 국외동향 등을 살펴보았다. 다음 절에서는 표준과학연구원 힘측정 및 평가 연구실에서 지금까지 수행한 그리고 현재 수행하고 있는 세가지 형태의 촉각센서 개발 및 응용분야를 소개하고자 한다.

2. 촉각센서 개발 동향

2.1 FSR 기반 촉각센서

FSR(force sensitive resistor) 센서는 접촉에 의한 수직력을 측정할 수 있으며 유연성을 가진다. 따라서 이 센서는 FSR 센서 어레이를 통하여 접촉하는 물체의 형상 즉 체압을 측정할 수 있다. 그러나 FSR은 수직력만을 측정하기 때문에 수평력 감지가 요구되는 분야 즉 grasping 그리고 물체의 질감 측정에는 적용할 수 없는 단점을 가지고 있다. 본 연구실에서는 이 단점을 보완하기 위하여 압전 재료 기반의 PVDF 필름을 융합하여 미끄러짐을 감지할 수 있는 기능을 구현하였다. PVDF 필름은 유연성을 갖추었으나 FSR 센서와는 달리 정적인 하중하에서 신호를 얻는 어려움이 있다. 그러나 동적신호 검출이 쉽기 때문에 접촉하는 물체의 표면 거칠기 정도를 평가하는 장치로 사용될 수 있다.

Fig. 2 는 FSR 센서와 PVDF 필름을 융합한 촉각센서 감지부를 보여준다. 먼저 수직력을 측정하기 위하여 8x8 어레이로 구성된 FSR 센서들을 밑바닥에 배치시킨다. FSR 센서 하나의 크기는 8x8 mm 이며 64(8x8)채널의 경우 촉각센서의 전체크기는 대략 10 cm x 10 cm 이다. 한편 외부물체와의 접촉시 접촉력이 각 센서들에게 쉽게 전달되도록 변형이 쉬운 고무판(soft layer)을 FSR 센서들 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 64 개의 FSR 센서 채널과 1 개의 PVDF 채널로 이루어졌으며 0.1 N - 20 N 크기의 수직력을 측정할 수 있다. 그리고 신호샘

플링 속도는 100 ms 이다.

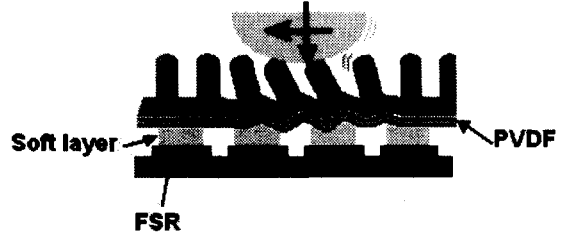


Fig. 2 Schematic diagram of a sensing element of tactile sensor using FSR sensor and PVDF film

수직력을 측정하는 FSR 센서는 국내회사인 ㈜ 테크스톰의 제품을 사용하였으며 미끄러짐을 감지하는 PVDF 필름은 미국 내에 있는 MSI(주)의 제품을 사용하였다. 사용된 PVDF 필름은 52 μm 의 두께를 가지며 FSR 센서 어레이 크기인 10 cm x 10 cm 와 같다. Fig. 3 은 제작된 촉각센서를 보여주고 있다. Fig. 2 처럼 물체의 접촉에 의한 미끄러짐이 잘 전달될 수 있도록 고무를 이용하여 돌기로 이루어진 외부표피를 제작하여 PVDF 필름에 부착하였다. 이것은 촉각센서가 외부물체와 접촉한 상태에서 수평방향으로 움직일 경우 물체의 표면 즉 거칠기 정도를 측정할 수 있는 기능으로 활용될 수 있다. 그러나 FSR 기반 촉각센서는 FSR 센서의 크기 문제로 분해능이 작다. 따라서 높은 분해능을 요구하는 손가락 끝보다는 사람의 등과 같이 분해능이 작은 부위에 활용될 수 있을 것이다. 한편 분해능을 높이기 위해서는 반도체 공정기술을 이용한 설계 및 제작기법이 요구된다.

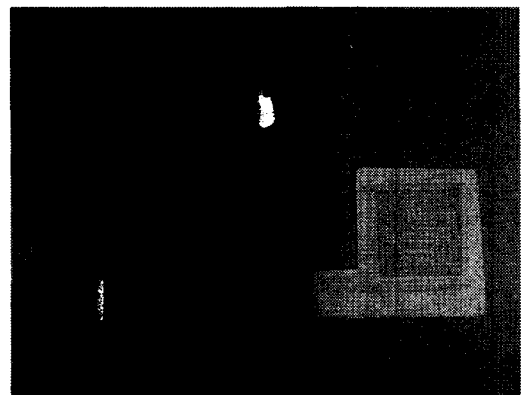


Fig. 3 A tactile sensor using FSR sensor(64 channels) and PVDF film(1 channel)

2.2 실리콘웨이퍼 기반 촉각센서

촉각센서의 분해능을 높이기 위해서는 반도체 공정기술을 이용한 MEMS 설계 및 제작기술이 요구된다. 현재 본 연구실에서는 수직력 및 수평력을 동시에 측정할 수 있는 3 축 힘센서와 열센서를 융합한 촉각센서를 개발하고 있다. Fig. 4 는 3 축 힘센서와 히터 기반의 열센서가 융합된 촉각센서의 개념도를 보여주고 있다. 실리콘웨이퍼 기반 촉각센서는 3 축 힘센서 네 개와 히터 기반 네 개의 열센서로 구성되었다. 촉각센서 개발 사양은 다음과 같다: 1) 인공피부 크기 : 10 mm x 10 mm 정도; 2) 공간분해능 3 mm 이하; 3) 촉각센서 힘 용량 : 20 N 정도; 4) 3 축 힘센서 용량 : 5 N(분해능 : 0.05 N 이하); 5) 온도감지 분해능 : 1 °C; 6) 샘플링 속도 : 100 ms 이하.

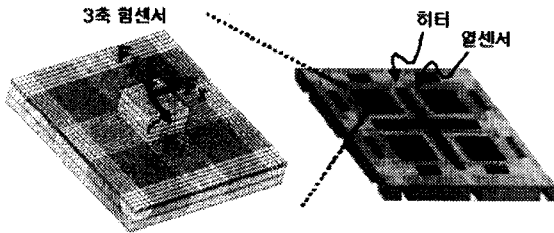


Fig. 4 Schematic diagram of a tactile sensor using three-component force sensor and thermal sensor based on heater

3 축 힘센서는 2.4 mm x 2.4 mm 크기의 유한사각형 박막을 가지며 3 축 힘을 동시에 측정하기 위하여 여러 개의 압저항(piezoresistor)을 이용하였다. 또한 힘센서의 감도향상 및 온도보상을 고려하기 위해서 로드셀의 스트레인게이지에 해당하는 압저항의 위치를 최적화하였다. 그리고 압저항의 위치를 고려하여 세 하중에 대한 상호간섭을 최소화 할 수 있는 완전브릿지회로(full bridge circuit)를 구성하였다. Fig. 5 는 힘측정에 사용되는 세 하중 F_x , F_y , F_z 를 받고 있는 사각형 모양의 박막형 3 축 힘센서 감지부 형상을 보여준다. 실리콘 미세 가공기술로 제작한 힘센서 감지부는 하중블록 (loading block)과 전체 구조를 지지하는 지지블록 (side block)으로 구성된다. 빔의 길이(L)를 400 μm , 하중블록의 길이(d)를 200 μm , 막의 두께(h)를 45 μm , 막의 윗면에서 하중블록의 윗면까지의 높이

(h_1)를 250 μm 로 설계한 감지부 형상을 보여준다. 한편 열전도도를 이용한 열센서는 히터와 열전도도를 측정할 수 있는 금속선이 필요하다. 열선의 재료로는 금을 선택하였다. 먼저 실리콘과 금의 접착력 향상을 위하여 니켈(Ni)과 티타늄(Ti)을 각각 증착후에 금을 증착하였다.

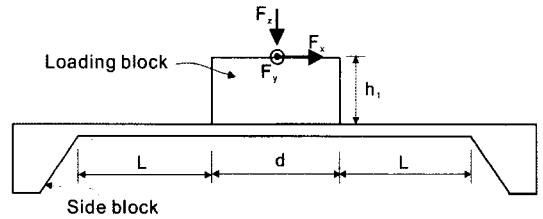


Fig. 5 Schematic diagram of a sensing element subjected to F_x , F_y and F_z loadings

Fig. 6 은 반도체 공정 프로세스를 이용하여 제작한 촉각센서를 보여준다. 센서 감지부 제작은 500 μm 의 두께를 가지는 4 인치 크기의 웨이퍼를 사용하였다. 사진공정과 이온주입 공정을 통하여 압저항을 형성하였다. 그리고 메탈 lift-off 공정을 통하여 힘센서에 필요한 압저항들간의 연결선 및 열센서에 해당하는 히터와 온도측정용 금속선을 제작하였다. 힘센서의 하중블럭은 SU-8 PR 을 사용하여 제작하였고 감지부의 멤브레인은 KOH 식각을 통하여 제작하였다. Fig. 7 은 손가락 끝으로 Fig. 6 에서 보이는 촉각센서를 순간적으로 접촉시켰을 때 네 개의 힘센서 반응을 보여 주고 있다.

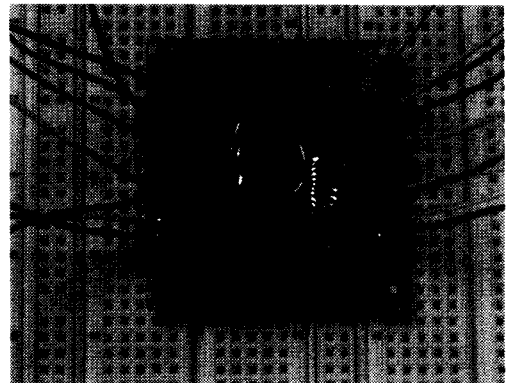


Fig. 6 The fabricated tactile sensor with four three-component force sensors and four thermal sensors

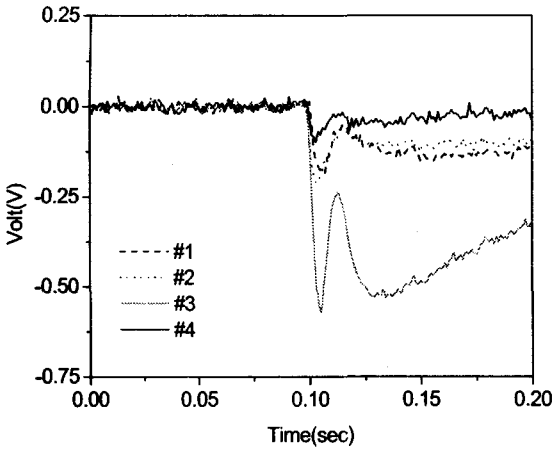


Fig. 7 Response of four force sensors in case of touching tactile sensor with finger tip

제작된 촉각센서는 3 축의 힘을 측정할 수 있고 분해능을 높일 수 있기 때문에 지능로봇의 grasping 기능에 필요한 센서로 활용될 수 있다. 그러나 실리콘 웨이퍼 기반이기 때문에 부착시킬 면이 반듯이 평평해야 하는 단점을 가지고 있다. 따라서 촉각센서가 지능로봇 및 다른 분야에 범용적으로 적용되기 위해서는 다음절에 언급하는 유연성을 갖는 촉각센서 즉 인공피부의 개발이 필수적이다.

한편 촉각센서 또는 3 축 힘센서를 개발하기 위해서는 상호간섭 오차, 감도, 재현도, 히스테리시스 등의 평가는 매우 중요하다. Fig. 8 은 센서의 성능을 평가하기 위한 장치를 보여주고 있다. 이 평가장치는 한 축의 수직력과 두 축의 수평력을 측정하기 위한 3 축 로드셀을 이용하였다. 그리고 로드셀이 부착된 지그를 상하로 움직이기 위하여 수직으로 승강되는 이송대를 사용하였다. 힘을 부가하기 위한 탐침부는 탈, 부착이 가능한 직경 20 μm 인 다이아몬드 팁을 이용하였다. 한편 3 축 힘센서의 경우 3 축 뿐만 아니라 각도에 따른 방향성에 대한 평가는 매우 중요하기 때문에 이 모든 조건을 만족시킬 수 있는 3 차원 스테이지를 개발하였다. 제작된 스테이지를 이용할 경우 촉각센서를 x, y, z 축 중심으로 0 도에서 180 도까지 회전가능하여 소자의 방향성에 대한 감도평가를 수행할 수 있다. 현재 제작된 촉각센서에 대한 평가를 진행하고 있다.

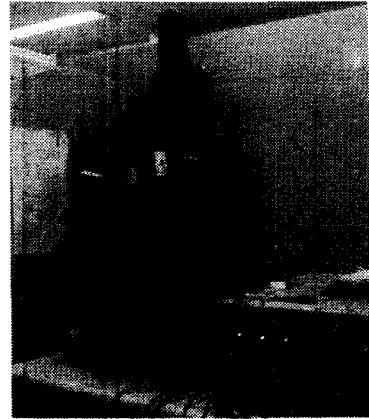


Fig. 8 The fabricated tester for evaluation of three-component force sensor or tactile sensor

2.3 유연성 기반 촉각센서

앞절에서도 지적했듯이 촉각센서가 지능로봇 및 다른 분야에 광범위하게 활용되기 위해서는 유연성을 갖는 촉각센서의 개발이 중요하다. 본 연구실에서는 현재 “인간기능 생활지원 지능로봇” 프론티어 사업의 지원을 받아 고분자 기반 인공피부를 개발하고 있다. 사업에서 개발하고자 하는 핵심 인공피부 사양은 유연성을 가져야 하고 3 축 힘과 온도를 동시에 측정하는 것이다. 좀 더 세부적인 사양은 다음과 같다: 1) 인공피부 크기 : 10 mm x 10 mm 정도; 2) 공간분해능 1 mm 이하; 3) 곡률반경 15 mm 이하; 4) 인공피부 힘 용량 : 30 N 정도; 5) 3 축 힘센서 용량 : 0.3 N(분해능 : 0.003 N 이하); 6) 온도감지 분해능 : 1 °C; 7) 샘플링 속도 : 20 ms 이하.

3 축 힘센서는 1 mm x 1mm 크기의 유한사각형 박막을 가지며 3 축 힘을 동시에 측정하기 위하여 여러 개의 Ni-Cr 기반의 저항체를 이용하였다. 히터 및 열센서는 금을 사용하였다. 유연성을 갖는 인공피부를 제작하기 위해서 고분자 기반의 반도체 공정 프로세스를 설계하였다. 그리고 고분자 재료에 대한 반도체 공정 조건 파라미터를 확립하였고 10 mm x 10 mm 크기의 인공피부에 100 개의 3 축 힘센서가 들어 가도록 제작하였다. Fig. 9 는 Flexible MEMS 기술을 이용하여 제작된 인공피부 감지부를 보여 주고 있다. 현재 제작된 인공피부의 특성을 평가하기 위하여 신호수집장치를 제작하고 있는 중이다. 향후 본 연구에서 개발하고 있

는 인공피부는 향후 지능로봇의 손가락 그리고 손바닥 등에 부착되어 지능로봇의 촉각기능을 할 수 있을 것으로 기대된다.

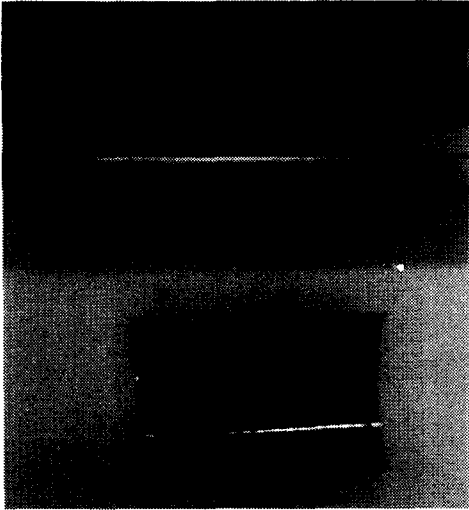


Fig. 9 The fabricated tactile sensor using surface micromachining based on polymer

3. 결론

현재 촉각센서에 대한 연구는 국내외적으로 많이 진행되고 있지는 않으나 로봇의 발달과 더불어 중요성이 더해지고 있다. 더구나 촉각센서는 로봇뿐만 아니라 혈관내의 미세 수술, 암진단 등의 의료진단 및 시술에 활용될 수 있기 때문에 향후 광범위한 시장 잠재력을 가지고 있다고 볼 수 있다. 한편 촉각제시 기술과 접목하여 가상환경 구현기술에도 활용될 수 있기 때문에 향후 촉각센서에 대한 핵심원천기술의 개발 및 확보는 더욱 더 중요하다. 그러나 촉각센서가 로봇을 포함한 다양한 분야에 활용되기 위해서는 핵심 원천 기술 뿐만 아니라 보다 실질적인 즉 강건성을 갖춘 센서 개발이 요구된다. 또한 접촉하는 물체에 대한 촉각정보처리기술, 다양한 물체접촉에 대한 데이터베이스 기술 그리고 이를 바탕으로 한 인공지능 기술 등 타 관련 분야에 대한 연구도 함께 요구된다.

후 기

본 연구는 한국표준과학연구원 기관고유 사업인 미래 유망 신기술 과제에 연구비 지원으로 이루어진 것으로서 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Russell, R. A., Robot tactile sensing, Prentice hall, 1990.
2. Mei, T., Li, W.J., Ge, Y., Chen, Y., Ni, L. and Chan, M.H., "An integrated MEMS three-dimensional tactile sensor with large force range," Sensors and Actuators(A), Vol. 80, pp.155-162, 2000.
3. Kane, B.J., Cutkosy, M.R. and Kovacs, G.T.A., "CMOS-compatible traction stress sensor for use in high-resolution tactile imaging," Sensor and Actuators (A), Vol. 54, pp.511-516, 1996.
4. Jiang, F., Lee, G. B., Tai, Y.C. and Ho, C.M., " A flexible micromachine-based shear-stress sensor array and its application to separation-point detection," Sensors and Actuators, Vol. 79, pp. 194-203, 2000.