

분포형 유연촉각센서

Distributed Flexible Tactile Sensor

유 기 호, 윤 명 종
(Kee-Ho Yu and Myung-Jong Yun)

Abstract : A flexible tactile sensor array with 8×8 tactile elements is designed and fabricated. The material of the sensor is PVDF(polyvinylidene fluoride) film and flexible circuitry is used in the fabrication for the flexibility of the sensor. The experimental results on static and dynamic properties of the sensor are obtained and examined. The signals of a contact pressure to the sensor are sensed and processed in the DSP system in which the signals are digitalized and filtered. The processed signals of the sensor outputs are visualized in a personal computer for illustrating the shape and force distribution of a contact object. The reasonable performance for the detection of contact state is verified through sensing examples.

Keywords : flexible tactile sensor, tactile array, PVDF film, static and dynamic properties, signal processing, contact state, shape and force distribution

1. 서론

촉각센서는 종래의 산업적인 수요이외에도, 최근 다양한 분야에서 수요 및 역할이 기대되고 있다. 가까운 미래에 보편화될 것으로 예상되는 개인용 또는 서비스 로봇의 경우, 인간을 포함한 외부 장애물 및 작업 대상의 접촉위치, 접촉압력, 접촉형상 등을 감지할 필요가 있다. 또한 최근 인터넷의 보급과 함께 가상현실의 역할이 부각되고 있는데, 현장감 있는 가상공간의 구축을 위해서는 촉각, 역각 등의 검출 및 물리적인 피드백이 불가결하다. 이외에도 재활용 의뢰기구의 개발, 치아교정의 확인, 스포츠 용품의 개발 및 스포츠 동력학 해석 등에도 응용이 기대되고 있다.

한편, 인간의 촉각은 촉압각, 온각, 냉각, 통각 등의 감각 검출기능이 있으며, 얇고 유연하며, 넓은 면적에 고밀도의 감각기가 배치되어 있다. 이와 같은 인간의 촉각기능 및 형상을 공학적으로 구현하는 것은 현재의 기술로서는 상당히 어려운 것이 현실이다. 인공촉각을 개발하기 위해서는, 얇고 유연한 구조에 검출소자를 어떠한 방법으로 고밀도로 배치할 것인가 하는 구조, 재료의 문제와 다수의 검출기로부터 얻어지는 대량의 신호를 어떠한 방법으로 처리할 것인가 하는 정보처리의 문제가 해결되어야 할 것이다. 이와 관련하여 로봇의 촉각센서에 요구되는 이상적인 사양을 산업 및 연구계로부터 조사하여 정리한 결과도 있다[1].

현재까지 압전 및 압전저항소자, 광학, 탄소섬유, Capacitive 물질, 초음파 등의 다양한 재료 및 구조를 이용하여 로봇의 손가락 및 핸드부에 적용할 목적으로 촉각센서에 관한 연구가 수행되어왔다[2-13]. 그중 압전저항소자형

센서[6]의 경우 정적인 힘 검출에는 용이하나 비교적 빠른 동적인 힘 검출에는 미흡하고 일정한 하중에 대해 시간이 지남에 따라 센서 출력이 변하고 하중이 제거된 후 원래의 모양으로 회복되는데 긴 시간이 필요하며 이력현상과 온도에 의존하는 단점을 가지고 있다. 반면 압전형 센서[11,13]는 동적인 힘 검출에는 우수하나 정적인 힘 검출에는 취약성을 나타낸다. 두 경우 중 후자가 인간의 피부감각과 유사하다고 할 수 있다. 광학형 센서[7]는 매우 높은 분해능을 가지고는 있지만 고가이며 부피가 크고 소형화가 어려운 단점을 가지고 있다. 이와 유사하게 접촉물체에 의해 용량(capacitance)이 변하는 원리를 이용한 Capacitive형 센서[8], 화학 저항(chemical-resistive)형 센서[9], 전자기 커플링(electro-magnetic coupling)을 측정하는 유도(inductive)형 센서[10], 음향형(acoustic) 센서[12] 들도 구조가 복잡하며 부피가 커 소형화가 어려운 단점들을 가지고 있다. 한편으로는 근접센서를 로봇 암에 분포시키거나 회전을 고려한 관절 부용의 접촉센서를 고안하는 등[14,15], 로봇 암을 포함하여 로봇 전체에 촉각을 분포시키고자하는 연구가 부분적으로 수행되었다. 그러나 아직도 제작의 용이성, 구조적인 유연성, 적용의 범용성 등을 고려하면 미흡한 것이 실정이다.

한편, 이상적인 촉각센서에 요구되는 특성은 다음과 같다 [2]. 첫째 센서의 표면은 유연하고 내구성이 있어야 하고, 둘째 1-2mm의 공간 분해능을 가지고 있어야 한다. 셋째 50-200개의 촉각검출요소로 구성되어야 하며, 마지막으로 약 0.05N(5g)의 스톱홀드(threshold) 등이 요구된다. 이에 본 연구에서는 충분한 유연성을 가지고 있어 로봇을 포함하여 다양한 형상에 피복할 수 있으며, 촉각검출요소의 형상이나 크기를 응용형태에 따라 다양하게 설계하여 실험실 수준에서도 용이하게 제작할 수 있는 촉각센서를 개발하였다. 그동안 필자들은 센서의 재료로서 고분자 압전필름(polyvinylidene fluoride; PVDF)이 적합함을 확인하고 촉각검출 요소의 수가 각각 $16(4 \times 4)$, $64(8 \times 8)$ 개인 촉각센서를 시

*책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 9. 19., 채택확정 : 2003. 11. 15.

유기호 : 전북대학교 기계항공시스템공학부

(yu@chonbuk.ac.kr)

윤명종 : 전북대학교 대학원 메카트로닉스공학과

(mjyoon@mail.chonbuk.ac.kr)

※ 본 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2001-002-E00026)

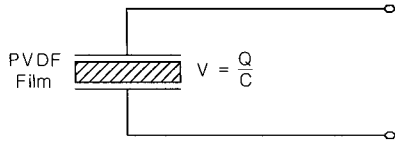


그림 1. PVDF 필름의 등가회로.
Fig. 1. Equivalent circuit of PVDF film.

형제작하여 출력특성을 확인하고 검출실험을 통하여 기초기술을 확립하였다[16,17]. 본 연구에서 설계, 제작한 센서는 검출요소 1개의 면적이 $2mm \times 2mm$ 로 이전의 것 ($5mm \times 5mm$)에 비하여 더 작아 로봇 손등에 요구되는 고밀도 분포를 만족하며, 센서 출력특성을 보정하기 위한 실험방법을 개량하여 신뢰성이 높은 결과를 얻었다. 이하, 센서의 제작방법 및 구조, 출력특성, 신호처리, 검출실험결과를 소개한다.

II. 설계 및 제작

1. PVDF 압전필름

본 연구에서 센서의 재료로 사용된 PVDF 압전필름은 가해진 응력의 변화량에 따라 전압을 발생하는 얇은 박막의 필름으로 $0.001Hz - 10^9Hz$ 의 응답주파수 범위와 $10^{-8} - 10^6 psi$ 의 동적 범위, 그리고 피에조 세라믹보다 10 배이상 높은 전압 발생응의 특성을 가지고 있으며 유연하고 가벼우며 넓은 면적과 임의의 형상에 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. PVDF의 기본 회로를 Fig 1에 나타내었다. 여기서 V 는 개회로(open-circuit) 전압, C 는 PVDF 필름의 용량, Q 는 PVDF 필름에서 발생한 전하량으로 PVDF는 콘덴서 역할을 한다.

PVDF의 출력특성은 전하모드, 전압모드에 따라 각각 다음과 같이 얻어진다.

$$D = \frac{Q}{A} = d_n X_n \tag{1}$$

$$V_o = g_n X_n t$$

여기에서, D 는 전하밀도, Q 는 전하, A 는 전극면적, V_o 는 출력전압, d_n 과 g_n 은 압전상수, X_n 은 작용한 압축력, t 는 필름의 두께이다. $n=1, 2, 3$ 은 작용한 힘의 방향축이며, 각각 필름의 길이방향, 폭방향, 두께방향을 나타내고 있다. 본 연구에서는 두께방향에 작용한 힘만을 고려하므로 $n=3$ 이 적용된다. 한편 사용된 PVDF 필름의 제원은 표 1과 같다.

2. 설계 및 제작

본 연구에서 설계, 제작한 센서의 사진을 Fig 2에 나타내었다. PVDF 필름의 한쪽 면에 공통전극, 다른 한 쪽 면에 8×8 의 전극을 부착하여 64개의 촉각검출요소(tactile element)를 가지도록 설계하였으며, 각각의 검출요소가 외부의 접촉 압력에 상응하는 전압을 발생하도록 하였다. 이하, 구체적인 제작방법과 구조를 소개한다.

표 1. PVDF의 파라미터.

Table 1. Parameters of PVDF.

Parameter	Value	Unit
Thickness t	28	μm
Piezoelectric coefficient d_3	-33	$(10^{-12}) C/N$
Piezoelectric coefficient g_3	-339	$(10^{-3}) Vm/N$
Capacitance C	380	pF/cm^2

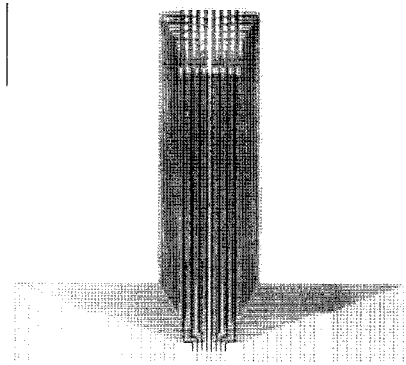


그림 2. 제작된 센서의 사진.
Fig. 2. Photograph of fabricated sensor.

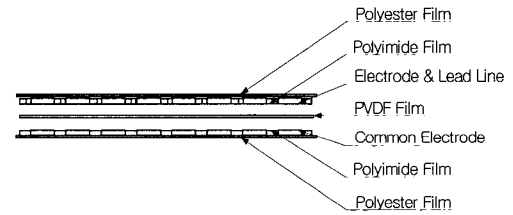
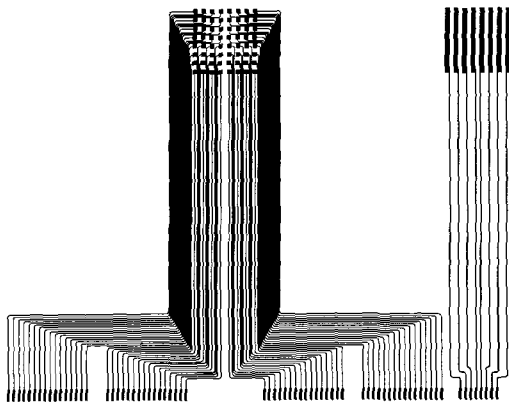


그림 3. 센서의 단면구조.
Fig. 3. Cross section structure of sensor.

Fig 3은 FPC(Flexible Printed Circuit) 기법을 이용해 제작된 촉각센서의 단면구조를 나타내고 있다. FPC는 연성회로 기판이라고도 불리우며, FW(Flexible Wire) 또는 FC(Flexible Circuitry)로 통용되는 전자부품이다. 기존의 PCB(Printed Circuit Board)와의 차이점은 배선간 절연물로 Polyimide 필름을 사용하므로 기존 PCB에 비해 대단히 얇고 가벼우며 두께가 $100\mu m$ 정도의 필름이므로 굴곡이 가능하고 입체적인 배선이 가능하다. 제작된 촉각 센서는 64개의 촉각검출요소를 가지도록 PVDF 필름 양면에 공통전극(common electrode)과 8×8 의 전극(electrode)을 두었으며, 이들로부터 출력신호를 얻기 위하여 리드선(lead line)을 두었다. 또한 접촉 물체와의 절연 및 촉각센서의 손상을 방지하기 위하여 센서의 표면과 배면에 폴리에스터 필름을 부착하였다.

이상에서 사용된 각각의 전극과 리드선, 공통전극에 대한 형상을 Fig 4에 나타내었다. 촉각검출요소의 크기는 $2mm \times 2mm$ 이며 촉각검출요소간의 간격은 $2.1mm$, 리드선의 두께는 $0.3mm$ 이고 유효 검출면적의 크기는 $30.7mm \times 30.7mm$ 이다.



Electrode and lead line(left)

Common electrode(right)

그림 4. 센서제작에 사용된 적층 패턴.

Fig. 4. Pattern of layers used for sensor fabrication.

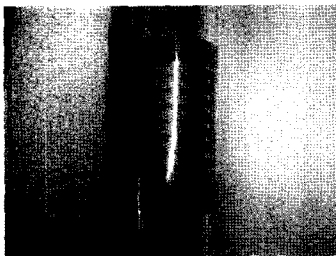


그림 5. 봉에 부착된 센서.

Fig. 5. Attached sensor on rod.

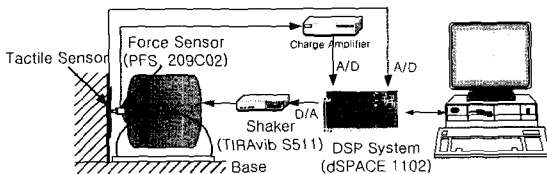


그림 6. 출력특성평가를 위한 실험장치.

Fig. 6. Experimental setup for evaluation of output characteristics.

이와 같이 제작된 센서는 충분한 유연성을 가지고 있어 로봇의 손뿐만 아니라 팔, 몸체 등의 다양한 형상을 가지는 기구부에도 피복할 수 있다. Fig 5는 제작된 센서를 아크릴 봉에 부착한 사진으로, 센서가 유연하여 임의의 형상에도 용이하게 적용할 수 있음을 알 수 있다.

III. 출력특성 평가

제작된 촉각센서의 출력특성을 평가하기 위하여 각 검출 요소의 출력특성은 동일하다는 가정아래 한 개의 검출요소를 임의로 선정하여 가진 해머(impulse hammer)로 검출요소의 중심에 다양한 충격력을 가하고 그로 인해 나타나는 검출요소의 출력을 기록하였다. 이때 가해지는 충격력은 가진 해머의 형상을 고려하여 점접촉에 의한 충격으로 가정하였다.

Fig 6은 출력특성을 평가하기 위한 실험장치로, 힘센서

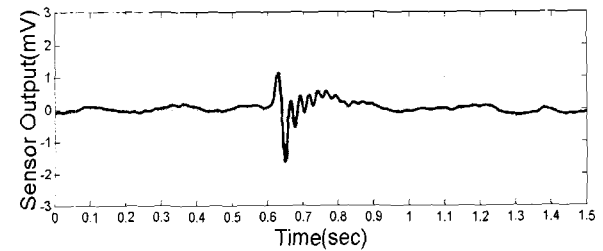
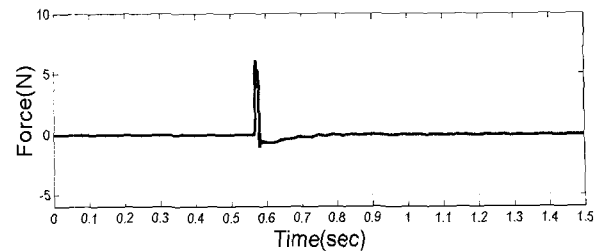


그림 7. 임펄스 힘에 대한 센서의 출력.

Fig. 7. Sensor output to impulse force.

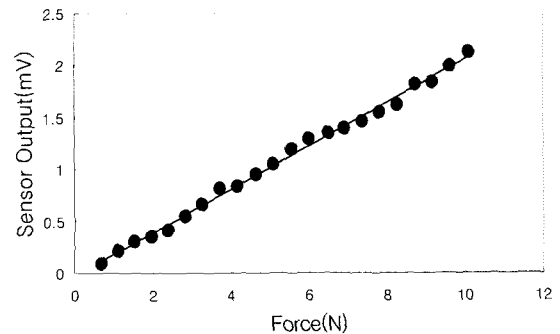


그림 8. 센서 교정.

Fig. 8. Sensor calibration.

(PFS209C02)를 부착한 가진기(TirAvib S511)로 지지대에 고정되어 있는 촉각센서에 다양한 힘을 가했다. 이때 얻어진 힘센서와 촉각센서의 신호를 신호처리시스템(dSPACE 1102)을 이용하여 처리, 비교하여 출력특성을 평가하였다.

Fig 7은 센서에 임펄스 형태의 힘을 가했을 때의 출력이다. 위의 그림이 가진기에 부착된 힘 센서의 출력이며, 아래의 그림이 촉각센서의 출력으로서 소프트웨어적인 신호처리에 의한 시간지연(약 50ms)을 보이고 있다. 이는 필터를 하드웨어적으로 구성하여 신호처리를 할 경우 상당부분 줄일 수 있다. 또한 출력에 채터링 현상이 나타나고 있는데, 이는 센서 구조와 가진기로 외부힘을 인가했기 때문에 발생한 현상으로 센서를 좀더 유연하게 제작한다면 감소시킬 수 있다. 이와 같은 임펄스 형태의 힘을 작은 값에서부터 점점 증가시키면서 센서의 출력을 기록하여 정리한 결과를 Fig 8에 나타내었다. 가로축이 작용한 힘이며, 세로축이 센서의 출력이다.

약간의 편차(표준편차 0.041)를 포함하고 있지만, 거의 선형적인 특성을 보이고 있으며, 실험결과를 1차식으로 근사하여 다음과 같은 관계식을 얻었다.

$$Y = 0.21X - 0.03 \tag{2}$$

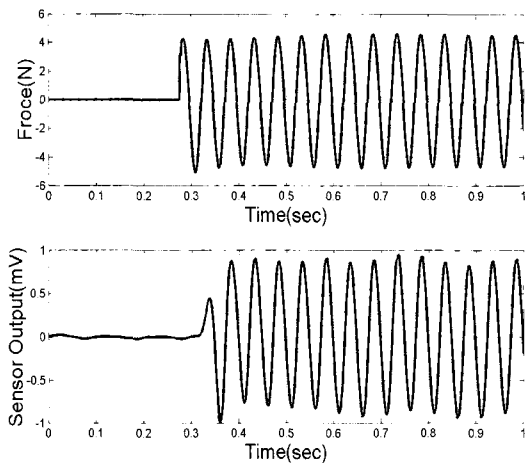


그림 9. 정현파 입력에 대한 센서의 출력 예.
Fig. 9. Example of sensor output to sinusoidal input force.

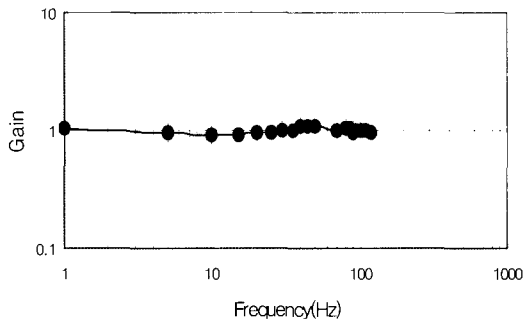


그림 10. 센서의 주파수 응답.
Fig. 10. Frequency response of sensor.

여기에서, X는 힘의 크기(N)이며, Y는 촉각센서의 출력(mV)이다. 한편, 스톱레쉬홀드(threshold)는 0.5N 정도로 서론에서 언급한 일반적인 응용에는 비교적 적합한 특성을 가지고 있음을 알 수 있으며, 구조적인 개량을 거친다면 스톱레쉬홀드 값을 더 낮출 수 있는 가능성이 있다.

다음으로 동적인 입력에 대한 센서의 출력특성을 검토하기 위하여 가진기로 정현파적인 힘을 가하고 그때 얻어진 센서의 출력을 기록하였으며, 한 예로 Fig 9에 나타내었다. 위의 그림이 가진기에 부착된 힘 센서의 출력이며, 아래의 그림이 촉각센서의 출력이다. 약간의 시간지연(약 50ms)을 포함하고는 있지만, 입력의 동적인 변화를 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 위와 같은 실험을 다양한 입력주파수에 대하여 반복하여 센서의 주파수 응답을 얻어 Fig 10에 정리하였다. 실용 범위의 넓은 대역폭에 걸쳐 거의 일정한 입출력 비가 얻어지고 있음을 알 수 있다.

IV. 신호처리

1. 시스템 구성

촉각센서의 신호처리 시스템 구성을 Fig 11에 나타내었다. 64개의 촉각검출요소로부터 나오는 대량의 신호를 처리하기 위하여 64개의 신호를 4등분하여 16개씩 4개의 아날로그 멀티플렉서(16-channel CMOS analog multiplexer; Maxim, MAX 306)를 사용하여 일정시간 간격을 두고 순차적으로

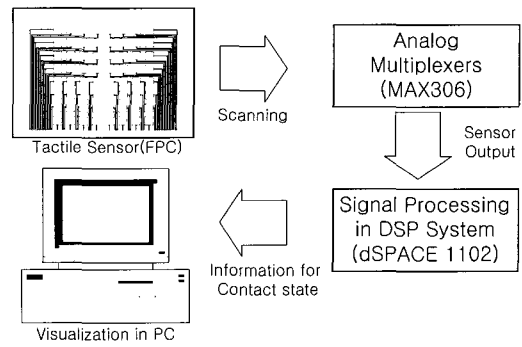


그림 11. 신호처리 시스템 구성
Fig. 11. Configuration of signal processing system

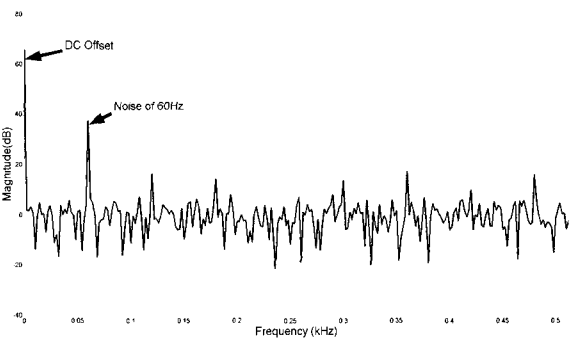


그림 12. 센서출력의 스펙트럼.
Fig. 12. Spectrum of sensor output.

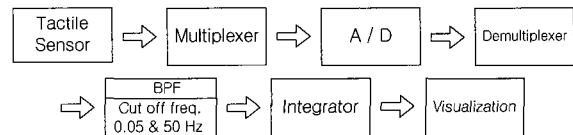


그림 13. 신호처리 흐름도.
Fig. 13. Block diagram of signal processing flow.

검출하도록 하였다. 이때 각각의 촉각검출요소의 검출시간 간격은 8ms이다. 아날로그 멀티플렉서를 통한 신호는 컴퓨터에 장착된 실시간 DSP 시스템(dSPACE 1102)에 순차적으로 입력한 후 A/D 변환 및 필터링을 거친다. 한편 DSP 시스템상의 신호처리 알고리즘은 입력된 데이터를 이용하여 접촉형상 및 압력분포를 추정하고 영상 처리하여 접촉상태를 가시화한다.

2. 신호처리

신호처리 알고리즘을 설계하기 위하여 센서의 출력특성에 관한 스펙트럼을 얻어 Fig 12에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 것처럼, 직류전압성분과 교류전원(60Hz)에 의한 잡음이 센서출력에 큰 영향을 미치고 있어, 이들을 제거 또는 완화하는 필터의 설계가 필요하였다. 신호처리 알고리즘의 개략도를 Fig 13에 나타내었다. 아날로그 멀티플렉서를 통하여 순차적으로 검출된 일련의 신호를 검출요소별로 분리하는 과정(Demultiplex)을 거친다. 이렇게 분리된 촉각검출요소들의 신호에서 직류전압성분과 교류전원에 의한 잡음

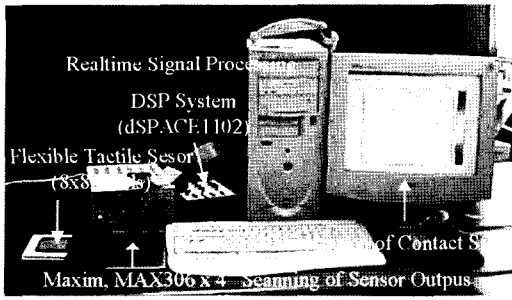


그림 14. 분포형 유연촉각센서 시스템.

Fig. 14. Distributed flexible tactile sensor system.

및 전기적, 기계적 잡음을 없애기 위하여 차단주파수가 각각 0.05Hz와 50Hz인 Butterworth식 대역통과필터(Band Pass Filter; BPF)를 사용하였다. 이렇게 얻어진 신호는 촉각검출 요소에 작용한 힘의 시간변화량을 나타내고 있기 때문에 적분을 취함으로써 시간에 따른 작용 힘의 변화를 파악할 수 있으며, 이를 개인용 컴퓨터에서 영상처리하여 힘의 분포 및 동적인 변화를 실시간으로 가시화하였다.

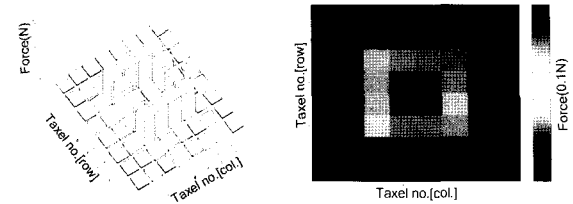
V. 검출실험 및 고찰

이상에서 소개한 분포형 유연촉각센서 시스템의 사진을 Fig 14에 나타내었다. 분포형 유연촉각센서 패드에 몇 가지 형상의 접촉력을 가하여 얻어진 형상 및 압력분포에 관한 정보를 영상처리하여 2차원 및 3차원으로 가시화하였다. 2차원 표시의 경우는 접촉력의 분포를, 3차원 표시의 경우는 접촉력의 크기를 쉽게 파악할 수 있는 장점을 가지고 있다.

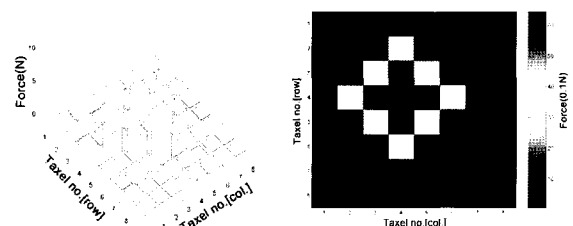
Fig 15에 몇가지 형상에 대한 검출실험결과를 나타내었다. 3차원 표시를 통하여 가해진 힘의 크기를, 2차원 표시를 통하여 접촉물체의 형상을 확인할 수 있다. 사각형의 경우는 완벽하게 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편, 마름모형이나 도넛형의 경우는 한정된 촉각검출 요소에 의한 공간분해능의 한계로 완전하지는 않지만, 접촉물체의 형상을 비교적 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 각각의 경우에 있어서 물체가 접촉하지 않은 검출요소들에서도 미세한 압력분포가 형성되어 있는데, 이는 센서의 구조가 충분히 유연하지 못함으로 인해 발생하는 현상이며, 그 크기는 매우 작아 무시할 수 있는 수준이다.

또한 접촉상태의 동적인 변화에 대한 센서의 출력을 확인하기 위하여, 센서패드 촉각요소의 한 열을 거의 일정한 힘으로 누르면서 이동하였으며, 이때 얻어진 촉각요소의 시간별 출력변화를 Fig 16에 나타내었다. 센서패드에 분포되어있는 촉각요소가 2차원적인 움직임에 의한 접촉상태의 변화를 실시간에 양호하게 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 이는 실시간의 동적인 응답이 요구되는 응용분야에 있어서는 필수적으로 요구되는 특성이다.

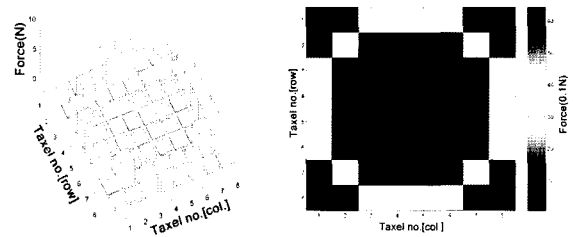
이상의 검출실험에서 알 수 있는 것처럼, 본 연구에서 설계, 제작된 촉각센서는 접촉하는 물체의 형상과 압력분포를 알 수 있으며, 동적인 접촉상태도 실시간으로 검출할 수 있음을 확인하였다. 또한 촉각센서를 통하여 검출된 접촉상태를 가시화하여 사용자 편의성을 높이는 시스템을 구성하였다.



(a) square shape



(b) diamond shape



(c) doughnut shape

그림 15. 검출실험결과.

Fig. 15. Results of sensing example.

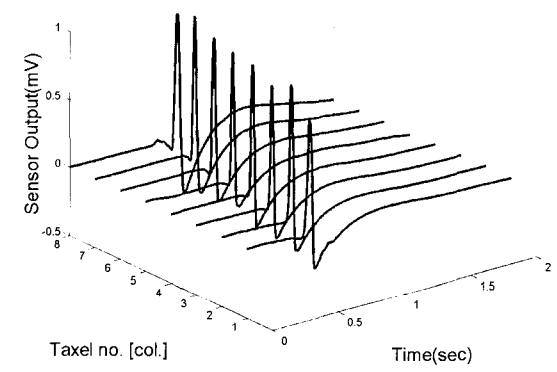


그림 16. 이동하는 힘에 대한 센서응답.

Fig. 16. Sensor response due to moving force.

본 연구에서 개발된 촉각센서시스템은 서론에서 언급한 이상적인 촉각센서에 요구되는 특성 중 공간 분해능과 스톱쉬(threshold)는 다소 미흡하지만 유연성 및 내구성, 촉각검출요소의 수는 충족하고 있다. 그리고 센서 구조 및 제작방법이 간단하여 센서시스템의 개량여하에 따라 실용수준의 촉각센서의 개발도 가능하다.

VI. 결론

이상으로, PVDF 압전필름을 이용한 분포형 유연촉각센서의 시험제작을 소개하고, 출력특성과 신호처리 시스템을 구성하여 접촉상태에 관한 정보를 얻고 이를 가시화한 결과를 보였다. 본 연구에서 시험 제작한 촉각센서는 8×8의 촉각검출요소가 유연한 패드에 분포되어 있어, 로봇의 손뿐만 아니라 다양한 형상의 기구부에 촉각센서로서 피복이 가능하며, 접촉형상과 압력분포를 검출하여 가시화할 수 있다.

본 연구에서 개발한 촉각센서는, 구조적인 개량을 통하여 유연성을 증대하고 법선력 이외에 전단력 등의 검출기능을 추가함으로써 로봇의 손, 팔 및 몸체 등에 필요한 인공촉각 피부로서 활용할 수 있는 가능성을 가지고 있으며, 분포형의 다점 촉각검출이 요구되는 의료용, 산업용의 접촉력 검출시스템에도 활용될 수 있다.

참고문헌

- [1] L. D. Harmon, "Automated tactile sensing," *International Journal of Robotics Research*, vol. 1, no. 2, pp. 3-32, 1982.
- [2] M. H. Lee and H. R. Nicholls, "Tactile sensing for mechatronics a state of the art survey," *Mechatronics*, vol. 9, pp. 1-31, 1999.
- [3] D. Johnston, P. Zhang, J. Hollerbach and S. Jacobsen, "A full tactile sensing suite for dexterous robot hands and use in contact force control," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3222-3227, 1996.
- [4] R. D. Howe, "Tactile sensing and the control of robotic manipulation," *Advanced Robotics*, vol.8, no. 3, pp. 245-261, 1994.
- [5] J. S. Son and R. D. Howe, "Tactile sensing and stiffness control with multifingered hands," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3228-3233, 1996.
- [6] D. J. Beebe, A. S. Hsieh, D. D. Denton and R. G. Radwin, "A silicon force sensor for robotic manipulation," *Proc. of the 7th Int. Conf. on Advanced Robotics*, pp. 889-894, 1995.
- [7] B. Hok, L. Tenerz, and K. Gustafson, "Fiber-optic sensors: a micro-mechanical approach," *Sensors and Actuators*, vol. 17, pp. 157-166, 1989.
- [8] R. S. Fearing, "Some experiments with tactile sensing during grasping," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1637-1643, 1987.
- [9] D. DeRossi, L. Lazzeri, C. Domenici, A. Nannini and P. Basser, "Tactile sensing by an electromechano-chemical skin," *Sensors and Actuators*, vol. 17, pp. 107-111, 1989.
- [10] S. Hackwood, G. Beni, L. A. Hornak, R. Wolfe, and T. J. Neson, "A torque-sensitive tactile sensor array for robotics," *Int. J. Robotics Res.* vol. 2, pp. 46-50, 1985.
- [11] Jr. E. S. Kolesar, R. R. Reston, D. G. Ford and Jr. R. C. Fitch, "Multiplexed piezoelectric polymer tactile sensor," *J. Robotic System*, vol. 9, pp. 37-63, 1992.
- [12] M. K. Brown, "Feature extraction techniques for recognizing solid objects with an ultrasonic range sensor," *IEEE J. Robotics Automat.* vol. RA-1, pp. 191-205, 1985.
- [13] P. Dario and D. DeRossi, "Tactile sensors and the gripping challenge," *IEEE Spectrum*, pp. 46-52, 1985.
- [14] E. Cheung and V. Lumelsky, "Development of sensitive skin for a 3D robot arm operating in an uncertain environment," *Proc. IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, pp. 1056-1061, 1989.
- [15] Y. Yamada and M. R. Cutkosky, "Tactile sensor with three-axis force and vibration sensing functions and its application to detect rotational slip," *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3550-3557, 1994.
- [16] K.-H. Yu, Tae-Gyu Kwon, Myung-Jong Yun and Seong-Cheol Lee, "Development of a tactile sensor array with flexible structure using piezoelectric film," *KSME International Journal*, vol. 16, no. 10, pp. 1222-1228, 2002.
- [17] 유기호, 윤명종, 정구영, 권대규, 이성철, "분포형 유연 촉각센서 시스템의 개발", *한국정밀공학회지* 제 19 권 제 1 호, pp. 212-218, 2002.



유 기 호

1962년 8월 1일생. 1987년 전북대학교 정밀기계공학과 졸업. 동대학원 기계공학과 석사(1990), 일본 Tohoku 대학 박사(1994). 1994년 4월~1997년 8월 동대학 Research Associate, 1997년 9월~1998년 2월 한국과학기술원 연구원, 1998년 3월~현재 전북대학교 기계항공시스템공학부 조교수. 관심분야는 촉각센싱 및 제시, 원격제어, 원격진료.

원, 1998년 3월~현재 전북대학교 기계항공시스템공학부 조교수. 관심분야는 촉각센싱 및 제시, 원격제어, 원격진료.



윤 명 종

1974년 12월 13일생. 2000년 전북대학교 항공우주공학과 졸업, 동대학원 메카트로닉스공학과 석사(2002년). 2003년 3월~현재 동대학원 박사과정 재학중. 관심분야는 촉각센싱 및 제시, 로보틱스.