

## 저항 스캐닝 방식의 유연 촉각센서 신호 특성분석

신유영\*, 김슬기\*, 이주경\*, 이석\*, 이경창\*\*.#

\*부산대학교 기계공학부, \*\*부경대학교 제어계측공학과

### Analysis of Signal Characteristics of Resistance Scanning-type Flexible Tactile Sensor

Yu-Yeong Sin, Seul-Ki Kim\*, Ju-Kyoung Lee\*, Suk Lee\*, Kyung-Chang Lee\*\*.#

\*School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l UNIV.,

\*\*Department of Control and Instrumentation Engineering, Pukyong Nat'l UNIV.

(Received 9 June 2015; received in revised form 10 August 2015; accepted 11 August 2015)

#### ABSTRACT

This paper introduces a resistance scanning-type flexible tactile sensor for intelligent robots and presents the output characteristics of the sensor via signal processing. The sensor was produced via the lamination method using multi-walled carbon nanotubes (a conductive material), an insulator, and Tango-plus (an elastic material). Analog and digital signal processing boards were produced to analyze the output signal of the sensor. The analog signal processing board was made up of an integrator and an amplifier for signal stability, and the digital signal processing board was made up of an IIR filter for noise removal. Finally, the sensor output for the contact force was confirmed through experiments.

**Key Words :** Tactile Sensor(촉각센서), HRI(인간-로봇 상호작용), Signal Processing(신호처리), Analog Filter(아날로그 필터), CNT(탄소나노튜브)

#### 1. 서 론

최근 자동화 기술이 급속도로 발달함에 따라 산업 현장에서도 원가 절감 및 생산량 증대를 위해 자동화 시스템을 상당 부분 도입하게 되었다. 또한 산업 현장뿐만 아니라 일상생활 및 의료 시설에서 로봇이 인간을 대신해 다양한 작업을 수행하기 위해 인간과 협업(HRI)을 할 수 있고 안정성 있게 작동할 수 있어야 한다. 이를 만족하는 로봇들은 ‘지능형로봇’이라 지칭하며 “ASIMO”, “HUBO”,

“다빈치” 등이 그 예이다. 지능형 로봇은 인지 및 인식 기능이 강화된 로봇 센서들이 주위 환경에 대한 정보를 수집하므로 보다 원활하고 정확한 정보 수집을 위한 센서 제어 기술에 대한 다양한 연구가 필요하다<sup>[1]</sup>.

지능형 로봇에 사용되는 센서들은 인간의 오감을 대체한다. 예를 들어 산업 현장에서 주로 사용되는 수직 다관절 로봇에 그리퍼를 부착하여 물건을 옮기는 역할을 한다면, 움직이고자 하는 물체의 위치를 파악하기 위해 인간의 시각을 대체한 카메라나 레이더 등을 사용하고 파손 없이 물체를 이송하기 위해 그리퍼가 최소한의 힘으로 물건을 파지할 수

# Corresponding Author : gelee@pknu.ac.kr

Tel: +82-51-629-6332, Fax: +82-51-629-6309

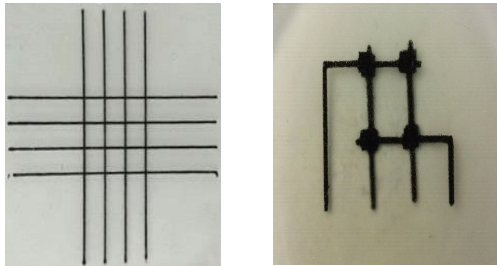


Fig 1. Various Types of Flexible Tactile Sensors

있도록 인간의 촉각을 모방한 촉각센서를 활용한다<sup>[13]</sup>. 하지만 촉각을 감지하는 인간의 피부가 좁은 범위에서 압력이나 마찰, 온도 등의 복합적인 물리량을 감지할 수 있는 것과는 달리 촉각센서는 복합적인 물리량을 감지하는 데 많은 어려움이 있다. 따라서 로봇의 사용 목적에 따라 그에 알맞은 센서를 부착해야 한다<sup>[2][3]</sup>.

본 논문은 저항 스캐닝 방식의 유연 촉각센서의 특성을 분석하여 복합적인 물리량 중 물체의 접촉 여부 및 접촉력 정보를 로봇이나 기계에 제공하여 이를 지능형 로봇에 적용 가능한지에 대한 여부를 검증한다. 우선 저항 스캐닝 방식의 유연 촉각센서를 제작하고 센서의 출력 신호에 포함된 노이즈를 제어하기 위한 아날로그 및 디지털 신호 처리 방식을 설계한다. 그 후, 개발된 센서의 신호 특성을 파악하기 위한 실험 및 분석 과정을 거쳐 실제 적용 가능 여부를 파악하는 것이 주 목표이다.

## 2. 저항 스캐닝 방식의 유연 촉각센서 제작

본 논문에서 사용된 유연 촉각센서는 감지부로 사용하기 위한 전도성 소재인 MWCNTs (Multi-Walled Carbon Nanotubes, 다중벽 탄소나노튜브)와 외부의 충격으로부터 센서를 보호하기 위한 탄성 소재인 'Tango-plus', 그리고 전도성 소재 사이에서 절연층을 구성하기 위한 절연체로 나누어진다. MWCNTs를 이용한 전도성 소재 혼합물을 유연성 및 탄성을 가지고 있는 반고체 상태로 제작되어 센서를 구부리더라도 쉽게 파손되지 않고 기능을 유

지할 수 있다<sup>[4][5][6]</sup>.

유연 촉각센서는 액상의 'Tango-plus' 소재와 MWCNTs를 이용한 전도성 소재 혼합물, 절연체를 일정한 순서에 따라 적층 한 후 UV Lamp로 경화시키는 방식으로 제작한다. 제작은 총 5단계로 이루어지며 자세한 과정은 다음과 같다<sup>[7][8]</sup>.

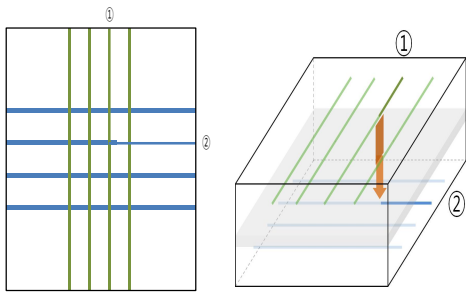
- (1) 액상의 'Tango-plus'를 사각형 틀에 1mm의 높이가 되도록 부은 후 UV Lamp로 경화시켜 하층부를 형성한다.
- (2) 경화시킨 'Tango-plus' 층 위에 전도성 혼합물을 X축 방향으로 4회 분사한 후 경화시킨다.(간격 5mm)
- (3) 액체 상태의 절연체를 틀 위에 0.5mm 높이로 부어 경화시킨다.
- (4) (2)와 동일한 전도성 혼합물을 Y축 방향으로 4회 분사한 후 경화시킨다.(간격 5mm)
- (5) 하층부와 동일한 'Tango-plus'를 1mm 두께로 부은 후 UV Lamp로 경화시켜 상층부를 형성한다.

위 공정을 통해 총 3층으로 구성된 유연 촉각 센서를 제작했다. 완성된 유연 촉각센서의 형태는 Fig 1과 같다. 검은 선으로 보이는 부분이 앞서 제작된 전도성 소재 혼합물이고 그 외 반투명 영역을 'Tango-plus'이다. Direct Writing 방식으로 제작되는 본 센서는 틀의 크기와 모양에 따라 다양한 형태와 굵기로 결정할 수 있다. 또한, 높은 유연성을 가지므로 센서의 양 끝단이 만나도록 구부려도 파손되지 않는다<sup>[9][10]</sup>.

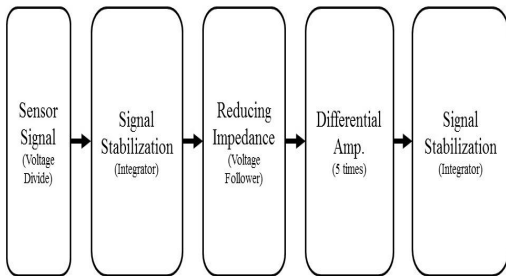
## 3. 저항 스캐닝 방식 유연 촉각센서의 신호처리 시스템 설계

### 3.1 아날로그 신호처리부 설계

유연 촉각센서는 전도성 소재인 전원 공급 라인과 꼬인 위치에 있는 신호 검출 라인 사이에 존재하는 고 저항의 절연층으로 인해 평상시에는 신호 검출 라인에서 신호가 거의 출력되지 않는다.



**Fig. 2 Pressure Sensitive Method of Flexible Tactile Sensor of Resistance Scanning**



**Fig. 3 Analog Signal Processing Mechanism**

하지만 압력이 가해지면 두 라인 사이의 절연층 두께가 얇아지고 얇아진 절연층을 통해 신호 검출 라인을 미세전류가 흐르게 된다. 이때 신호 검출라인의 미세전류 신호를 측정하여 압력의 유무 및 크기를 감지한다.

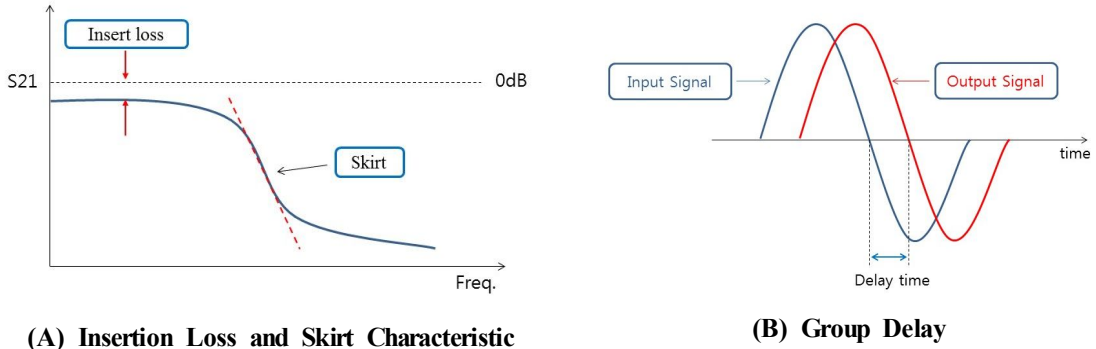
센싱 소자의 연결은 Fig. 2와 같다. 세로줄은 전원 공급 라인으로 ① 부분과 전원을 연결하고 반대쪽은 개방된 상태로 둔다. 가로줄은 신호 검출 라인으로 ② 부분과 신호처리 하드웨어를 연결하고 반대쪽은 개방 상태로 둔다. 두 라인은 서로 90도의 꼬인 위치에 있어 평소에는 절연층에 의해 전류가 도통하지 않지만, 압력이 가해지면 절연층이 얇아짐에 따라 저항이 낮아지고 그림과 같이 ①을 통해 공급된 전원의 전류가 얇아진 층을 통해 ②와 연결된 신호처리 하드웨어로 도통하게 된다. 흐르는 전류의 양은 미세하지만, 압력이 주어지지 않은 상태와는 명확히 구분되고 압력의 세기가 증가함에 따라 전류량도 증가하는 것을 알 수 있었다. 이렇게 출력된 값을 신호처리 하드웨어를 통해 증폭시켜 분석하게 된다.

유연 촉각센서에서 나온 신호의 아날로그 신호 처리 메커니즘은 Fig. 3과 같다. 전압분배를 통해 나온 출력 신호는 매우 낮은 전압일 뿐만 아니라 센서의 고 저항 절연층을 통과하는 과정에서 다량의 노이즈를 포함하고 높은 임피던스 성질을 가지게 되기 때문에 신호의 증폭에 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해 먼저 적분 회로를 구성하여 신호를 안정화한 후 전압 팔로워를 통해 높은 임피던스의 출력 전압을 동일한 레벨의 낮은 임피던스의 신호로 변환한다. 변환된 신호는 차동 증폭기 회로를 통해 전압이 증폭되고 전원에서 발생하는 노이즈가 제거된다. 실험에 사용된 입력 전원은 9V로 하고 차동 증폭회로의 증폭률은 5배가 되도록 설정했다.

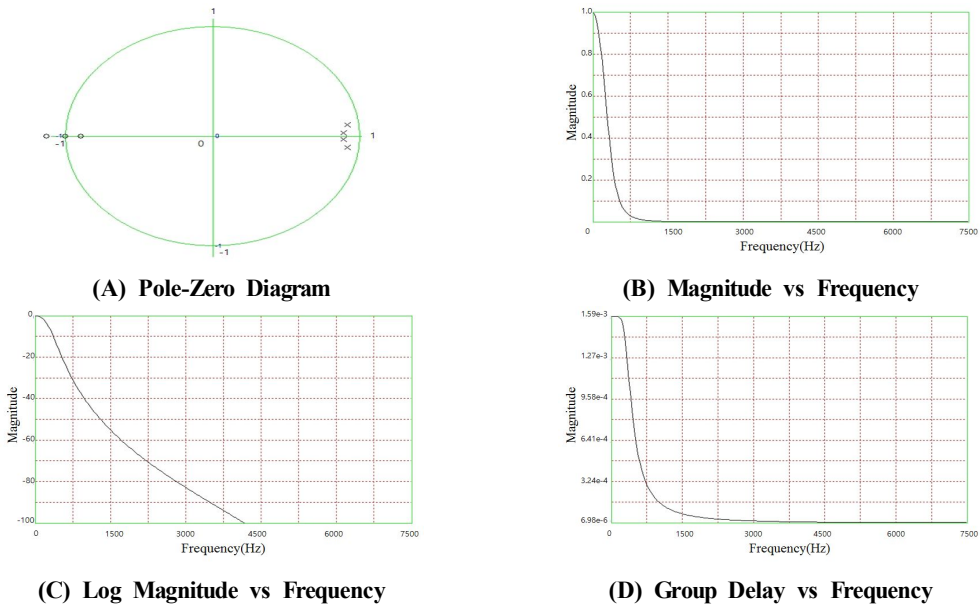
### 3.2 디지털 신호처리부 구성

신호와 함께 증폭된 잡음은 디지털 필터를 이용해 제거한다. 디지털 소자인 메인 제어기(MCU)로 아날로그 신호를 연산 처리하기 위해 MCU에 내장된 A/D 변환 모듈을 이용해 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환한다. A/D 변환의 분해능은 12bit로 설정했다.

MCU를 통해 디지털화된 신호성분은 디지털 필터를 통해 강조하고자 하는 주파수 대역의 신호는 남기고 불필요한 주파수의 신호 출력은 제한한다. 이때, 필터의 종류와 세부 설계로 삽입손실과 스키프의 정도 및 필터 특성이 결정된다. Fig. 4의 (A)는 LPF(Low Pass Filter)의 특성을 고주파 특성 그래프인 S parameter로 나타낸 것이다. 이 그래프에서 왼쪽 부분에 표시된(녹색 점선)은 삽입손실로서 신호가 필터를 통과할 때, 입력된 전력이 모두 출력으로 나가지 못해 조금씩 손해를 보는 값을 말한다. 그 오른쪽의 붉은 점선은 스키프 특성을 나타낸 것으로 주파수 통과 대역과 저지 대역이 명확히 구분되는 정도를 기울기로 나타낸 것이다. 점선의 기울기가 클수록 통과 대역과 저지 대역의 구분이 명확해지게 되고 이는 곧 스키프 특성이 좋다고 할 수 있다<sup>[11]</sup>. 따라서 어떠한 신호를 필터링할 때 삽입손실이 적고 스키프 특성은 가파른 필터일수록 신호의 손실 없이 원하는 대역의 출력 값을 도출할 수 있다. 이와 더불어 디지털



**(A) Insertion Loss and Skirt Characteristic** **(B) Group Delay**  
**Fig. 4 Insertion Loss and Skirt Characteristic and Group Delay of Filter**



**(A) Pole-Zero Diagram** **(B) Magnitude vs Frequency**  
**(C) Log Magnitude vs Frequency** **(D) Group Delay vs Frequency**  
**Fig. 5 Characteristic of 4th-Order Bessel IIR Filter**

필터를 설계할 때는 사용자의 목적에 부합하는 삽입손실과 스킨 특성 설정 외에도 필터의 종류에 따른 군 지연의 허용범위를 고려해야 한다. 군 지연(Group Delay)은 각 주파수의 변화에 따른 위상의 변화량을 나타낸 것으로서 신호가 필터를 통과할 때, 각각의 주파수 대역 별로 신호가 지연되는 상대적 시간을 의미한다. Fig. 4의 (B)는 특정 주파수 신호가 필터를 통과하면서 지연되는 모습을 나타낸 것이다. 하지만 디지털 필터는 여러 대역의 주파수 신호를 다루기 때문에 서로 다른 주파

수들이 각각의 파장에 따라 다르게 지연된 위상으로 인해 전체 신호에 왜곡을 불러일으킬 수 있다. 따라서 대표적인 Butterworth, Chebyshev, Bessel 필터 중 적합한 필터를 찾아 설계하기 위해 각각의 특성을 비교했다. Butterworth 필터는 통과 대역에서 출력되는 신호가 고르고 비교적 좋은 스킨 특성을 가지지만 차단주파수 부근에서 군 지연이 심하게 일어나 측각센서에 특정 압력이 가해질 때 센서가 오작동할 가능성이 있다. Chebyshev 필터는 가장 뛰어난 스킨 특성을 가지고 있으나

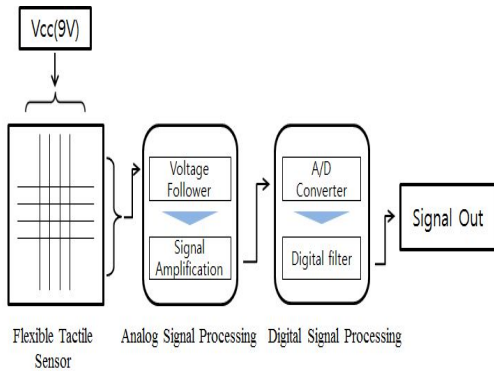


Fig. 6 Signal Processing Flowchart

통과대역에서의 리플과 심각하게 변화하는 군 지연 탓에 역시 센서의 오작동이 우려된다. Bessel 필터는 앞의 두 필터보다 높은 삽입손실과 좋지 않은 스키트 특성이지만 넓은 주파수 대역에서 동일한 군지연을 보이므로 전체적인 통과 대역에서 주파수 응답이 고르다는 장점이 있다<sup>[12]</sup>.

본 실험에서는 이미 아날로그 신호처리를 일차적으로 거친 신호이기 때문에 스키트 특성이나 삽입손실보다는 전체적으로 일정한 군 지연이 더욱 중요하므로 Bessel 필터를 선정했다. 그리고 IIR 필터 형식을 사용하여 낮은 차수의 계수에서도 비교적 양호한 차단 특성을 가지고 무한한 임펄스 응답을 가지고 있어 아날로그 필터와 유사한 환경을 조성했다<sup>[13][14]</sup>. 상용 필터 분석 프로그램을 이용해 샘플링 주파수가 15kHz, 통과 대역 주파수는 100Hz, 저지 대역은 130Hz이고 통과 대역 리플과 저지 대역 리플은 각각 1dB, 3dB을 만족하는 4차 Bessel IIR 필터를 설계했다<sup>[15]</sup>.

Fig. 5는 위 조건에 맞춰 설계한 디지털 필터의 성능 평가 그래프 중 일부를 나타낸 것이다. (A)는 필터 시스템의 안정도를 나타낸 극좌표 그래프이다. 각각 4개의 극점과 영점을 확인할 수 있으며 X(pole)에서 O(Zero)로 가는 근궤적도를 그렸을 때 좌측 반구에서 형성되므로 안정된 시스템임을 알 수 있다. (B)는 필터의 성능 중 주파수 대비 신호가 필터를 통과하는 비율을 나타낸 그래프로 Low Pass Filter(LPF)와 같은 특성을 나타내며 약 1.4kHz 이상의 고 주파수는 통과시키지 않음을 확

인할 수 있다. (C)는 입력신호에 따른 출력신호의 삽입손실을 나타낸 그래프로써 약 200Hz일 때, 2.7dB의 손실이 발생한다. (D)은 설계한 시스템의 주파수 대비 군 지연을 나타낸 그래프로 약 200Hz까지는 0.00159초로 동일한 군 지연이 나타남을 볼 수 있다.

## 4. 실험 및 성능평가

### 4.1 실험 환경 구축

저항 스캐닝 방식 유연 촉각센서의 신호처리는 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. 신호처리 보드와 유연 촉각센서를 연결하여 아날로그 신호처리, 출력의 증폭 및 안정화를 진행한다. 증폭된 아날로그 신호는 신호처리 보드에 부착된 메인 제어기로 입력되어 디지털 신호로 변환된 후 소프트웨어 필터를 통해 디지털 신호처리 과정을 거친다. 이 과정에서 잡음 및 오차가 보정되어 최종 출력 신호가 생성된다.

Fig. 7은 실제 장비들을 이용해 실제로 구성된 Testbed이다. 실험은 다음과 같이 진행된다. 먼저 측정 기기들을 이용해 압력을 가하고 이를 메인 제어기에서 신호처리 한다. 2대의 PC를 이용하여 가해진 압력값과 신호처리를 통해 나온 센서의 출력 값을 각각 입력 받고 이를 취합하여 비교 및 분석한 후 압력에 따른 센서의 반응을 나타낸다<sup>[16]</sup>.

### 4.2 측정 방법에 따른 센서 특정 분석

사전에 설계한 디지털 필터의 신호처리 성능을 확인하기 위해 앞에서 구현된 Test-bed를 이용하여 실험을 진행했다. 실험은 동일한 힘으로 눌렀을 때 센서에서 출력된 후 아날로그 신호처리만 통과한 데이터와 IIR 필터를 이용해 디지털 신호처리를 거친 데이터를 비교한다.

측정 장비를 이용하여 센서에 약 25N의 압력을 가했다. Fig. 8은 압력에 따른 힘 게이지의 수치, 디지털 신호처리를 거치지 않은 데이터, 디지털 필터를 통과한 데이터를 비교한 그래프이다. 힘 게이지 데이터를 통해 약 6초 부근에서 압력이 가



Fig. 7 Construction of Test-bed

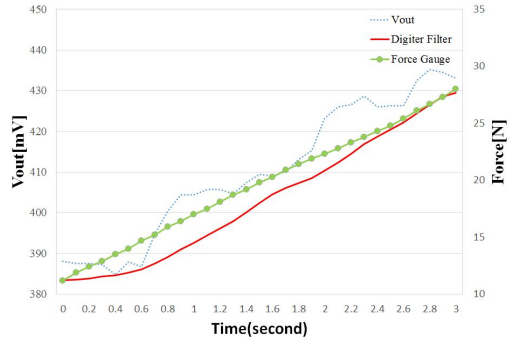


Fig. 9 Sensor Linearity

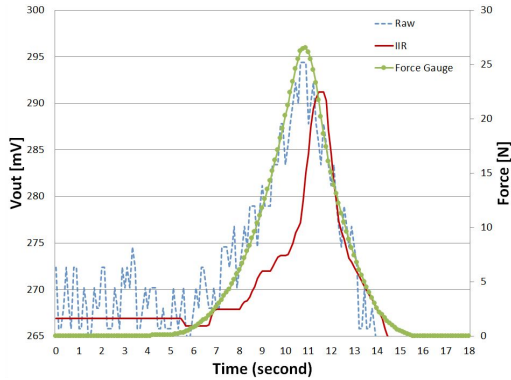


Fig. 8 Comparison of Sensor Data

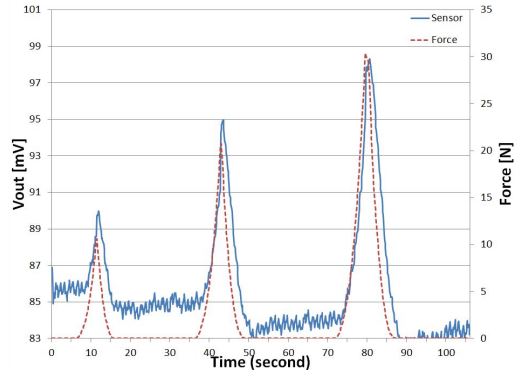


Fig. 10 Result of Repeated Experiment

해지기 시작했고 약 11초에서 최고 압력 값이 나오는 것을 알 수 있다.

센서의 Raw 데이터는 아날로그 신호처리를 통해 일차적으로 잡음 제거를 했지만, 센서의 출력 값을 필터링 하는데 한계를 보여 힘 데이터와 비교했을 때 값이 균일하지 않은 것을 확인 할수 있다. 반면, 디지털 필터를 거친 데이터는 출력 값을 보정하여 압력의 증가 곡선과 유사한 매끄러운 곡선을 형성했다. 하지만 압력의 변화에 즉각적으로 반응하여 출력되는 초기 데이터와는 다르게 디지털 필터 데이터는 결과 값이 지연되는 현상이 확인된다. 이는 데이터 연산에 의한 IIR 디지털 필터의 특성으로 결과 값의 지연이 발생하는 것이다. 압력의 증가 및 감소 곡선과 훨씬 유사한 결과

곡선을 나타내는 디지털 필터 데이터가 센서에 가해진 압력 정도를 나타내는 데 있어 적합함을 확인했다.

Fig. 9는 센서의 선형성을 실험한 결과이다. 점선으로 나타낸 것은 센서의 Raw 데이터이며 이 데이터의 10-Point 이동평균은 거쳐 실선으로 나타내었다. 압력이 증가하는 동안에 이동평균을 거친 센서 데이터가 일정하게 증가하는 것을 확인 할 수 있다.

### 4.3 신호처리 시스템의 성능평가

앞에서 선정된 디지털 필터를 이용하여 저항 스캐닝 방식 유연 축각센서의 성능을 파악하는 실험을 수행했다. 외부에서 10N, 20N, 30N에 해당하



는 힘을 순차적으로 가한 후, 이를 통해 얻은 센서의 출력 값을 Fig. 10에 나타냈다. 유연 촉각센서의 출력 데이터는 파란 실선으로 표현하였고 다루는 mV이다. 붉은 점선은 테스트 스탠드에 부착된 힘 게이지의 출력 값으로서 단위는 N이다. Fig. 8과 비교했을때, 모든 실험에서 가해진 압력에 따라 출력이 상승하는 결과를 보였고 압력 값이 증가하면 센서의 출력 데이터 또한 상승하는 것을 볼 수 있다. 하지만 압력이 반복적으로 가해짐에 따라 초기 상태 대비 약 1~3mV 정도의 기준전압 레벨 차이가 나타났다. 이는 인간의 피부를 모방하여 제작된 유연 촉각센서의 소재 특성상 처음 압력이 가해진 후 원래상태로 복원되는데 일정 시간이 소요되기 때문이다. 실제로 센서에 연속으로 압력을 가한 후 약 3~5분이 지나면 출력 전압이 다시 초기 상태의 수준으로 올라가는 것을 확인 하였다. 게다가 초기 상태의 기준전압이 다름에도 불구하고 압력이 가해지면 그 압력에 해당하는 출력 값을 지시하기 때문에 연속적인 압력이 가해지더라도 센서가 압력을 감시하는 데는 지장이 없다고 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에는 인간의 피부와 유사한 형태를 가지고 외부 환경과 접촉 시 압력을 감지할 수 있는 탄소 나노튜브 기반 저항 스캐닝 방식의 유연 촉각센서와 신호처리 시스템을 개발했다. 유연 촉각센서는 두 줄의 검출 라인을 서로 다른 층에 각각 한 줄씩 직각 형태로 도포하여 서로 만나지 않고 90도를 이루는 꼬인 위치가 되도록 제작했다. 두 출력 라인 사이에는 수십 M $\Omega$ 의 저항을 가지는 절연층을 삽입해 최종적으로 각각의 라인은 비접촉 형태로 배치되어 있다. 두 개의 검출 라인은 서로 다른 역할을 한다. 한 라인은 전원을 공급하는 역할을 하고, 다른 한 라인은 압력에 따라 발생하는 신호를 출력하는 역할을 한다. 평상시에는 저항이 높은 연질의 절연층이 두 라인 사이에 존재하고 있으므로 출력 신호가 발생하지 않지만, 두 라인의 교차점에 압력이 가해지면 절연층의 두께가 얇아지면서 저항이 감소하게 되고 이에 따라 전원 공급라인과

신호 출력라인 사이에 미세전류가 흐르게 되어 출력 신호가 생성된다.

이러한 원리를 가지는 비접촉 형태의 센서에 적합한 신호처리 시스템을 설계했다. 본 신호처리 시스템은 추후 다양한 분야에 응용할 수 있도록 신호처리 보드의 크기를 최대한 작게 만들 필요가 있었다. 이를 위해 부피를 많이 차지하는 아날로그 신호 처리부의 비중을 최소화하고 디지털 신호처리 시스템을 최대한 활용했다. 아날로그 신호 처리부는 증폭 회로를 통해 미세한 센서의 원 출력 신호를 증폭하도록 구성했다. 디지털 신호 처리부는 A/D 변환과 디지털 필터로 구성되었는데, A/D변환은 MCU의 모듈 설정을 통해 별도의 하드웨어 추가 없이 작업이 수행되도록 했고 원 신호와 함께 증폭된 노이즈는 제거하기 위해 Bessel IIR필터를 사용했다.

이 신호처리 시스템과 저항 스캐닝 방식의 유연 촉각센서의 성능을 평가하기 위해 테스트베드를 구성해 압력에 따른 센서의 출력 특성을 검증하는 실험을 진행했다. 실험을 통해 저항 스캐닝 방식의 유연 촉각센서의 성능 및 신호 특성을 파악할 수 있었으며, 압력이 가해지는 동안 발생하는 출력 특성을 확인했다.

#### 후 기

“이 논문은 산업통상자원부 부품소재 국제협력사업으로 지원된 연구임.”

#### REFERENCES

1. Kim, K. K., Kang, S. S., Kim, J. B., Lee, J. Y., Do, H. M., Choi, T. and Kyung, J. H., "Object Recognition Method for Industrial Intelligent Robot," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol 30, No. 9, pp. 901-908, 2013.
2. Saranlı, U., Buehler, M. and Koditschek, D. E., "Rhex: A Simple and Highly Mobile Hexapod Robot," International Journal of Robotics

- Research, Vol. 20, No. 7, pp. 616-631, 2001.
3. Kim, M. S., Park, Y. K. and Kwon, S. Y., "Tactile Deices That Minics Human's Sensory System," *Physisc & High Technology*, pp. 15-22, 2010.
  4. Lee, K. R., Kim K. N., Kim, W. H., Lee, D. S., Cho, N. K., Park, K. B., Shin, K. S. and Park, H., D., "Polyimide-Based Flexible Tactile Sensor with Signal Treatment Connector for Robotic Applications," *The 13th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 82-87, 2009.
  5. Minot, E. D., Yaish, Y., Sazonova, V., Park, J. Y., Brink, M. and McEuen, P. L. "Tuning Carbon Nanotube Band Gaps with Strain," *Physical Review Letters*, Vol. 90, 156401, 2003.
  6. Pushparaj, V. L., Ci, L., Sreekala, S., Kumar, A., Kesapragada, S., Gall, D. and Suhr, J., "Effects of Compressive Strains on Electrical Conductivities of a Macroscale Carbon Nanotube Block," *Applied Physics Letters*, Vol. 91, 153116, 2007.
  7. Woo, S. G., Lee, I. H., Kim, H. C., Lee, K. C. and Cho, H. Y., "Development of a Photopolymer-Based Flexible Tactile Sensor using Layered Fabrication and Direct Writing," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 13, No. 2, pp.8-14, 2014.
  8. Woo, S. G., Vatani, M., Lee, I. H., Choi, J. W., Kim, H. C. and Cho, H. Y., "Flexible Sensor Material using Photopolymer and MWCNTs Mixture," *Proceedings of the KSME 2013 Spring Annual Meeting*, pp. 3241-3244, 2013.
  9. Dahiya, R. S. and Valle, M., *Robotic Tactile Sensing Technologies and System*, Springer, pp. 43-110, 2012.
  10. Lee, H. K., Chang, S. I. and Yoon, E. S., "A Flexible Polymer Tactile Sensor: Fabrication and Modular Expandability for Large Area Deployment," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 15, No. 6, pp. 1681-1686, 2006.
  11. Matthaei, G. L., Young, L. and Jones, E. M. T., *Microwave Filters, Impedance-Matching Networks and Coupling Structure*, McGraw-Hill, pp. 159-239, 1984.
  12. Figliola, R. S. and Beasley, D. E., *Theory and Design for Mechanical Measurements*, John Wiley & Sons, 2015.
  13. Matthaei, G. L., Young, L., Jones, E. M., "Microwave Filters Impedance-Matching Networks, and Coupling Structure", Washington : Artech House Books, 1980.
  14. Rhea, R. W., *HF Filter Design and Computer Simulation*, Noble Publishing, 1994.
  15. Momentum Data Systems, *Filter Design for dsPICKTM DSC Digital Filter Design and Analysis System*, 2008.
  16. Shimojo, M., Namiki, A., Ishikawa, M., Makino, R. and Mabuchi, K., "A Tactile Sensor Sheet Using Pressure Conductive Rubber With Electrical-Wires Stitched Method," *IEEE Sensors Journal*, Vol. 4, No. 5, pp. 589-596, 2004.