

CNT/폴리머 압저항 단일 매질을 이용한 압력분포 및 하중벡터 측정 센서

이 왕 주*, 오 현 우°, 허 재 두*

Pressure Distribution and Load Vector Sensor Using a Single Piezo-Resistive CNT/Polymer Composite Material

Wang-joo Lee*, Hyun-Woo Oh°, Jae-doo Huh*

요 약

CNT/PDMS 기반의 압저항 물질을 제작하고 바이어스선과 리드선의 배선으로 단일 매질을 일정한 간격의 센싱 구역으로 분할하여 압력분포 측정을 하였다. 이때 각 센싱 구역은 물리적으로 연결되어 있어 기생 전류에 의한 간섭 오차가 발생하므로 바이어스 전류 제한 홀과 전류 블록킹 라인을 추가하여 제거함으로써 기존 배열형 분포 센서와 같은 분포 측정 성능을 얻을 수 있었다. 또한 압력 분포 센서에 하중이 경사져서 작용할 때 이를 인접한 센싱 셀 간의 출력 신호 차이로 변환하는 피라미드형 트랜스듀스를 제작하여 하중 벡터 추출 가능성을 검증하였다.

Key Words : CNT, PDMS, single piezo-resistive material, pressure distribution, load vector

ABSTRACT

A piezo-resistive single material based on CNT/PDMS composite was partitioned as arrayed sensing cells by bias and read lines to test pressure distribution measurement. To remove the parasitic interfering currents between sensing cells, bias current limiting hole and blocking lines are added. Also an elastic pyramidal structure transducing the slanted pressure to output voltage differences between neighboring sensing cells is adopted to estimate the load vector.

I. 서 론

압력은 인간이 지구에서 생활하는 한 생활에서 떼어 놓을 수 없는 물리량으로서 기압, 수압, 혈압, 안압, 하중에 의한 압력 등 측정 대상에 따른 다양한 형태의 센서가 있다. 기존에 많이 개발된 스마트한 압력 센서로서 실리콘 기반 MEMS 센서의 경우 소형, 내구성, 반응 속도, 히스테리시스 특성 등이 뛰어나 자동차용

센서에 널리 쓰이고 있으며^[1] 최근 CNT 등의 전도성 필러와 폴리머와 섞어 만든 복합재질 압저항 센서는 반응 속도나 히스테리시스 등에서는 성능이 떨어지지만 유연하면서 대면적화하기 쉽다는 장점으로 인해 족압이나 둔부 압력 등을 통한 인체 진단이나 로봇틱스에 응용하려는 연구가 활발히 이루어지고 있다^[2-3]. 이 경우 단일 압력보다는 압력분포 측정이 가능한 센서가 필요한데 기존의 배열형 압력 센서에서는 다 수

* 본 논문은 2018년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터(IITP)의 지원을 받아 수행되었습니다. (2017-0-00052).

• First Author : (ORCID:0000-0001-8861-9446)Electronics and Telecommunications Research Institute, wjlee@etri.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4887-2356)Electronics and Telecommunications Research Institute, hyunwoo@etri.re.kr, 정희원

* (ORCID:0000-0002-4860-8344)Electronics and Telecommunications Research Institute, jdjuh@etri.re.kr, 정희원
논문번호 : 201806-0-105-SE, Received May 28, 2018; Revised October 5, 2018; Accepted October 23, 2018

의 개별 압력센서를 일정 간격으로 배열하고 바이어스선과 리드선을 각 센서에 교차 연결하는 방식을 취한다. 이 방식은 분포 측정은 정확하지만 개별 센서를 모두 조립해야 하므로 공정이 복잡해진다. 이를 피하기 위한 단일 압저항 매질을 사용하는 방식으로서 비등방성 임피던스 단층 분석(anisotropic impedance tomography)^[4]이나 딥러닝^[5]을 기반으로 하는 방법 등이 발표되었는데 이는 작은 면적의 센서에서는 유용하지만 센싱 면적이 커질수록 추정 오차와 학습시간이 많이 증가할 것으로 예상된다.

본 고에서는 대면적 하중분포 측정 센서에서 개별 센서 조립이나 추정 오차 등 기존 분포형 센서의 단점을 극복하기 위해 CNT/PDMS 복합체 기반의 단일 압저항 매질에 바이어스선과 리드선을 단순 교차 배선하여 일정 간격으로 배열된 센싱 셀들로 분할하고 이 때 생기는 셀 간의 신호 간섭을 제거함으로써 정확한 하중 분포 측정을 시도한다. 아울러 인체 진단이나 로봇틱스 등에 유용한 하중벡터 추출을 위해 하중이 수직이 아닌 비스듬한 방향성을 가질 때 하중을 받는 인접 센서간에 신호차를 발생시키는 구조를 추가하여 하중의 방향을 추출한다.

II. CNT-PDMS 기반 압저항 매질 제작

본 논문에 사용한 압저항 매질은 다우코닝 사 PDMS에 씨엔티솔루션 사의 CNT를 분산시켜 제작한 것으로 PDMS와 CNT를 시험관에 넣고 그림 1 우측의 프로펠러 회전 방식의 교반기를 사용하여 800 rpm에서 2 시간 교반한 다음 경화제를 넣고 다시 10분 더 교반한 것이다. 교반이 끝난 혼합물은 그림 2와 같이 단일 센서인 실린더 형태와 분포 센서인 평판 형태로 넣어 70°C에서 1 시간가량 경화시켜 압저항 매질을 제작하였다.

CNT/PDMS 혼합물은 CNT 농도에 따라 경화시킨 저항 변화 차이를 보인다. 그림 3을 보면



그림 1. 무게 측정용 저울(좌) 및 프로펠러 형 교반 장치(우)
Fig. 1. precision scale (left) and blender (right)



그림 2. 단일 센서(좌)와 분포형 센서 매질(우)
Fig. 2. Materials for single (left) and distributed pressure sensor (right)



그림 3. CNT 농도 및 시간에 따른 bulk 저항 변화
Fig. 3. Bulk resistance variation according to time and CNT concentration

percolation 문턱값보다 훨씬 높은 0.5wt%인 경우에는 bulk 저항이 처음부터 거의 변화가 없지만 문턱값에 가까운 0.35wt%의 경우 bulk 저항이 처음에 매우 높다가 30분 후에는 1/10 수준으로 낮아진다. 이때 표면 저항은 계속 높은 상태로 유지되므로 CNT 농도가 낮은 시료에서는 매질 경화 후 전극 형성하는 경우에 전택 저항을 줄이기 위한 표면 처리가 필요하다.

제작한 매질의 압저항 특성을 평가하기 위해 그림 4와 같이 실린더형 시료에 수직 방향으로 압력을 가하면서 수직 방향으로 저항 변화를 측정하였다.

압저항 특성을 보면 200kPa 이하에서 변화 특성이 좋고 300kPa에서 포화되는 것을 알 수 있다. 특이한 것은 500kPa 이상에서 저항이 다시 증가하는데 이것은 시료가 수직 방향으로 압축되면서 수평 방향으로

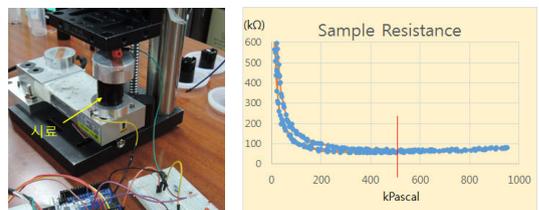


그림 4. 압저항 측정 장치(좌) 및 압저항 특성(우)
Fig. 4. Piezo-resistance measuring system (left) and piezo-resistive characteristic (right)

는 포아송 비(Poisson ratio)만큼 늘어나게 되어 수직 방향으로 network를 구성하던 전도성 path가 일부 끊어지기 때문으로 보인다.

III. 단일 압저항 매질 분포형 압력 센서

그림 5 왼쪽과 같이 CNT 0.3wt% 포함한 평판형 압저항 매질의 위아래 면에 각각 수직 바이어스선과 수평 리드선을 배선하여 분포형 압력 센서를 구성하였다. i 번 째 바이어스선과 j 번 째 리드선이 교차되는 부분을 S_{ij} 라고 하면 각 S_{ij} 들은 그림 5 오른쪽과 같이 압저항과 외부 고정 저항간 전압분배에 의한 압력 센서가 된다. 그림은 6x6 센서어레이로서 그 중 S_{ij} 하나를 읽는 경우 i 번 째 바이어스 선에 5V를 가한 상태에서 j 번 째 리드 선을 읽으면 되고 S_{11} 부터 S_{66} 까지 순차적으로 읽으면 하나의 압력 영상이 생긴다. 어레이 센서의 경우 각 S_{ij} 마다 압저항 특성이 균일하지 않을 수가 있으므로 calibration 과정을 거쳐야 한다. 그림 6은 각 S_{ij} 에 1kgf를 인가했을 때 ADC 출력 결과로서 각 센싱 셀의 출력치 보정에 사용된다. 보정 전 균일도가 그다지 좋지는 않은데 이는 센서 감도 (GF, gain factor)를 높이기 위해 CNT 농도를 percolation 문턱치에 가깝게 했기 때문에 전도성 path가 지역별로 랜덤하게 형성되기 때문으로 생각된다. CNT 농도가 더 높은 경우 균일도는 좋아지겠지만 감도가 낮아지므로 최적화가 필요하다.

단일 매질 분포형 센서는 개별 센서 조립이 필요없



그림 5. 단일매질 분포형 압력센서(좌)와 개별 센싱 회로(우)
Fig. 5. Single material distributed pressure sensor (left) and sensing circuit (right)

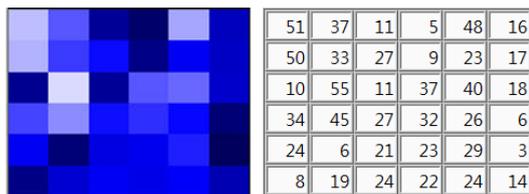


그림 6. 각 센싱 셀에 1kgf를 인가한 ADC 결과
Fig. 6. ADC result of each S_{ij} 's under each 1kgf load

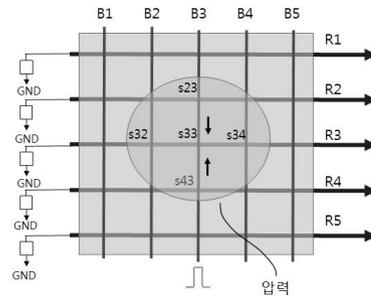
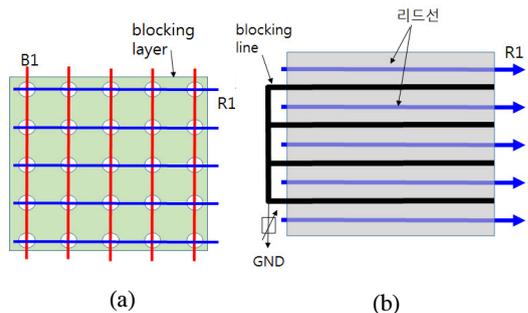


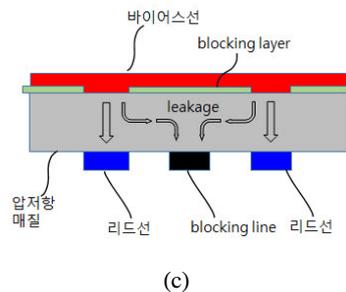
그림 7. 단일 매질 분포형 압력 센싱 셀간 누설 전류
Fig. 7. Leakage current in single material distributed pressure sensor

다는 장점이 있지만 각 센싱 셀들이 물리적으로 연결되어 있어 상호 간섭에 의한 센싱 오차를 발생시킬 수 있다.

그림 7은 센싱 셀간 간섭하는 일 예로서 S_{33} 를 포함한 주변에 압력이 인가되었을 때 S_{33} 을 읽는 경우이다. 이 때 바이어스선 B_3 에는 전압 펄스가 인가되지만 다른 바이어스선은 하이 임피던스이므로 S_{32} 과 S_{34} 는 활성화되지 않아 아무런 영향을 미치지 않는다. 그러나 B_3 에 연결된 S_{23} 과 S_{43} 은 활성화되어 리드선 R_3 으로 화살표 방향의 누설 전류를 흘려 센싱 오차를 일으킨다.



(a) (b)



(c)

그림 8. 누설전류 방지층(a), 누설전류 방지선(b), 수직 단면도(c)
Fig. 8. Leakage current blocking layer(a), blocking line(b), vertical cross section (c)

그림 8은 센서간 누설전류를 제거하기 위한 blocking layer와 blocking line이다. Blocking layer는 부도체 막으로서 바이어스선과 리드선이 교차하는 부분에만 홈을 형성한 것이다. 바이어스선과 센싱 매질 사이에 위치하며 홈을 통해서만 전류가 흐를 수 있으므로 바이어스선에서 인접한 센서로 흐르는 전류량을 제한한다. Blocking line은 두 리드선의 중앙에 리드선과 평행하게 배선한 도선으로서 적당한 저항으로 풀다운시키면 횡방향 잔류 누설 전류를 흡수하여 센서간 간섭을 완전 제거한다.

그림 9는 6x6 단일 압저항 매질 압력 센서에서 간섭 제거 효과를 나타낸 것이다. 검정 화면의 중앙 백색 선 좌측 부분은 간섭 제거 패턴이 없는 곳으로 하나의 센싱 셀 S_{ij} (●표 부분)에 압력을 가했을 때 주변 3~4 개의 S_{ij} 에도 신호가 나타나고 있다. 반면에 간섭 제거 패턴을 추가한 우측 센서 부분은 압력이 인가된 셀만 출력을 보인다.

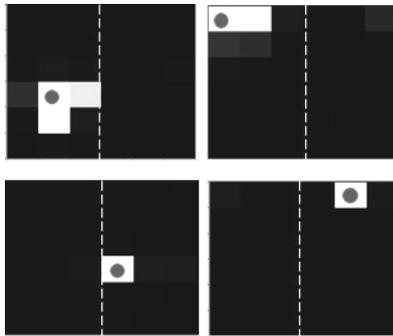


그림 9. 센싱셀 간 간섭 현상, 간섭 발생(상), 간섭 제거(하)
Fig. 9. Interference between S_{ij} 's, Occurring of interference (upper), removal of interference (lower)

IV. 하중벡터 측정

2차원적인 압력 분포 측정에 더하여 압력의 방향 즉 하중벡터를 구하면 인체 진단이나 로보틱스 등에 더욱 유용한 정보로 활용할 수 있다. 이를 위해 앞 절에 제작한 단일 압저항 매질 기반의 압력분포 센서에 하중벡터를 추출하는 구조물을 추가하여 하중의 방향을 추출해 보았다.

그림 10은 하중의 방향 추출 원리를 나타내는 것으로 꼭지점이 잘린 피라미드 형 탄성구조물이 인접한 2개의 압력 센서를 덮고 있다. 그림 왼쪽과 같이 하중이 수직으로 작용하면 2개의 압력 센서에 작용하는 하중은 같고 두 센서는 같은 크기의 신호를 출력한다.

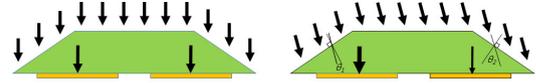


그림 10. 인접한 2 개의 압력센서를 덮고 있는 피라미드형 탄성구조물과 수직(a) 및 경사(b) 인가되는 하중
Fig. 10. Pyramidal elastic structure covering 2 neighboring pressure sensors with vertical (left) and inclined (right) load

그러나 오른쪽 그림과 같이 하중이 경사져서 인가되면 탄성구조물의 두 빗면에 작용하는 하중의 크기가 달라져서 한 쪽 센서가 더 큰 압력을 받게 된다.

하중의 입사각이 작은 경우 두 센서에 인가되는 하중의 차는 작용 하중의 크기와 경사각에 비례할 것으로 예상되는데 이를 시험하기 위해 PDMS와 EcoFlex-30을 1:1로 섞은 탄성체를 사용하여 그림 11과 같은 피라미드형 구조물을 제작하였다. 각 구조물은 2x2 센서를 덮는 크기이며 빗면의 경사는 45°로 하였다.

그림 12 (상)은 실제 제작한 피라미드 형 탄성구조물이고 (하)는 탄성구조물에 45° 방향의 하중을 인가했을 때 하중 방향에 따른 2x2 센서 출력이다. 상하 좌우 4가지 방향에 대해 모두 그림 10에서 예측한 것과 같이 하중 벡터가 시작되는 쪽의 셀은 큰 출력을 보이

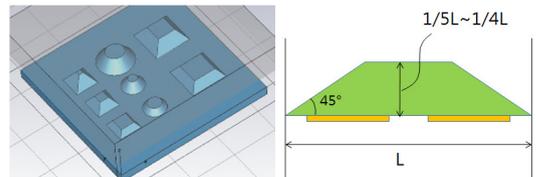


그림 11. 하중벡터 추정을 위한 피라미드형 탄성구조물(좌)과 규격(우)
Fig. 11. Elastic pyramidal structures for load vector estimation (left) and the scale(right)

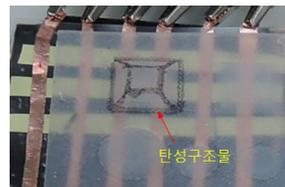


그림 12. 제작한 하중벡터 추출용 탄성구조물(상)과 하중 방향에 따른 2x2 센서 출력(하)
Fig. 12. Fabricated pyramidal elastic structure (upper) and 2x2 sensor outputs with the load direction (lower)

고 하중 벡터가 끝나는 쪽의 셀은 작은 출력 특성을 보이고 있어 이를 하중 벡터 추정을 위한 알고리즘 구현에 적용할 수 있을 것으로 생각된다. 단 이 실험에서 경사 하중을 정밀한 경사 하중 인가 장치가 아닌 지압으로 인가했기 때문에 약간의 실험 오차는 있을 수 있으며 현재로서는 분포형 센서에 대하여 표준적인 경사 하중 인가 장치가 없기 때문에 우선적으로 정밀한 센서 뿐만 아니라 경사 하중 인가 방법에 대한 규정이 필요하다.

V. 결 론

CNT와 PDMS를 혼합한 유연성 있는 압저항 매질을 제작하고 이를 이용하여 단일 압력 센서와 단일 매질의 압력 분포 센서 및 하중 벡터를 도출할 있는 트랜스듀스 구조 테스트를 하였다. 실린더형 단일 압력 센서의 경우 200kPa까지 좋은 압저항 특성을 보였지만 300kPa에서 포화되었으며 500kPa 이상에서는 기형성된 전도성 path의 깨짐에 의한 저항 증가 현상을 보였다. 또한 압력 분포 측정에서는 기존과 같이 개별 센서를 일정 간격으로 배열하는 대신 단일 매질을 바이어스선과 리드선 교차 배선으로 분할하여 분포형 센서로 동작시켰으며 이때 센싱 셀간의 간섭을 잔류 전류 blocking layer과 blocking line를 채택하여 제거함으로써 개별 소자의 배열이 필요없는 단일 매질 분포형 압력 센서가 가능함을 보였다. 아울러 경사저서 인가되는 하중을 두 센서 간의 압력차로 변환하는 피라미드형 탄소구조체를 사용하여 하중벡터를 구하는 방식을 제안하고 검증하였다.

References

[1] C. H. Je, C. A. Choi, S. Q. Lee, and W. S. Yang, "MEMS pressure sensor technology and industry trends," *Electron. and Telecommun. Trends*, vol. 30, no. 6, pp. 21-30, Dec. 2015.

[2] M. Amjadi, Y. J. Yoon, and I. Park, "Ultra-stretchable and skin-mountable strain sensors using carbon nanotubes-Ecoflex nanocomposites," *NanoTech*. vol. 26, No. 37, 375501, 2015. doi:10.1088/0957-4484/26/37/375501

[3] J. S. Kim and G. W. Kim, "Hysteresis compensation of piezoresistive carbon nanotube/ polydimethylsiloxane composite-

based force sensors," *Sensors* 2017, 17(2), 229; doi:10.3390/s17020229

[4] H. Lee, D. Kwon, H. Cho, I. Park, and J. Kim, "Soft Nanocomposite Based Multipoint, Multi-directional Strain Mapping Sensor Using Anisotropic Electrical Impedance Tomography," *Scientific Reports* vol. 7, Article number: 39837 (2017)

[5] K. S. Sohn, J. Chung, M. Y. Cho, S. Timilsina, W. B. Park, M. Pyo, N. Shin, K. Sohn, and J. S. Kim, "An extremely simple macroscale electronic skin realized by deep machine learning," *Scientific Reports*, vol. 7, Article number: 11061 (2017)

이 왕 주 (Wang-joo Lee)



1986년 2월 : 서울대학교 물리학과 학사
 1988년 2월 : KAIST 물리학과 석사
 1988년 2월~1993년 11월 : 현대전자 반도체연구소 근무
 1999년 8월 : KAIST 물리학과 박사

2000년 10월~현재 : 한국전자통신연구원 초연결원천 연구본부 책임연구원
 <관심분야> 소프트 압력센서, 극한 전력선 통신, 횡속도 탐지 도플러레이더

오 현 우 (Hyun-Woo Oh)



1999년 2월 : 아주대학교 정보통신공학부 학사
 2001년 2월 : 아주대학교 정보통신대학원 컴퓨터공학과 석사
 2012년 2월 : 충남대학교 컴퓨터공학과 박사
 2001년 1월~현재 : 한국전자통신연구원 초연결원천연구본부 책임연구원

<관심분야> 소프트센서, 웨어러블 스마트디바이스, 실감미디어 서비스 플랫폼, Giga Korea 서비스 플랫폼, 홈네트워크 시스템

허 재 두 (Jae-doo Huh)



1987년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 졸업

1990년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 석사

2000년 8월 : 경북대학교 정보
통신공학과 박사

<관심분야> 홈네트워크, 센서
네트워크, 양자통신