

인공촉각과 피부를 위한 탄소나노튜브 기반 생체 모방형 신경 개발

A Biomimetic Artificial Neuron Matrix System Based on Carbon Nanotubes for Tactile Sensing of e-Skin

김종민, 김진호, 차주영, 김성용, 강인필*
(Jong Min Kim¹, Jin Ho Kim², Ju young Cha³, Sung Yong Kim¹, and Inpil Kang¹)

¹Pukyong National University

²Korea Ocean Research & Development Institute

³Korea Institute of Machinery & Materials

Abstract: In this study, a carbon nanotube (CNT) flexible strain sensor was fabricated with CNT based epoxy and rubber composites for tactile sensing. The flexible strain sensor can be fabricated as a long fibrous sensor and it also may be able to measure large deformation and contact information on a structure. The long and flexible sensor can be considered to be a continuous sensor like a dendrite of a neuron in the human body and we named the sensor as a biomimetic artificial neuron. For the application of the neuron in biomimetic engineering, an ANMS (Artificial Neuron Matrix System) was developed by means of the array of the neurons with a signal processing system. Moreover, a strain positioning algorithm was also developed to find localized tactile information of the ANMS with Labview for the application of an artificial e-skin.

Keywords: carbon nanotube, smart nanocomposite, strain sensor, tactile sensor, artificial neuron

I. 서론

인간은 오감인 시각, 청각, 후각, 미각, 촉각 통하여 정보를 얻고 주변 환경과 상호 작용한다. 기계시스템 역시 지능을 갖추기 위해서는 주변 환경을 인식하여야 하며, 이러한 기능은 인간의 감각기관에 해당하는 센서를 통하여 구현되고 있다. 최근에 활발히 연구되고 있는 지능형 기술이나 생체 모방 공학에는 인간의 감각기관을 모방한 기술들이 활발히 개발되고 있다[1-3]. 지금까지 인간의 감각 기관을 모사 하는 센서로는 주로 시각과 청각에 집중된 반면 촉각, 후각, 미각 기능을 갖는 센서 개발의 연구는 상대적으로 미비한 상태이다. 센서 기술은 그 동안 많은 공학 분야에서 상당한 관심과 발전을 이끌어 왔으며, 더불어 그 기술의 응용분야와 관련하여 정밀하고 경제적인 센서에 대한 수요가 증가 되어왔다. MEMS 기반의 센서기술은 이러한 요구를 만족시키며 발전 되어 왔다. 그러나 MEMS 기반의 실리콘 공정은 필연적으로 고온의 제조 조건을 필요로 하기 때문에 값싼 유연성 재질을 활용 수 없으므로 가볍고 유연성이 있거나 경우에 따라서는 일회용 일 수 있는 저비용의 대면적 센서의 제작에는 다소 제한적이다. 따라서 종이, 플라스틱 섬유, 고분자 등을 소재로 하여 저비용과 상대적으로 쉬운 제조 공정을 이용한 센서

들은 이전의 센서 의 한계점을 어느 정도 극복 할 것으로 기대된다. 이러한 시도로 최근에는 크고 유연성을 지니고 있는 센서 개발을 위하여 OFET (Organic Field-Effect Transistor) 기술을 활용한 힘과 변위 센서가 연구 되고 있다. 그러나 OFET 제조 공정 역시 여러 공정을 거쳐야 하는 공정의 복잡성, 높은 구동 전압 대비 낮은 신뢰성으로 인하여 경제성과 실용성을 지닌 미세 힘/변위 센서 제작에 부분적인 한계가 있다고 보고되고 있다[4].

촉각센서는 압력, 온도 등의 물리량을 측정할 수 있는 고성능의 센서가 넓은 면적에 분포 되어 있어야 하며 동시에 유연함과 신축성이 요구된다. 나노 복합재료는 나노 충전재(filler)와 기저재료(matrix)를 혼합하여 제작을 할 수 있으므로 촉각센서가 요구되는 신축성 또는 유연성을 지니고 있는 기저재료를 활용할 수 있으며, 물리량을 측정할 수 있는 계측 특성은 나노 충전재를 활용하여 구현 할 수가 있다. 이러한 복합재료는 새로운 지능형 재료(smart material)로 개발 될 수 있으며, 나노 지능형 복합재료를 제작하는 충전재로는 우수한 물성치를 지니고 있는 탄소나노튜브(CNT: Carbon Nanotube)를 활용할 수 있다[5]. CNT는 1991년 Iijima에 의해 발견된 탄소동소체로서 탄소 6개로 이루어진 육각형들이 서로 연결돼 벌집무늬로 결합되어 원통 형태를 이루는 물질로 높은 기계적 강도 및 탄성계수와 낮은 마찰계수 등 우수한 기계적 특성뿐만 아니라 전기를 통하여 구리와 같은 금속성 전극이 될 수 있는 우수한 전기적 특성을 가지고 있다. 또한 화학적 안정성이 뛰어나 부식이나 극한의 환경에서 사용이 용이하다[6,7]. 이러한 특성을 바탕으로 최근에는 CNT를 기반으로 하는 다양한 센서의 연구가 이루어지고 있으며 인공 감각으로 사용될 수 있는 연구들이 진행되고 있다. 일본 동

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 11. 15., 수정: 2011. 12. 5., 채택확정: 2011. 12. 20.

김종민, 김성용: 부경대학교 메카트로닉스공학과

(bloodv@nate.com/tycuncundra@nate.com)

김진호: 한국해양연구원 해양시스템 연구부(jhkim@moeri.re.kr)

차주영: 한국기계연구원(jycha@kimm.re.kr)

강인필: 부경대학교 기계자동차공학과(ipkang@pknu.ac.kr)

* 이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임 (PK-2010-069).



그림 1. MWCNT/ 폴리우레탄 인공신경.
Fig. 1. MWCNT/ polyurethane composite artificial neuron.

경대학 연구팀은 CNT와 고무를 이용하여 열과 압력을 감지할 수 있는 로봇의 인공피부(e-skin)를 개발하였다[8]. Loh는 탄소나노튜브를 활용하여 시간에 따른 구조물의 변형을 표현하는 피부 센서를 개발하였다[9]. 본 연구팀은 유연성을 가지며 인장 및 압축에 양호한 특성을 보이는 EPDM (Ethylene Propylene Diene M-class)을 이용하여 스트레인 측정이 가능한 지능형 나노 복합소재를 연구하여 신축성을 지니고 있는 촉각센서 개발의 기초 연구를 수행하였다[10,11].

본 연구에서는 다중벽 탄소 나노 튜브(MWCNT: Multi-Wall Carbon Nanotube)와 고분자 재료를 혼합하여 지능형 나노 복합재료(smart nano composite)를 활용하여 장신의 파이버(fiber) 형태의 연속형 센서(그림 1)로 제작하였다. 유연성을 지니도록 제작된 센서는 부착된 구조물에 기계적 변형이 발생하였을 경우 그의 전기 저항이 변화하는 전왜성(piezoresistivity)을 지니며, 장신의 파이버(fiber) 형태로 유연성을 지닐 수 있으며 감지 특성이 인체의 감각 기관인 신경과 유사한 특성을 지니고 있으므로 인공 신경(artificial neuron)이라고 명명하였다. 이러한 장신의 인공신경은 부착 부위에 특정 정보가 발생하였을 시에 그 위치 추정이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 인공신경 센서의 위치추정 한계를 부분적으로 극복하기 위하여 이들을 격자 형태로 조합시킨 신경 망을 구성하여 이들의 특성과 접촉 정보를 얻어 새로운 촉각 시스템을 개발하기 위한 기초 연구를 수행하였다.

II. 인공신경의 특성실험

생체모방형 인공신경은 MWCNT를 충전제로 하여 전기전도성과 전왜성을 지니고 있는 나노 복합소재를 이용하여 제작하였다. 나노 복합소재용 기저재료로서는 우수한 기계적인 강도와 제작 공정이 용이한 에폭시(epoxy) 또는 유연성을 가지며 인장 및 압축에 양호한 특성을 보이는 EPDM 등을 이용하였다.

촉각을 지닌 인공신경 개발을 위하여 나노 복합소재의 스트레인 측정 특성을 실험하였다. 제작된 복합소재 샘플을 구조물을 대신하여 외팔보에 부착 시킨 후 보의 변형량에 대한 복합소재의 저항 변화를 측정하였다. 샘플들은 그림 2에 도시한 바와 같이 외팔보의 변형량이 잘 전달 될 수 있도록 에폭시 수지 접착제를 이용하여 외팔보에 단단히 부착시킨 후 보의 인장과 압축 변형량에 따른 전기저항 변화를 측정하였다. 이때 외팔보의 변위와 저항 변화는 레이저 변위 센서(Keyence LC-2400A)와 멀티미터(YOKOGAWA 732)를 사용하여 각각 측정하였고 그 결과를 그림 3에 도시하였다. 측정된 외팔보의 변위는 스트레인으로, 그리고 센서의 저항값 변화

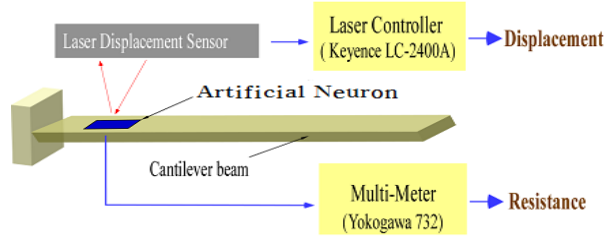


그림 2. 변형량 측정의 개략도.
Fig. 2. Schematic illustration of strain measurement.

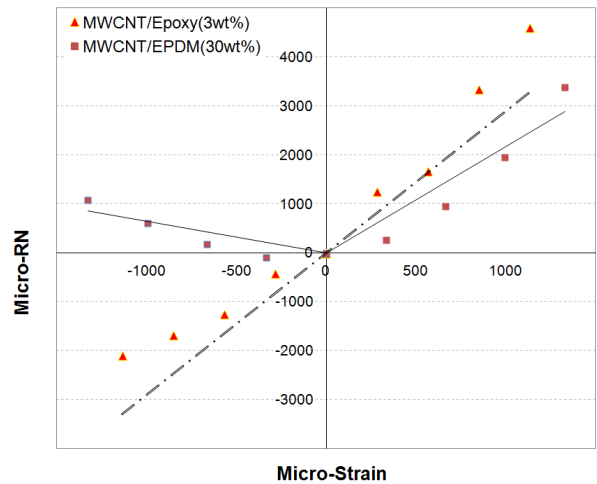


그림 3. MWCNT기반의 지능형 나노 복합체의 전왜 특성.
Fig. 3. Experimental strain model of MWCNT based smart nano composites for the artificial neuron.

역시 식 (1)과 같이 무차원화 시킨 저항 변화율(R_N)로 각각 환산하였다.

$$R_N = \frac{R_s - R_0}{R_0} \tag{1}$$

여기서 R_0 는 변형 발생 전 초기의 저항 값이고 R_s 는 변형 후에 측정된 저항 값이다.

에폭시를 기저재료로 하는 복합소재는 인장과 압축에서 선형적인 저항의 변화를 보이고 있다. 따라서 에폭시를 이용한 복합소재는 저항 변화 측정을 통하여 인장과 압축을 계측할 수 있다. 반면에 EPDM을 이용한 복합소재는 인장과 압축에 대해서 모두 저항이 증가 하는 특성을 보이고 있어 한 방향으로 작용하는 하중 또는 변형 조건에만 이용될 수 있는 특성을 보였다. 이러한 특징은 촉각은 주로 한 방향으로만 작용하는 하중과 같으므로 EPDM 기반의 인공신경은 유연한 탄성을 지니며 비교적 선형적 응답특성을 지닌 촉각센서로 활용 될 수 있다. 그리고 이들 나노 복합소재로 제작된 촉각 센서의 감도는 나노 복합소재의 게이지 율(gauge factor)로 추정할 수 있으며, 이들의 게이지 율은 통상적으로 사용되는 금속 포일형(foil type) 스트레인 게이지 율과 유사한 1-5 범위이다[12,13].

인공 신경 센서의 전왜성은 외력에 의한 MWCNT 복합소재에 변형이 발생할 때에 기저재료에 분포되어 있는 나노튜브

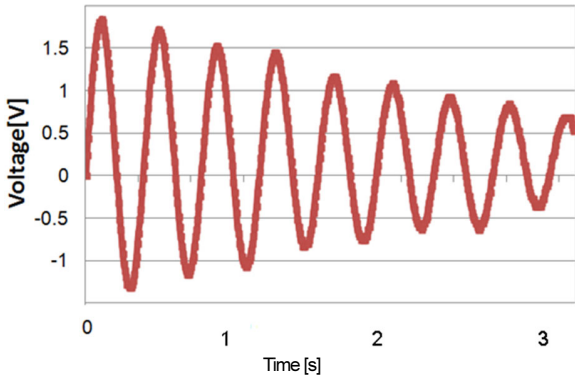


그림 4. 인공 신경의 자유진동 응답특성.

Fig. 4. Free vibration response of the artificial neuron.

브 간의 전기적 접촉 변화에 의한 저항 변화로 나타나게 된다[11,13]. 이 미세한 센서의 저항 변화를 기존의 스트레인 게이지를 이용한 변형량 측정 방법과 동일하게 휘스톤 브릿지를 이용하여 변형량을 측정할 수 있다. 본 실험에서는 인공 신경의 변형 신호를 검출하기 위한 측정회로를 제작하여 저항변화를 전압 차이로 변화 시킨 후, 이를 20 dB의 이득(gain) 값으로 증폭 시킨 후 저주파 필터(low pass filter)를 이용하여 잡음을 제거 하여 측정하였다.

인공신경의 동적 응답특성을 실험하기 위하여 외팔보의 초기 변형에 따른 자유진동 응답을 측정 하였다. 그림 4는 EPDM 기반 센서를 이용한 외팔보 동적 응답을 측정한 결과로서, 인공신경은 정적인 변형량뿐만 아니라 동적 변형 역시 측정 가능함을 알 수 있다. 이러한 특성은 나노 복합소재 기반의 촉각센서가 빠른 동적 입력에도 효과적으로 적용될 수 있음을 보이고 있다.

나노 복합소재들의 스트레인에 의한 저기 저항 변화 특성은 촉각의 감지에 효과적으로 이용이 될 수 있다. 즉 부착된 구조물에 접촉이 발생할 경우 이로 인하여 스트레인이 발생되므로 이들 센서재료의 전왜성이 민감할 경우 접촉 정보는 그 크기까지 정밀하게 측정이 가능할 것으로 예측된다.

III. 인공 신경 격자 시스템

(Artificial Neuron Matrix System, ANMS) 개발

일반적으로 넓은 면 전체의 정보를 측정하기 위해서는 이를 뒤 덮을 수 있는 많은 수의 센서들이 필요하며 또한 신호 처리를 위하여 복잡한 배선과 신호처리 비용 상승 등 경제적인 문제가 발생한다. 반면에 인공신경과 같이 장신의 연속형(continuous) 센서를 이용하여 대상 면의 상태를 계속할 경우에 하나의 센서가 넓은 영역을 담당하여 계속 할 수 있으므로 비용을 절감 할 수 있을 것이다. 그러나 이러한 연속형 센서는 센서상의 어떠한 위치에서 신호가 계속이 되었는지 정보의 위치 추정(localization)에 어려움이 있다. 즉 인공신경은 장신의 연속형 센서이므로 이 센서상의 어느 위치에 하중을 가해도 하중에 대한 스트레인 값만 출력되고 스트레인이 발생한 위치의 정보는 얻을 수가 없다. 이러한 특성은 마치 인체에 분포하고 있는 신경이 그 신경 섬유상의 어느 위치에 자극을 주어도 똑 같이 인식하므로 그 자극 발생 위치를 알 수 없는 특성과 유사하다고 할 수 있다. 따라서 인공신경을

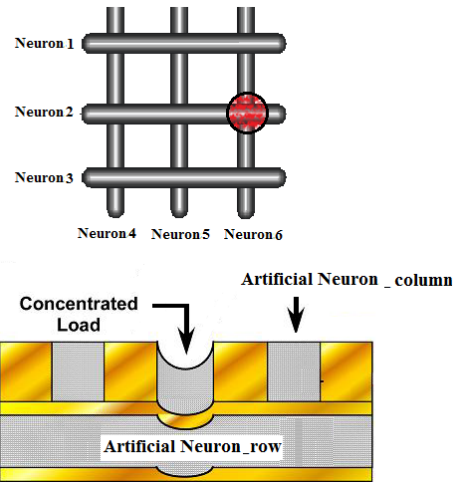


그림 5. 위치 추정 알고리즘의 개략도.

Fig. 5. Schematic illustration of the pressure location algorithm.

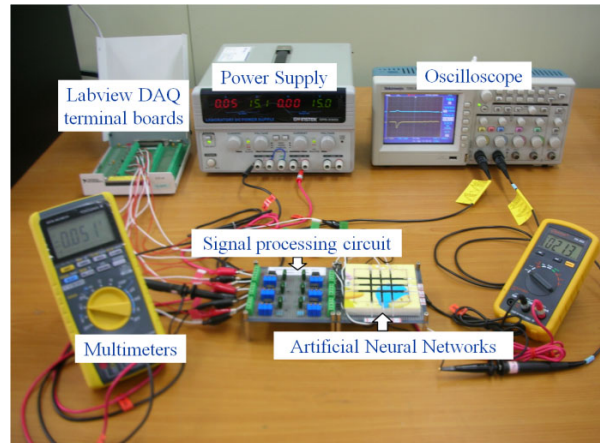


그림 6. ANMS의 실험구성.

Fig. 6. The experimental setup of the ANMS.

활용하여 대면적 감시용 시스템이나 또는 e-skin으로 개발하기 위하여 대상 면의 변형량 측정과 그 발생 위치 추정을 위하여 이들 신경을 격자형으로 조합하여 사용하는 ANMS를 개발하였다.

이 ANMS는 그림 5에 도시한 바와 같이 인공신경을 3행(neuron no.1, no.2, no.3) 과 3열(neuron no.4, no.5, no.6)의 격자 형태의 망으로 구성하였다. 그리고 이들의 신호 처리를 위하여 그림 6에 도시한 바와 같이 휘스톤 브릿지, 증폭기(INA 128) 및 잡음을 제거하기 위한 RC 필터 회로를 제작하여 시스템을 구성하였다. ANMS는 각 인공신경들이 주변에서 감지되는 변형량의 크기 신호를 조합하고 비교하여 상대적으로 큰 신호의 발생 지점을 접촉지점으로 추정하도록 신호처리 알고리즘을 설계하였다. 그림 7은 ANMS 패드 위에 위치하고 있는 인공신경 2번과 인공신경 6번 근처에 압력을 가하였을 시에 응답을 측정한 결과이다. 압력이 가해진 주변의 센서인 인공신경 2와 인공신경 6의 응답 신호 세기가 가장 높게 나타남을 감지하여 접촉의 발생 위치가 이들 센서가 교차하는 지점 부근으로 추정 할 수 있다. 그림 8은 Labview 환경에서 개발 된 ANMS의 화면이며, 인공신경 격자 구조의

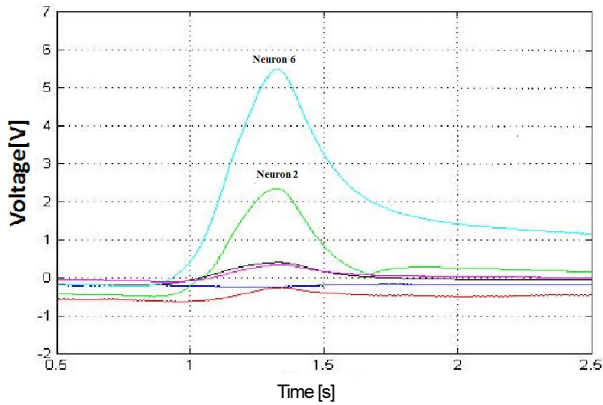


그림 7. 인공 신경의 신호 강도 비교.

Fig. 7. Signal intensity from the artificial neurons.

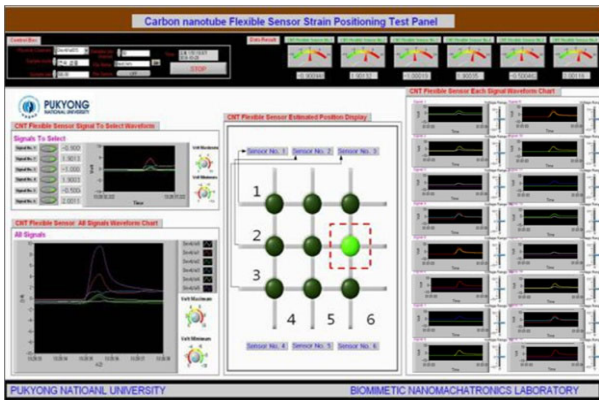


그림 8. Labview를 이용한 ANMS의 GUI.

Fig. 8. ANMS GUI with virtual Instrument of Labview.

교차점에 LED를 부착하여 그림 7에 도시한 바와 같이 출력 값 가장 큰 변화를 보인 인공신경 6과 인공신경 2가 조합된 위치를 LED의 불이 들어온 것으로 위치를 추정하는 결과를 보여 주고 있다.

현재의 알고리즘은 단일 접촉 정보의 추출만이 가능하나, 향후에는 다중 접촉 정보의 추출 연구와 더불어 보다 정교한 접촉 형상의 추출을 위한 알고리즘 개발 등이 수행될 계획이다.

IV. 결론

본 논문에서는 MWCNT와 에폭시 또는 EPDM 기반의 전왜성을 지닌 장신의 연속형 센서인 인공신경을 제작하였다. 그리고 이를 인공촉각으로 활용하기 위하여 그 특성에 대하여 연구하였다. MWCNT 기반의 지능형 나노 복합소재를 이용하여 제작된 센서는 변형 또는 힘을 감지할 수 있는 전왜성을 지니고 있을 뿐만 아니라 장신의 파이버(fiber)형태로 유연성을 지닐 수 있으며 감지 특성이 인체의 감각 기관인 신경과 유사한 특성을 지니고 있으므로 인공 신경 이라고 명명하였다.

인공신경제작에 이용된 에폭시를 기저재료로 하는 복합소재는 인장과 압축에서 선형적인 저항의 변화를 보이고 있다. 반면에 EPDM을 이용한 복합소재는 인장과 압축에 대해서 모두 저항이 증가 하는 특성을 보이고 있어 한 방향을 작용

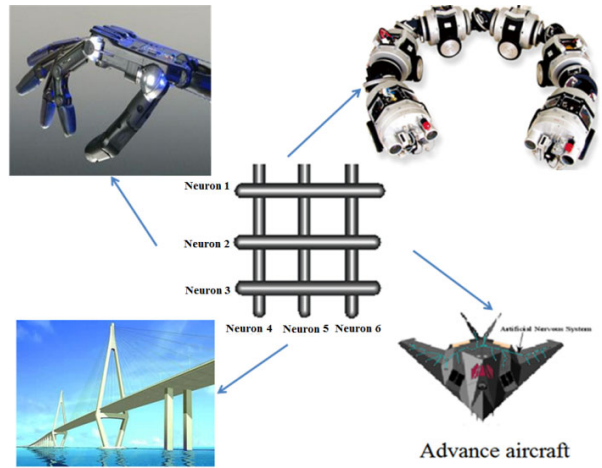


그림 9. ANMS의 응용사례.

Fig. 9. The ANMS applications.

하는 하중 또는 변형 조건에만 이용될 수 있는 특성을 보였다. 이들 나노 복합소재들의 스트레인에 의한 저기 저항 변화 특성은 부착된 구조물에 접촉이 발생할 경우 이로 인하여 스트레인이 발생되므로 접촉 정보 스트레인으로 변형되어 그 크기까지 정밀하게 측정이 가능하다.

인공신경을 활용한 인공촉각 시스템을 개발하기 위하여 대상 측정 면의 변형량 측정과 그 발생 위치 추정을 위하여 이들 신경을 조합하여 사용하는 ANMS를 개발하였다. 인공신경을 3x3 격자 형태의 인공 신경 격자형 조합으로 구성하고 이들의 신호 처리를 위하여 휘스톤 브릿지, 증폭기 및 잡음을 제거하기 위한 RC 필터 회로를 제작하여 넓은 면적을 적은 수의 센서 사용으로 신호처리 비용을 절감 할 수 있도록 하였다. 인공신경은 접촉 하중의 크기는 정확하게 계측되는 반면 그 발생 위치는 추정하지 못하는 한계적 특성이 있다. 따라서 인공신경들을 격자형 조합으로 배치하고 이들이 측정된 접촉력의 크기 값을 통한 출력 신호의 강도 비교를 통하여 접촉 위치를 추정하는 알고리즘을 Labview 시스템을 사용하여 제작하여 스트레인/접촉의 발생 위치와 그 크기를 성공적으로 추정 할 수 있었다.

본 논문에서 연구된 생체모방 인공신경은 복합소재를 기반으로 하므로 다양한 형상으로 제작이 가능하다. 또한 유연성을 지니고 있어 복잡한 형상변화 또는 대변형이 발생하는 부분의 계측뿐만 아니라 새로운 접촉 센서로도 활용될 수 있다. 이와 같은 특성은 여러 공학적 응용분야가 예상되나, 특히 생체모방기술을 적용한 소형 로봇 및 지능형 시스템의 센서로서 활용 될 수 있어 그림 9와 같이 착용가능(wearable) 센서, 생체모방 로봇, 구조물의 건전성 감시, 스마트 텍스타일(textile), 지능형 시스템 및 첨단 의료장비 등과 같은 다방면에 적용 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] J. W. Morley, A. W. Goodwin, and I. Darian-Smith, "Tactile discrimination of gratings," *Exp Brain Res*, vol. 49, no. 2, pp. 291-299, 1983.

[2] M. S. Kim, J. H. Kim, H. W. Song, and Y. K. Park, "Bio-mimic electronic artificial skin based on flexible electronics," *Journal of*

the Korean Society of Precision Engineering, vol. 26, no. 11, pp. 29-34, 2009.

- [3] T. Papakostas, V. J. Lima, and M. Lowe, "A large area force sensor for smart skin applications," *Proc. IEEE Sensors*, vol. 2, pp. 1620-1624, 2002.
- [4] R. Shinar and J. Shinar, "Organic electronics in sensors and biotechnology," McGraw Hill, 2009.
- [5] I. Kang, Y. Y. Heung, J. H. Kim, J. W. Lee, R. Gollapudi, S. Subramaniam, S. Narsimhadevara, D. Hurd, G. R. Kirikera, V. Shanov, M. J. Schulz, D. Shi, J. Boerio, S. Mall, and M. R. Wren, "Introduction to carbon nanotube and nanofiber smart materials," *Composite Part B: Engineering*, vol. 37, pp. 382-394, 2006.
- [6] S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, 354, pp. 56-58, 1991.
- [7] Y. H. Lee, "The physical property and application of carbon nanotube," *Korean Physical Society (in Korean)*, New Physics, vol. 51, pp. 84-144, 2005.
- [8] T. Sekitani, Y. Noguchi, K. Hata, T. Fukushima, T. Aida, and T. Someya, "A rubberlike stretchable active matrix using elastic conductors," *Science*, vol. 321, no. 5895, pp. 1468-1472, 2008.
- [9] K. J. Loh, T.-C. Hou, J. P. Lynch, and N. A. Kotov, "Carbon nanotube sensing skins for spatial strain and impact damage identification," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 28, pp. 9-25, 2009.
- [10] I. Kang, Md. Abdul Khaleque, Y. Yoo, P. J. Yoon, S. Y. Kim, and K. T. Lim, "Preparation and properties of ethylene propylene diene rubber/multi walled carbon nanotube composites for strain sensitive materials," *Composites: Part A : Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, pp. 623-630, 2011.
- [11] H. Kim, Y. J. Kim, W. K. Baek, K. T. Lim, and I. Kang, "Flexible strain sensor based on carbon nanotube rubber composites" *SPIE Nanosensors, Biosensors, and Info-Tech Sensors and Systems*, vol. 7646, pp. 416, 2010.
- [12] I. Kang, M. J. Schulz, J. H. Kim, V. Shanov, and D. Shi, "A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring," *Smart Materials and Structures*, vol. 15, pp. 737-748, 2006.
- [13] Y. J. Kim, J. Y. Cha, H. Ham, H. Huh, D. S. So, and I. Kang, "Preparation of piezoresistive nano smart hybrid material based on grapheme," *Current Applied Physics*, vol. 11, pp. s350-s352, 2011.



김종민

2010년 부경대학교 지능기계공학 전공 졸업. 2012년 부경대학교 메카트로닉스 석사과정. 2012년~자동차부품연구원 재직. 관심분야는 나노 지능형재료, 로봇 제어 및 동력학.



김진호

2000년 호서대학교 정보제어공학 졸업. 2011년도 부경대학교 메카트로닉스 석사. 2011~현재 한국 해양연구원 재직. 관심분야는 스마트 나노 시스템, 나노 센서 및 수중 탐사 로봇.



차주영

2010년 부경대학교 지능기계공학 전공 졸업. 2012년 부경대학교 메카트로닉스 석사과정. 2012년~현재 한국 기계연구원 재직. 관심분야는 나노 지능형재료 및 지능형 로봇 제어.



김성용

2012년 부경대학교 지능기계공학 전공 졸업. 2012년~현재 부경대학교 메카트로닉스 석사 과정. 관심분야는 나노지능형재료 및 나노 메카트로닉스.



강인필

1991년 성균관대 기계공학과 졸업. 1993년 성균관대 대학원 졸업. 2005년 신시네티(미) 기계공학 박사. 2007년~현재 부경대학교 교수. 관심분야는 나노 지능형재료 및 나노 메카트로닉스.