

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.7.601>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5234(Online)

## 전도성 다공성 구조 압력감지소자

소혜미\* · 박철민\*\* · 장원석\*,\*\*†

\* 한국기계연구원 나노융합기계연구본부 나노역학연구실,

\*\* 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스전공

### Pressure Sensitive Device Using Conductive and Porous Structures

Hye-Mi So\*, Cheolmin Park\*\* and Won Seok Chang\*

\* Convergence Mechanical Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials,

\*\* Dept. of Nano-Mechatronics, University of Science and Technology

(Received March 18, 2014 ; Revised May 2, 2014 ; Accepted May 6, 2014)

**Key Words:** Pressure Sensor(압력센서), Contact Resistance(접촉저항), Carbon Nanotubes(탄소나노튜브), Porous Sponge(스펀지), SWCNT-FET(탄소나노튜브 전계효과 트랜지스터)

**초록:** 일반적으로 표면적/부피비가 큰 전도성 다공체는 슈퍼캐패시터의 전극이나 흡수제, 유연히터 등의 다양한 분야에 적용되어 왔다. 본 논문에서는 이러한 전도성 다공성 구조의 역학적·전기적 특성을 이용하여 고감도 압력센서를 구현하였다. 탄소나노튜브 용액에 스펀지를 적셔 다공체에 전도성을 부여하였으며, 압력에 따른 전도성 다공체의 저항 변화를 측정하였다. 전도성 스펀지에 압력이 가해졌을 때, 각각의 탄소나노튜브들은 서로 맞붙게 되어 저항이 최대 20%까지 줄어들음을 확인하였다. 부드럽고 탄성력이 뛰어난 탄소나노튜브 스펀지는 반복적인 압축실험에도 모양의 변형 없이 매우 빠르게 안정화 되고 일정한 저항변화를 확인할 수 있었다. 또한 스펀지 압력소자를 유연소자에 적용하기 위하여 탄소나노튜브 트랜지스터와 연결하여 외부압력에 따른 전기적 특성변화를 측정하였다.

**Abstract:** Porous conductors are known to demonstrate excellent electrical, mechanical, and chemical resistance. These porous conductors demonstrated potential applications in various fields such as electrodes for supercapacitors, flexible heaters, catalytic electrodes, and sorbents. In this study, we described a pressure sensitive device using conductive and porous sponges. With an extremely simple “dipping and drying” process using a single-walled carbon nanotube (SWCNT) solution, we produced conductive sponges with sheet resistance of < 30 kΩ/sq. These carbon nanotube sponges can be deformed into any shape elastically and repeatedly compressed to large strains without collapse. The pressure sensors developed from these sponges demonstrated high resistance change under pressure of up to a half of their initial resistance.

- 기호설명 -

s-SWCNT : 반도체성 단일벽 탄소나노튜브

#### 1. 서론

최근 인간과 유사한 형태의 로봇 개발에 관한 관심이 증가함에 따라 인간의 감각기관을 모방한

시각센서 및 가속도 센서, 촉각센서 등과 같은 다양한 센서 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히 사람 손 끝처럼 압력, 온도 등의 물리량을 측정하여 사물의 형상을 인식하는 촉각센서는 높은 공간 분해능을 갖는 고성능의 센서가 넓은 면적에 분포함과 동시에 유연성과 신축성을 가져 곡면에도 부착할 수 있도록 개발되고 있다. 현재까지 개발된 실리콘 기반의 촉각센서는 분해능이 뛰어나고 성능이 우수하나 실리콘 재료의 깨짐이나 유연하지 않은 특성 때문에 내구성이 약한 단

† Corresponding Author, paul@kimm.re.kr

점이 있다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 이유로 유연 소자로서 폴리머 기반의 촉각센서도 개발되고 있다. 폴리머 촉각센서의 경우는 소재의 특성상 유연성을 확보할 수 있으나 필름 자체가 구조적으로 외부환경에 취약하며 실리콘 센서에 비해 감도가 낮아서 민감한 감지능력에는 한계가 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>(3,4)</sup> 이러한 단점을 보완하기 위하여 고분자 복합체의 장점에 측정 감도상향을 위하여 고분자 재료에 전도성 물질을 섞어 만든 복합재 형태의 압력감응 재료를 이용한 촉각센서가 대안으로 고려되고 있다. 고분자 전도성 복합재 기반의 센서는 필름형으로 제작할 때 대면적 구현이 가능하고 유연성을 확보할 수 있다. 필름형 센서를 이용한 어레이 센서(array sensor)는 전도성 고무 필름을 압력 감지판으로 사용하고 압력이 인가될 때 고무판의 저항변화를 이용하여 유기트랜지스터와 결합한 어레이형 능동소자 구현 결과가 보고된 바 있다.<sup>(5,6)</sup>

이러한 선행결과를 바탕으로 유연하고 어레이형 센서 구현이 가능한 필름형 센서를 적용하는 것이 유연 고감도 센서 구현에 장점을 가질 것으로 판단된다. 본 논문에서는 탄성력과 복원력이 뛰어난 다공체 구조의 스펀지를 이용하여 압력에 따른 스펀지의 저항변화를 측정함으로써 압력감지 소자로서의 가능성을 살펴보았다. 또한 트랜지스터 전극과 스펀지와 접촉저항의 변화를 이용하여 압력에 따른 트랜지스터의 특성변화를 확인하여 향후 어레이형 센서 구현을 위한 유연센서를 구현하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 전도성 스펀지의 제작

스펀지는 해면동물 또는 합성수지 등으로 만든 다공성 물질로 탄력이 있고 물을 잘 흡수하여, 쿠션이나 가정에서 세척용으로 널리 쓰인다. 이처럼 탄성력과 복원력이 뛰어난 다공체 구조의 스펀지를 이용한 저항타입의 압력소자를 구현하기 위하여 스펀지에 전도성을 부여하였다. 먼저 물에 잘 분산된 단일벽 탄소나노튜브 용액 (TopNanosys, ~85 µg/ml)에 스펀지를 약 1시간 정도 담갔다 120°C 오븐에서 건조시킨 후 스펀지에 남아 있는 단일벽 탄소나노튜브 용액의 계면활성제 및 결합되지 않은 탄소나노튜브를 제거하기 위해 증류수로 세척한 후 다시 오븐에서 건조시

켰다. 건조된 스펀지는 탄소나노튜브가 코팅되었음에도 불구하고 스펀지 본래의 구조 및 특성을 유지함을 알 수 있었다. 다공체 구조의 전도성은 탄소나노튜브 용액의 농도를 달리함으로써 쉽게 조절할 수 있었다.

대략 25 mm × 6 mm × 6 mm 크기의 스펀지 양 끝에 Ag paste로 전선을 단단히 고정하고 로드셀을 통하여 압력을 조절하면서 압력에 따른 전도성 다공체 구조의 저항변화를 측정하였다. 스펀지 자체의 저항뿐만 아니라 전극과 스펀지와 접촉저항의 변화를 이용한 압력 반응을 살펴 보았다.

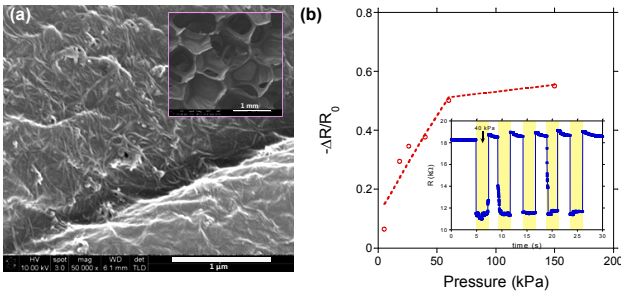
### 2.2 탄소나노튜브 전계효과 트랜지스터(SWCNT-FET) 제작

스프레이법을 통하여 반도체성 단일벽 탄소나노튜브(99% s-SWCNT, NanoIntegris)를 SiO<sub>2</sub>/Si기판 위에 뿌리고 광식각방법(photolithography)과 열증착법(thermal evaporation)으로 소스·드레인 전극 (Cr/Au)을 형성하고 Si 기판을 게이트 전극으로 사용하였다. 물에 분산되어 있는 SWCNT의 계면활성제를 제거하기 위하여 일련의 스프레이와 세척과정을 번갈아 실행하였으며 O<sub>2</sub> 플라즈마 (100 W, 300 mTorr, O<sub>2</sub> 60 sccm, 10 sec)를 통하여 채널영역을 제외한, 기판에 무작위로 분포된 탄소나노튜브를 제거하였다. 제작된 SWCNT-FET의 전기적인 특성을 측정하고 스펀지 압력소자와 연결하여 외부압력에 의해 SWCNT-FET의 특성의 변화를 살펴보았다.

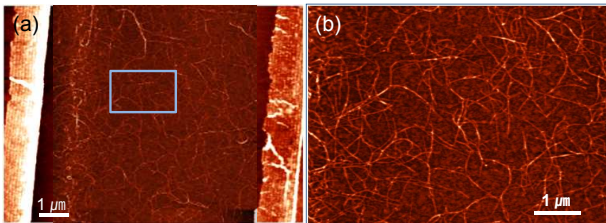
## 3. 실험 결과 및 고찰

이미 많은 연구를 통하여 탄소나노튜브와 폴리머는 반 데르 발스(van der Waals) 상호작용에 의해 강하게 결합한다고 알려져 있듯이<sup>(7,8)</sup> 스펀지를 탄소나노튜브 용액에 담그는 단순한 과정을 통해 스펀지 뼈대에 단일벽 탄소나노튜브가 빠르게 코팅되어 있음을 확인할 수 있다[Fig. 1(a)]. 강하게 결합된 탄소나노튜브는 세척과정을 거쳐도 떨어지지 않을뿐더러, 전도도의 변화도 크게 일어나지 않음을 확인하였다.

스펀지의 종류, 즉 뼈대의 굵기 및 구멍의 크기에 따른 압력반응을 살펴보았다. 같은 조건으로 제작된 두 스펀지의 경우, 직경 500 µm 이상의 구멍과 뼈대의 굵기(대략 200 µm)가 비교적



**Fig. 1** (a) SEM images of CNT sponge. (b) Pressure response of sponge. inset: resistance change under 40 kPa

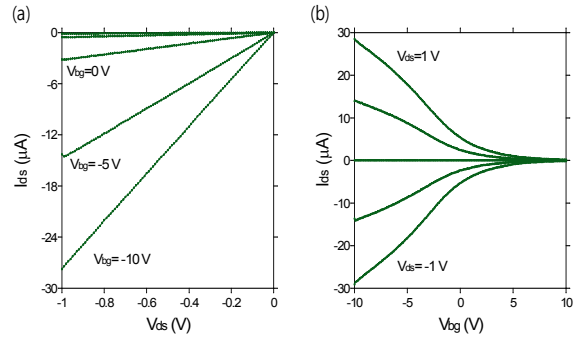


**Fig. 2** (a) An AFM image sprayed s-SWCNTs between electrodes. (b) A magnified view of the outlined region in part a

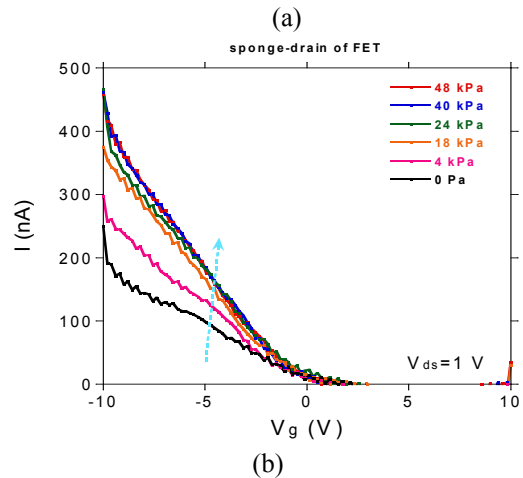
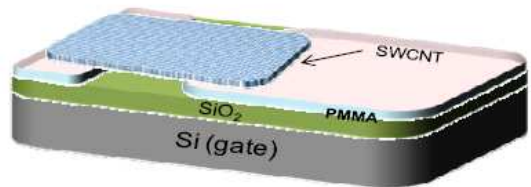
큰 스펀지는 평균 약 30 k $\Omega$ /sq의 저항을, 뼈대 굵기가 가늘고(대략 10  $\mu$ m 이하) 밀도가 큰 스펀지는 평균 3.7 k $\Omega$ /sq의 저항을 가진다. 이는 같은 부피 내에 전류의 통로 역할을 하는 뼈대의 밀도가 클수록 저항이 작아지는 특성을 보이고 있음을 알 수 있다. 외부 압력에 따른 저항의 변화 역시, 뼈대가 가늘고 밀도가 큰 스펀지는 약 20% 정도, 뼈대가 굵은 스펀지는 약 7% 저항이 감소하였다. Fig. 1(b)에서 보이는 것처럼 구멍의 크기가 큰 스펀지의 경우, 압축변형률을 고려한 감도계수는 0.006 kPa<sup>-1</sup>로 약 60 kPa 내에서는 선형성이 유지됨을 확인할 수 있었다. 두 경우 모두 압력이 가해졌을 때 저항이 감소하는 경향을 보이는데, 이는 압력에 의해 탄소나노튜브들이 맞붙어 전도도가 증가하는 것으로 생각된다. 비록 스펀지 자체의 저항변화는 압력감응 고무에 비해 크지 않지만<sup>(9)</sup> 압력에 따른 저항변화는 확실하게 보임을 확인할 수 있었다.

Fig. 2는 기관에 분사된 s-SWCNT의 AFM이미지이다. 평균 길이 1  $\mu$ m 이하, 직경은 1.8 nm를 갖는 s-SWCNT들이 단위면적당 평균 5개 이상의 밀도를 가지고 네트워크를 이루고 있다.

Fig. 3은 약 500 nm의 산화막을 가진 실리콘 기관을 게이트로, 소스와 드레인 전극의 간격이



**Fig. 3** Electrical properties of the SWCNT-FETs on SiO<sub>2</sub>/Si substrate. (a) Output characteristics of the device. A gate voltage between -10 V and 10 V was applied in 5 V steps. (b) Transfer characteristics of the device



**Fig. 4** (a) Schematic diagram of a CNT-based sponge pressure sensor integrated with an SWCNT-FET element. (b) Transfer characteristics of SWCNT-FETs with different external pressures

8  $\mu$ m로 제작된 SWCNT-FET의 전류-전압 특성을 나타낸다. Fig. 3(b)는 FET소자에 게이트 전압을 -10 V~10 V로 변화시키며 일정한 드레인 전압 (V<sub>ds</sub>=1 V~1 V, 0.5 V step)을 인가하였을 때 얻은 드레인 전류 특성으로, 제작된 소자는 전형적인 p 타입 특성을 보이며, 10<sup>3</sup>의 on/off 전류비를 가진다.

압력에 따른 스펀지의 저항변화는 일반적인 압력감응 고무에 비해 매우 미미하다. 스펀지 자체의 저항변화가 크지 않기 때문에 FET와 결합하

여 신호의 증폭을 기대해 볼 수 있다. 따라서 제작된 스펀지 압력소자를 SWCNT-FET의 드레인 전극에 직접 얹음으로써 압력소자와 드레인 전극 간의 접촉저항의 변화를 유도하였다. 이 때 스펀지는 압력소자이면서 동시에 전극의 역할을 기대할 수 있다. 스펀지 압력소자를 SWCNT-FET 드레인 전극에 얹었을 때 소스 또는 채널물질과의 쇼트를 막기 위해 드레인 전극을 제외한 나머지 부분은 PMMA막으로 보호하였다[Fig. 4(a)].

Fig. 4(b)는 스펀지 압력소자를 SWCNT-FET의 드레인 전극 위에 얹고 외부압력을 가했을 때 나타난 전류-전압 특성을 나타낸다. 드레인 전압을 1 V로 고정하였을 때, 압력이 증가함에 따라 드레인 전류 또한 증가함을 알 수 있다. 이는 압력이 증가함에 따라 스펀지 압력소자와 드레인 전극간의 접촉저항이 줄어들기 때문임을 예상할 수 있다. 그러나 18 kPa 이상의 압력을 가했을 때는 전류 증가의 폭이 크게 줄어들고 포화되는 현상을 보인다. 낮은 압력에서는 스펀지 압력소자와 드레인 전극간의 접촉저항에 의해 큰 전류증가가 이루어지며 미소 압력감지 특성을 유도한다. 일정 압력 (18 kPa) 이상에서의 전류변화는 스펀지 자체의 변형에 따른 저항변화에 의한 전류증가라 볼 수 있다. 본 연구에서 사용한 스펀지의 경우가해지는 압력에 따른 변형 한계인 40 kPa까지 범위에서 전류변화가 감지되었으며 그 이상의 압력에 대해서는 저항 변화가 크지 않기 때문에 전류 또한 포화됨을 확인할 수 있었다.

이상과 같이 다공성 소재를 이용하여 전도성을 부가하는 나노소재 코팅을 통한 복합재형 압력감지 센서를 구현하였다. 본 실험에서 사용한 탄소나노튜브와 스펀지 소재는 변형성 및 복원력이 매우 탁월하며, 압력변화에 저항을 변화시킬 수 있는 특성이 있음을 확인하였다. 본 연구를 바탕으로 변형에 유연하고 압력에 민감한 다공성 전도체형 복합소재와 탄소나노튜브 트랜지스터 및 유기소자 트랜지스터 등과 결합하면 촉각감지를 위한 능동형 유연센서소자를 구현하는데 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

다공체 구조를 단일겹 탄소나노튜브 용액에 담갔다 말리는 간단한 과정을 통해 스펀지에 전도성을 부여하였으며, 이 전도성이 부여된 다공체

구조의 저항변화를 통하여 압력센서로의 가능성을 확인하였다. 스펀지 뼈대의 굵기와 구멍의 크기에 따라 압력반응이 달라졌으며, 최대 20%의 저항감소를 확인할 수 있었다. 또한 제작된 스펀지 압력소자를 SWCNT-FET와 연결함으로써 외부압력이 증가함에 따라 SWCNT-FET의 드레인 전류 또한 증가함을 확인할 수 있었다. 작은 압력에서는 접촉저항의 영향으로 전류가 크게 증가하고, 일정압력 이상에서는 스펀지 내부의 저항변화에 의한 전류변화를 측정할 수 있었다. 향후 전도성 다공체와 트랜지스터의 전극을 연결한 유연 압력센서 어레이 구현이 가능할 것으로 보인다.

#### 후 기

이 논문은 2011년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 (재)나노기반 소프트일렉트로닉스 연구단(글로벌프론티어사업) (CASE-2013M3A6A5073183)와 한국연구재단 나노·소재기술개발사업(그린나노기술개발사업)의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0020506).

#### 참고문헌 (References)

- (1) Ko, W. H., Wang, Q., 1999, "Touch Mode Capacitive Pressure Sensors," *Sens. Actuat. A* Vol. 75, pp. 242~251.
- (2) Makihata, M., Tanaka, S., Muroyama, M., Matsuzaki, S., Yamada, H., Nakayama, T., Yamaguchi, U., Mima, K., Nonomura, Y., Fujiyoshi, M. and Esashi M., 2012, "Integration and Packaging Technology of MEMS-on-CMOS Capacitive Tactile Sensor for Robot Application Using Thick BCB Isolation Layer and Backside-Grooved Electrical Connection," *Sens. Actuat. A* Vol. 188, pp. 103~110.
- (3) Kim, K., Lee, K. R., Kim, W. H., Park, K.-B., Kim, T.-H., Kim, J.-S. and Pak, J. J., 2009, "Polymer-Based Flexible Tactile Sensor up to 32×32 Arrays Integrated with Interconnection Terminals," *Sens. Actuat. A* Vol. 156, pp. 284~291.
- (4) Schwartz, G., Tee, B. C.-K., Mei, J., Appleton, A. L., Kim, D. H., Wang, H. and Bao, Z., 2013, "Flexible Polymer Transistors with High Pressure

- Sensitivity for Application in Electronic Skin and Health Monitoring,” *Nature Commun.* 4:1859 doi:10.1038/ncomms2832.
- (5) Someya, T., Kato, Y., Sekitani, T., Iba, S., Noguchi, Y., Murase, Y., Kawaguchi, H. and Sakurai, T., 2005, “Conformable, Flexible, Large-Area Networks of Pressure and Thermal Sensors with Organic Transistor Active Matrixes,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* Vol. 102, pp. 12321~12325.
- (6) Takei, K., Takahashi, T., Ho, J. C., Ko, H., Gillies, A. G., Leu, P., Fearing, R. S. and Javey, A., 2010, “Nanowire Active-Matrix Circuitry for Low-Voltage Macroscale Artificial Skin,” *Nature Mater.* Vol. 9, pp. 821~826.
- (7) Pushparaj, V. L., Shajumon, M. M., Kumar, A., Murugesan, S., Ci, L. J., Vajtai, R., Linhardt, R. J., Nalamasu, O. and Ajayan, P. M., 2007, “Flexible Energy Storage Devices Based on Nanocomposite Paper,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* Vol. 104, pp. 13574~13577.
- (8) Yun, S., Jang, S. D., Yun, G. Y., Kim, J. H. and Kim, J., 2009, “Paper Transistor Made with Covalently Bonded Multiwalled Carbon Nanotube and Cellulose,” *Appl. Phys. Lett.* Vol. 95, pp. 104102~104102-3.
- (9) Sekitani, T., Yokota, T., Zschieschang, U., Klauk, H., Bauer, S., Takeuchi, K., Takamiya, M., Sakurai, T., Someya, T., 2009, “Organic Nonvolatile Memory Transistors for Flexible Sensor Arrays,” *Science* Vol. 326, pp. 1516~1519.