

## 탄소나노튜브 필름을 이용한 투명 압저항체의 제작 및 특성 연구

이강원\* · 이정아\*\*† · 이광철\*\* · 이승섭\*

\* KAIST 기계공학부, \*\* 한국표준과학연구원 전략기술연구부

### Fabrication and Characterization of Transparent Piezoresistors Using Carbon Nanotube Film

Kangwon Lee\*, Jung A Lee\*\*†, Kwang-Cheol Lee\*\* and Seung Seob Lee\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,

\*\* Advanced Technology Division, Korea Institute of Standards and Science.

(Received May 28, 2010 ; Revised October 21, 2010 ; Accepted October 21, 2010)

**Key Words** : Carbon Nanotube Film(탄소나노튜브 필름), Transparent Piezoresistors(투명 압저항체), Wafer Transfer Methods(기판 전사 방법)

**초록**: 본 논문에서는 탄소나노튜브 필름을 이용한 투명 압저항체의 제작 및 특성 연구를 수행하였다. 진공필터 방식으로 제작된 다양한 투과도를 가지는 탄소나노튜브 필름은 금층이 증착된 실리콘 기판위에서 사진식각 공정을 통해 패터닝이 된 후, 금층과 실리콘 기판의 약한 접착력으로 인해 실리콘 러버인 poly-dimethylsiloxane (PDMS) 로 전사된다. 탄소나노튜브 필름의 압저항 특성을 분석하기 위해, 얇은 PDMS 멤브레인의 처짐에 대한 탄소나노튜브 필름의 저항 변화를 측정하여 10-20 의 게이지 팩터를 얻었으며, 인가 압력에 대한 저항 변화 실험을 수행하였다. 본 실험을 통하여 탄소나노튜브 필름은 폴리머 멤스의 다양한 응용분야에 투명한 압저항체로 사용될 수 있을 것으로 판단한다.

**Abstract**: We present the fabrication and characterization of transparent carbon nanotube film (CNF) piezoresistors. CNFs were fabricated by vacuum filtration methods with 65–92% transmittance and patterned on Au-deposited silicon wafer by photolithography and dry etching. The patterned CNFs were transferred onto poly-dimethylsiloxane (PDMS) using the weak adhesion property between the silicon wafer and the Au layer. The transferred CNFs were confirmed to be piezoresistors using the equation of concentrated-force-derived resistance change. The gauge factor of the CNFs was measured to range from 10 to 20 as the resistance of the CNFs increased with applied pressure. In polymer microelectromechanical systems, CNF piezoresistors are the promising materials because of their high sensitivity and low-temperature process.

### 1. 서론

탄소나노튜브는 1991 년 전기방전법에 의해 풀러렌을 합성할 때 투과전자 현미경에 의해 발견되었으며, 최근 단일벽 및 다층벽 탄소나노튜브의 압저항 특성을 이용한 압력센서의 연구들이 보고되고 있다. Stampfer<sup>(1)</sup>는 단일벽 탄소나노튜브를 스트레인 게이지로 이용한 압력센서에 대한 연구를 보고하였는데, 이는 전자빔 리소그래피와 반응성 이온건식 식각 공정을 이용하여 210 의 게이지 팩

터를 가지는 산화 알루미늄 멤브레인 압력센서를 제작하였다. 다층벽 탄소나노튜브에 대해서 Fung<sup>(2)</sup>은 SU-8 몰드 작업과 핫엠보싱 공정을 이용하여 polymethylmethacrylate(PMMA) 멤브레인 압력센서를 제작하였으며, 235 의 게이지 팩터를 가지는 연구결과를 보고하였다. Tong<sup>(3)</sup>은 반응성 이온건식 식각 공정과 등방성 실리콘 에칭 공정을 이용하여 실리콘 질화막 캔틸레버 센서를 제작하여 다층벽 탄소나노튜브가 78-134 의 게이지 팩터를 가진다고 보고하였다.

단일벽 및 다층벽 탄소나노튜브들은 높은 게이지 팩터를 가지지만, 대면적 제작의 어려움과 유연 기판에서 제작의 어려움이 있다. 최근 다양한 방법들로 대면적 탄소나노튜브 필름의 제작이 가

† Corresponding Author, sihwa2@kaist.ac.kr  
© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

능해 지면서, 인듐주석산화막(ITO)을 대체할 투명 전극으로 탄소나노튜브 필름을 이용한 연구가 진행되고 있다. 하지만, 현재까지 탄소나노튜브 필름의 압저항 특성을 분석하고, 이를 이용한 응용소자에 대한 연구는 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 진공필터 방식으로 투명한 탄소나노튜브 필름을 제작하고, 맴스 공정을 이용하여 공정을 이용하여 유연한 폴리머기판으로 전사 시키는 제작 방법을 제시하고자 한다. 또한 탄소나노튜브 필름의 압저항 특성을 분석하여, 압력 센서로의 응용 가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 제 작

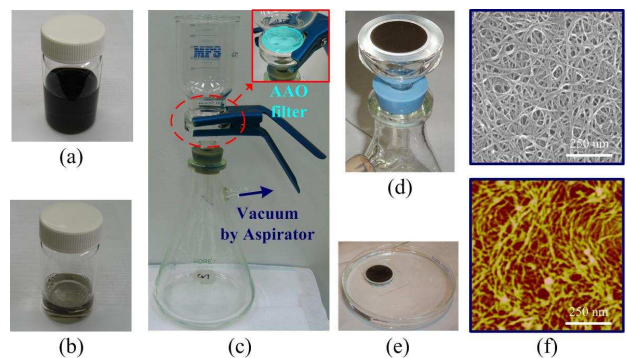
### 2.1 탄소나노튜브 필름의 제작 및 특성

대면적 탄소나노튜브 필름을 제작하는 방법들은 electrophoretic deposition,<sup>(4)</sup> drop casting from solvents,<sup>(5)</sup> Langmuir-Blodgett deposition,<sup>(6)</sup> 그리고 spin coating<sup>(7)</sup>이 있다. 본 연구에서는 Fig. 1 과 같이 필름의 균일도가 뛰어나고, 두께 및 투과도 조절이 가능한 진공필터 방식(vacuum filtration method)<sup>(8)</sup>으로 탄소나노튜브 필름을 제작하였다.

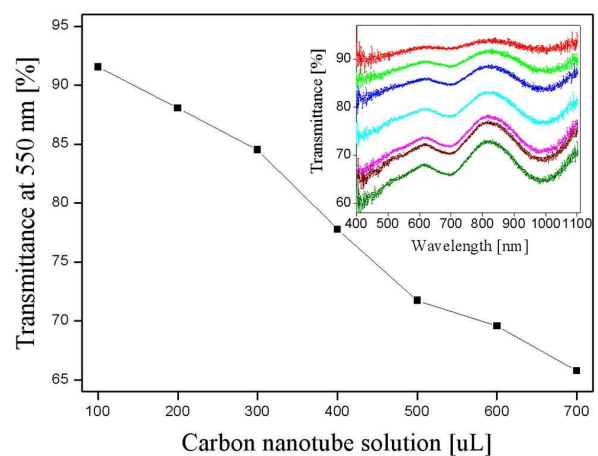
아크방전법으로 성장된 단일층 탄소나노튜브를 (Iljin Nanotech Co., Ltd, Korea) 1 wt % sodium dodecyl benzene sulfonate (SDBS) 분산 용액에 넣고 초음파 분해 공정과 원심분리 공정을 수행하여 진한 농도를 가지는 용액을 제작한 다음(Fig. 1(a)), 다양한 농도를 가지는 탄소나노튜브 필름을 제작하기 위해 SDBS 분산 용액을 이용하여 희석시킨다(Fig. 1(b)). 진공필터 방식을 사용하기 위해서는 탄소나노튜브를 걸러줄 필터가 필요한데, 본 연구에서는 다공성 양극 산화 알루미늄 막(anodic aluminum oxide, AAO)을 사용하였다(Whatman International, 20 nm pore size, 47 mm diameter). 양극 산화 알루미늄 막이 놓여있는 진공필터 장치에 희석된 탄소나노튜브 용액을 붓고 아스피레이터를 작동시킨다(Fig. 1(c)). 이때 분산 용액은 AAO 필터를 빠져나가고 탄소나노튜브는 AAO 필터 위에 걸러지게 되며, DI water 를 3 번 정도 부어서 남아있는 이물질들이 AAO 필터를 빠져나가게 세척해준다. Fig. 1(d)는 양극 산화 알루미늄 막 위에 걸러진 탄소나노튜브 필름을 보여주며, 제작된 필름은 150 °C 핫플레이트에서 5 분 정도 열처리를 해준다. NaOH 용액을 이용하여 양극 산화 알루미늄 막을 제거하고 DI water 로 깨끗이 세척해준다(Fig. 1(e)). 탄소나노튜브 필름의 분산된 정도와 표면 거칠기를 scanning

electron microscope (SEM)과 atomic force microscope (AFM)을 이용하여 확인하였다(Fig. 1(f)). 초음파 분해 공정 및 원심분리 공정을 통해 탄소나노튜브들이 잘 분산되어 졌음을 SEM 사진으로 확인할 수 있었으며, AFM 을 이용하여 탄소나노튜브 필름의 표면 거칠기가 7.9 nm 인 것을 확인하였다.

탄소나노튜브 필름을 투명전극으로 이용하기 위해서 투과도를 측정하였다. 진공필터 방식은 탄소나노튜브 용액의 농도를 조절함으로써 필름의 투과도를 조절할 수 있다. 탄소나노튜브 용액의 양을 50  $\mu$ L 부터 700  $\mu$ L 까지 다양하게 준비하였으며,



**Fig. 1** Fabrication process of CNFs using vacuum filtration method: (a) 1wt % SDBS solution with CNT, (b) Diluted CNT solution, (c) Experiment setup, (d) CNFs on the AAO membrane, (e) CNFs in the NaOH solution and in the DI water, and (f) SEM and AFM image: well-distributed surface morphology and surface roughness of 7.9 nm



**Fig. 2** Transmittance (T) of 65–92 % at 550 nm controlled by the amount of CNT solutions (inset: Transmittance of visible and near infrared rays)

투과도 측정을 위해 유리 기판 위에 필름을 준비하였다. 가시광선 및 근적외선 영역에 걸쳐 투과도를 측정하였고(Fig. 2 inset), 이 때 눈에 가장 민감한 550 nm 파장에서의 투과도는 65–92%로 측정되었다(Fig. 2). 따라서, 탄소나노튜브의 양이 많을수록 필름의 두께가 두꺼워지며, 이로 인해 투과도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

## 2.2 기판 전사 방법을 이용한 유연소자 제작

Poly-dimethylsiloxane (PDMS, Sylgard 184, Dow Corning, Inc.)는 탄성 중합체로써 바이오칩과 마이크로 채널 등 다양한 나노 마이크로 구조물 제작에 널리 이용되는 재료이며, 투명하고 유연한 특성을 가지고 있다. 하지만 일반적인 사진식각 공정과 금속 증착 공정과의 호환성은 뛰어나지 못하다는 단점이 있다. 따라서, 탄소나노튜브 필름을 다양한 폴리머를 기판으로 사용하는 폴리머 멤스 분야에 적용하기 위해서는 전사 방법이 필요하다. 탄소나노튜브를 폴리머 기판으로 전사시키는 방법은 크게 핫엠보싱을 이용한 방법<sup>(9)</sup>과 PDMS 스탬프를 이용하는 방법<sup>(10)</sup>으로 구분할 수 있다. 핫엠보싱을 이용한 방법은 실리콘 산화막 기판에 촉매를 이용하여 탄소나노튜브를 성장시킨 다음, 압력과 온도를 가하여 PMMA 기판으로 전사시킨다. PDMS 스탬프를 이용한 방법은 기판의 표면 에너지 차이를 이용한 것으로써, 스탬프보다 표면 에너지가 높은 기판으로 인력이 작용하여 탄소나노튜브가 전사된다.

본 연구에서는 실리콘 기판 위에서 탄소나노튜브 필름을 원하는 형상으로 패터닝 한 다음, PDMS 로 전사시키는 새로운 방법을 제시하고자 한다(Fig. 3).

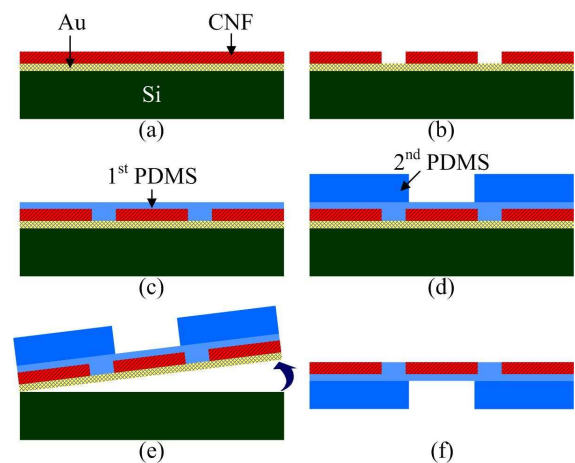
일반적인 멤스 분야에서는 실리콘 위에 접착력이 뛰어난 크롬 (Cr) 또는 티타늄 (Ti)을 증착하고 금속을 증착한다. 하지만, 본 연구에서는 실리콘 기판으로부터 탄소나노튜브 필름을 분리시키기 위해서, 200 nm 두께의 접착력이 나쁜 금층만을 전자빔 증착기를 이용하여 증착하였다. 2.1 에서 설명한 진공필터 방식으로 탄소나노튜브 필름을 제작한 다음, NaOH 용액에 필름을 넣어서 양극 산화 알루미늄 막을 제거한다. 양극 산화 알루미늄 막이 제거된 탄소나노튜브 필름은 DI water bath 에서 금이 증착된 실리콘 기판 위에 놓여지게 된다. 이 때 150 ° C 핫플레이트에서 10 분간 열처리를 수행하면 필름의 주름이 제거되며 기판과 intimate contact 이 이루어진다(Fig. 3(a)). 양성 감광제인 AZ

9260 을 회전도포하고 110 ° C 핫플레이트에서 3 분간 baking 한다. UV 를 조사하고 현상액에 넣어서 AZ 9260 을 현상한다. 진공 챔버에서 100 W 의 RF power 를 발생시키고 O<sub>2</sub> plasma 를 이용하여 4 Å/s 속도로 탄소나노튜브 필름을 식각한다. 사진식각 공정에서 사용된 AZ 9260 을 아세톤을 이용하여 제거한다(Fig. 3(b)). 얇은 멤브레인을 제작하기 위해 PDMS 를 회전 도포하고 65 ° C 대류오븐에서 경화시킨다(Fig. 3(c)). 이때 PDMS 는 monomer 와 agent 를 10:1 의 비율로 섞어서 만들어 준다. Cavity 형성을 위해서 실리콘 튜브를 연결하고, PDMS 를 부어서 두꺼운 기판을 제작한다(Fig. 3(d)). 실리콘 과의 접착력이 나쁘기 때문에 금층이 포함된 PDMS 구조물이 기판으로부터 쉽게 분리되며(Fig. 3(e)), 금층을 식각하면 탄소나노튜브 필름이 PDMS 로 전사되며, 이 때 전사된 탄소나노튜브 필름은 PDMS 에 embedded 된 구조물의 형상으로 제작된다(Fig. 3(f)).

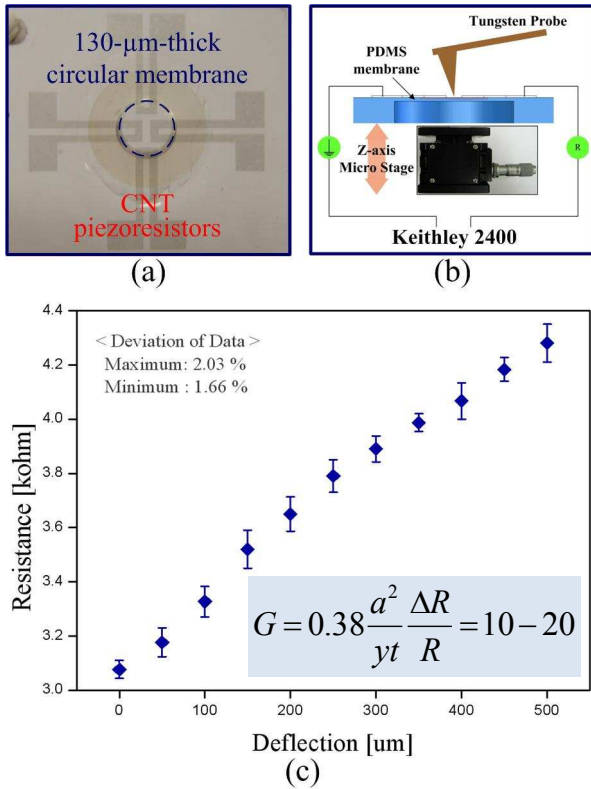
## 3. 실험

### 3.1 압저항 특성 분석

압저항체는 기계적인 변형에 대해서 전기적인 신호인 저항 값이 변하는 특성을 가지고 있으며,



**Fig. 3** Fabrication process: (a) direct contact of CNFs on the Au-deposited Si wafer, (b) patterned CNFs by photolithography and plasma etching, (c) PDMS spin-coating on the wafer, (d) circular membrane formation using silicone tube and PDMS, (e) peeling off the PDMS using the weak adhesion property between the Au layer and the Si wafer, and (f) fully transferred CNFs after etching the Au layer



**Fig. 4** (a) Fabricated result with CNF piezoresistors embedded in 130-μm-thick circular PDMS membrane, (b) experiment setup to measure the resistance change, and (c) experimental results of resistance change as a function of membrane deflection to obtain the gauge factor

압저항체의 스트레인 민감도(strain sensitivity)를 나타내는 게이지 팩터(G)는 중요한 요소이다. 게이지 팩터는 길이 변화에 대한 저항 값의 변화로 정의되므로, 원형 멤브레인의 중앙에 집중 하중이 가해질 경우 멤브레인의 처짐에 대한 관계식을 이용하면 식 (1)과 같이 나타내어진다.<sup>(11)</sup>

$$G = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{\epsilon_{\max}} = 0.38 \frac{a^2}{yt} \frac{\Delta R}{R} \quad (1)$$

여기서, a 는 원형 멤브레인의 반지름이고, y 는 원형 멤브레인의 중앙에서의 처짐이며, t 는 원형 멤브레인의 두께이며, 그리고  $\Delta R / R$  는 저항 변화값을 나타낸다. 그러므로, 원형 멤브레인의 처짐에 대해서 탄소나노튜브 필름의 저항 값의

변화를 측정하면 게이지 팩터를 계산할 수 있게 된다.

Fig. 4(a)는 압저항 특성을 분석하기 위해 제작된 결과물로서, 탄소나노튜브 필름이 130 μm 두께의 원형 PDMS 멤브레인에 embedded 되어있다. Fig. 4(b)는 원형 멤브레인의 처짐에 대한 탄소나노튜브 필름의 저항변화 측정을 위한 실험장치이며 Fig. 4(c)는 실험결과이다. Z-축으로 10 μm의 분해능을 가지는 마이크로 스테이지(MZ-637D-C1 model, Micro Motion Technology) 위에 기관 전사 방법으로 제작된 cavity 를 포함하는 유연 소자를 위치시킨다. 텅스텐 probe 를(Koni Electron Ltd.) 원형 멤브레인의 중앙에 위치시키고, 스테이지를 조절하면서 Keithley 2400 source meter 를 이용하여 저항값을 측정하게 된다. 원형 PDMS 멤브레인의 두께는 600 rpm 의 회전 도포 속도로 제작하여 130 μm 이며, 0 부터 500 μm 까지 50 μm 식 처짐을 증가시키면서 실험을 수행한 결과 탄소나노튜브 필름의 저항 값이 증가하는 것을 확인하였다. 측정 데이터는 최대 2.03 %의 deviation 을 가지는 것으로 분석된다. 측정 결과를 바탕으로 식 (1)을 이용하여 계산한 결과 10-20 의 게이지 팩터를 가지는 것으로 분석되었으며, 저항 변화 실험을 통해 탄소나노튜브 필름이 압저항 특성을 가진다는 것을 확인하였다.

탄소나노튜브 필름에서 압저항 특성이 나타나는 메커니즘은 다음과 같다. 탄소나노튜브 필름은 개개의 탄소나노튜브들이 무작위적으로 연결되어 있는 얇은 박막이다. 외력이 작용하면 탄소나노튜브 필름에 처짐이 생기게 되며, 발생한 처짐은 개개의 탄소나노튜브 간의 접촉을 느슨하게 만든다. 따라서, 개개의 탄소나노튜브들 간의 접촉저항의 변화로 인해 탄소나노튜브 필름의 저항값이 증가하게 된다.

그러면 멤스 분야에서 많이 사용되는 압저항체와 탄소나노튜브 필름의 특성을 Table 1 에서 비교 분석해보았다. 멤스 분야에서 사용되고 있는 압저항체는 단결정 실리콘과 금속이 있다. 단결정 실리콘은 1000 °C 가 넘는 고온환경에서 불순물의 도핑 공정으로 제작되며, 100-170 의 높은 게이지 팩터를 가지고 있다.<sup>(12)</sup> 이것은 높은 민감도를 가지지만, 고온환경에서의 제작으로 인해 폴리머 기관에서는 사용할 수 없다는 단점이 있다. 금속은 진공 증착으로 제작되며 폴리머 기관에서 사용할 수 있지만, 2-5 의 낮은 게이지 팩터로 인해 응용 분야가 제한적이라는 단점이 있다.<sup>(13)</sup>

Table 1 Comparison of piezoresistors

	Single crystal silicon	Metal	Carbon nanotube film
Mechanism	Electrical resistivity change	Dimensional shape change	Dimensional shape change
Area	Silicon MEMS	Polymer MEMS	Polymer MEMS
Fabrication	Selective doping	Metal deposition	Vacuum filtration
Gauge factor	100–170 (p-type)	2–5	10–20
Characteristics	-High temperature process -High sensitivity	-Low temperature process -Low sensitivity	-Low temperature process -High sensitivity in polymer MEMS

탄소나노튜브 필름은 단결정 실리콘보다 낮은 민감도를 가지지만, 제작 과정 동안 고온 환경이 필요 없기 때문에 다양한 폴리머 기판에서 사용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 기존의 폴리머 기판에서 사용되고 있는 금속보다는 최대 10 배 높은 민감도를 가지며, 본 연구에서 제안한 전사 방법을 이용하여 손쉽게 제작이 가능하기 때문에 향후 폴리머 멤스분야에서 투명 압저항체로 사용될 수 있을 것으로 판단한다.

### 3.2 압력에 대한 저항 변화 실험

Fig. 5 는 인가압력에 대한 탄소나노튜브 필름의 저항 변화 측정 결과이다. PDMS 는 750 kPa 의 낮은 Young's modulus 를 가지기 때문에 0–4 kPa 의 낮은 범위에서 압력을 인가하였다. 인가 압력은 regulator 를 이용하여 조절하였는데, 이 때 상용 압력 센서인 AP-V41W (Keyence)와 100 Pa 의 분해능을 가지는 센서 헤드인 AP-43 (Keyence)을 이용하여 압력의 크기를 확인하였다. 80 % 투과도를 가지는 필름에 대해서 PDMS 멤브레인의 두께를 110, 130, 170  $\mu\text{m}$  로 다양하게 제작하여 실험을 수행하였다. 인가 압력의 크기에 따라 저항 값이 증가하는 것을 확인하였다. 멤브레인의 두께는 stiffness 에 영향을 미치기 때문에, 동일한 압력에 대해서 두께가 얇을수록 더 많은 처짐이 발생하게 되며, 이로 인하여 탄소나노튜브 압저항체의 저항 값이 더 커지게 되는 것을 확인하였다.

또한, 탄소나노튜브들은 연결지점에서 약한 van der Waals interactions 으로 이루어져 있기 때문에,

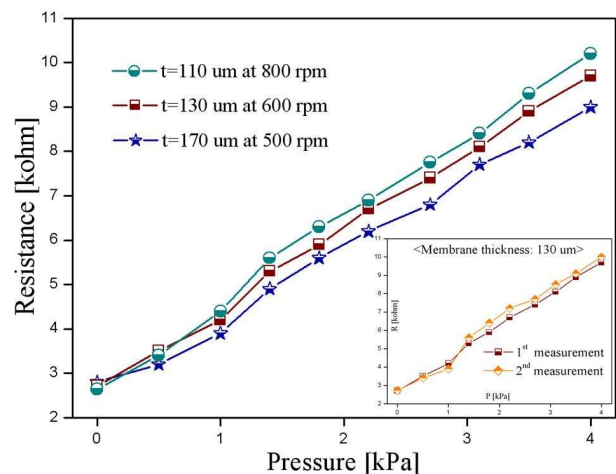


Fig. 5 Resistance change by input pressure with a different membrane thickness (inset: repetitive measurement with 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> deflection)

탄소나노튜브들 사이에서 미끄럼현상이 발생하게 된다. 미끄럼 현상은 외력에 의해 발생하는 스트레인을 완벽하게 전달하지 못하게 되며, 이로 인하여 스트레인 감도는 떨어지게 된다. 따라서, PDMS 는 탄소나노튜브 필름에서 탄소나노튜브들 간의 interconnect stability and interfacial bonding 을 향상시켜 주며, 탄소나노튜브 필름과 PDMS 사이의 미끄럼 현상을 방지해줌으로써 발생하는 스트레인을 완벽하게 전달해 줄 수 있게 되어 감도를 향상시켜 준다.

압력 센서의 성능평가에 있어서 히스테리시스는 작동 압력 범위에서 센서 출력의 반복성을 측정하

는 것이다. 센서의 히스테리시스를 측정하기 위해서는 일반적으로 처짐, 복원, 두 번째 처짐의 3 단계로 수행한다. 하지만 본 실험에서는 복원과정 동안 저항 측정의 어려움으로 인하여, 첫 번째 처짐 실험을 수행한 뒤 한 시간 후 두 번째 처짐 실험을 수행하였다. 낮은 응력에서의 탄성 반응은 반복 실험 후 동일한 압력에 대해 일정 간격의 처짐이 발생하게 된다.<sup>(14)</sup> 따라서, 인가 압력에 대한 저항 변화의 반복성 그래프를(Fig. 5 inset) 통해 PDMS 멤브레인은 소성 변형이 아닌 탄성구간에서 변형이 발생한 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 탄소나노튜브 필름을 이용한 투명한 압저항체의 특성 분석에 대한 실험을 수행하였다. 탄소나노튜브의 농도를 다르게 하여진공필터 방식으로 사람의 눈에 가장 민감한 파장인 550 nm 에서 65~92%의 투과도를 가지는 탄소나노튜브 필름을 제작하였다. 제작된 탄소나노튜브 필름은 맵스 공정을 이용하여 다양한 형상으로 제작이 가능하다는 장점이 있다. 투명 전극으로써의 역할을 수행하기 위해서는 실리콘이 아닌 폴리머 기판에서 사용되어야 하는데, 유연하고 투명한 성질을 가지는 PDMS 는 사진식각 공정과 금속 증착 공정에서 사용하는데 문제점이 있다. 따라서, PDMS 로 전사시키는 방법이 필수적이며, 본 연구에서는 실리콘 기판과 금속 사이의 접착력이 나쁜 것을 이용하여 새로운 전사 방법을 제시하였다.

현재까지 탄소나노튜브 필름의 압저항 특성을 분석하고 이를 이용하여 응용소자로 사용한 연구는 보고되지 않았기 때문에, 압저항 특성을 분석하기 위해 cavity 가 있는 유연 소자를 제작하는 공정을 개발하였다. 유연 소자를 이용하여 원형 멤브레인의 처짐에 대한 탄소나노튜브 필름의 저항 변화값을 측정하고, 이를 바탕으로 10~20의 게이지 팩터를 얻었다. 이는 실리콘 기반의 압저항체 보다는 낮은 게이지 팩터를 가지지만, 낮은 공정 온도를 요구하는 폴리머 기판에서는 높은 민감도를 가지는 압저항체로 사용하여 폴리머 맵스의 다양한 응용분야에 적용할 수 있을 것으로 판단한다.

#### 후 기

본 연구는 Brain Korea 21 프로그램과 NRF nano

R&D 프로그램(2009-0083230)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) Stampfer, C., Helbling, T., Oberfell, D., Schoberle, B., Tripp, M., Jungen, A., Roth, S., Bright, V. and Hierold, C., 2006, "Fabrication of Single-Walled Carbon Nanotube Based Pressure Sensors," *Nano Lett.*, Vol. 6, No. 2, pp. 233~237.
- (2) Fung, K. M., Zhang, Q. H., Chan, H. M. and Li, J., 2005, "A PMMA Based Micro Pressure Sensor Chip Using Carbon Nanotubes as Sensing Elements," In: *Proc. of 18th IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2005)*, pp. 251~254.
- (3) Tong, J., Priebe, M. and Sun, Y., 2007, "Carbon Nanotube Based Strain Sensing Cantilevers," In *Proc. of 20th IEEE Int. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS2007)*, pp. 843~846.
- (4) Gao, B., Yue, G. Z., Qui, Q., Cheng, Y., Shimoda, H., Fleming, L. and Zhou, O., 2001, "Fabrication and Electron Field Emission Properties of Carbon Nanotube Films by Electrophoretic Deposition," *Adv. Mater.*, Vol. 13, No. 23, pp. 1770~1773.
- (5) Sreekumar, T., Liu, T., Kumar, S., Ericson, L., Hauge, R. and Smalley, R. E., 2003, "Single-Wall Carbon Nanotube Films," *Chem. Mater.*, Vol. 15, No. 1, pp. 175~178.
- (6) Kim, Y., Minami, N., Zhu, W., Kazaoui, S., Azumi, R. and Matsumoto, M., 2003, "Langmuir-Blodgett Films of Single-Wall Carbon Nanotubes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 42, No. 12, pp. 7629~7634.
- (7) Meitl, M., Zhou, Y., Gaur, A., Jeon, S., Usrey, M., Strano, M. and Rogers, J., 2004, "Solution Casting and Transfer Printing Single-Walled Carbon Nanotube Films," *Nano Lett.*, Vol. 4, No. 9, pp. 1643~1647.
- (8) Wu, Z., Chen, Z., Du, X., Logan, J. M., Sippel, J., Nikolou, M., Kamaras, K., Reynolds, J. R., Tanner, D. B., Hebard, A. F. and Rinzler, A. G., 2004, "Transparent and Conductive Carbon Nanotube Films," *Science*, Vol. 305, pp. 1273~1276.
- (9) Allen, A., Sunden, E., Cannon, A., Graham, S. and King, W., 2006, "Nanomaterial Transfer Using Hot Embossing for Flexible Electronic Devices," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, pp. 083112.
- (10) Zhou, Y., Hu, L. and Gruner, G., 2006, "A Method of Printing Carbon Nanotube Thin Films," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 88, pp. 123109.
- (11) Giovanni, M. D., 1982, *Flat and Corrugated Diaphragm Design Handbook*, Marcel Dekker, USA, pp. 157~177.

- (12) Toriyama, T. and Sugiyama, S., 2002, "Analysis of Piezoresistance in p-Type Silicon for Mechanical Sensors," *J. MEMS*, Vol. 11, No. 5, pp. 598~604.
- (13) Engel, J., Chen, J. and Liu, C., 2003, "Development of Polyimide Flexible Tactile Sensor Skin," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 13, pp. 359~366.
- (14) Beeby, S., Ensell, G., Kraft, M. and White, N., 2004, *MEMS Mechanical Sensors*, Artech House, United Kingdom, pp. 113~151.