

< 논문 >

탄소섬유를 이용한 압력센서 제작 및 특성평가

박창신* · 강보선† · 이동원**

(2006년 8월 4일 접수, 2007년 3월 16일 심사완료)

Fabrication and Characterization of a Pressure Sensor
using a Pitch-based Carbon Fiber

Chang-sin Park, Bo-seon Kang and Dong-weon Lee

Key Words : Carbon Fiber(탄소섬유), Piezoresistive Effect(압저항효과), Dielectrophoresis(유전영동)

Abstract

This paper reports fabrication and characterization of a pressure sensor using a pitch-based carbon fiber. Pitch-based carbon fibers have been shown to exhibit the piezoresistive effect, in which the electric resistance of the carbon fiber changes under mechanical deformation. The main structure of pressure sensors was built by performing backside etching on a SOI wafer and creating a suspended square membrane on the front side. An AC electric field which causes dielectrophoresis was used for the alignment and deposition of a carbon fiber across the microscale gap between two electrodes on the membrane. The fabricated pressure sensors were tested by applying static pressure to the membrane and measuring the resistance change of the carbon fiber. The resistance change of carbon fibers clearly shows linear response to the applied pressure and the calculated sensitivities of pressure sensors are 0.25 ~ 0.35 and 61.8 $\Omega/k\Omega\cdot\text{bar}$ for thicker and thinner membrane, respectively. All these observations demonstrated the possibilities of carbon fiber-based pressure sensors.

1. 서 론

압력센서는 각종 시스템에서 압력을 측정하는 소자로서, 검출 방식에 따라, 기계식, 전기식, 반도체식 등이 있으며, 최근에는 집적회로기술과 마이크로머시닝기술의 발전으로 소형화, 복잡화된 다기능 스마트 센서에 대한 관심이 높아지고 있다.^(1,2) 반도체 압력센서는 기계식보다 고감도, 고신뢰성, 선형성이 우수하며, 히스테리시스 현상이 없고 소형, 경량으로 진동에도 매우 강한 것이 특징이다. 이 센서는 외부 압력을 응력으로 변환하

는 다이어프램과 다이어프램에서 발생하는 응력을 전기신호로 변환하는 두 부분으로 구성되어 있다. 다이어프램은 단결정 실리콘을 화학적으로 식각하여 형성하며, 다이어프램에서 발생하는 응력을 전기적 신호로 변환하는 방법으로 주로 압저항형과 정전용량형이 가장 많이 사용되고 있다. 압저항형은 응력의 변화가 압저항물질의 저항 변화로 나타나는 원리를 이용한 것이며, 저항소자를 형성시킬 때에 반도체의 불순물확산공정이 이용되기 때문에 저항확산형이라고도 한다.

단결정 실리콘은 변형률에 따른 감도 특성이 금속보다 대략 100 배 정도 높아 잘 알려진 압저항 소자이다. 이러한 단결정 실리콘을 압저항소자로 이용한 실리콘 압저항형 압력센서는 감지방법이 비교적 간단하고, 고감도, 소형이기 때문에, 고성능 센서 시스템에 효과적으로 사용되고 있지만, 온도 변화에 민감하다는 단점을 가지고 있다. 이

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail : bskang@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1683 FAX : (062)530-1689

* 전남대학교 기계공학과 대학원

** 전남대학교 기계시스템공학부

러한 온도 민감성은 압저항소자 자체의 온도에 따른 저항값 변화나 압저항소자와 그것이 부착된 다이어프램 사이의 온도팽창률 차이에 기인하며, 이를 보상해주기 위한 구조가 필요하다.⁽³⁻⁵⁾

최근에는 기존 압저항형 압력센서의 압저항소자를 대신할 수 있는 물질로, 각광 받고 있는 신소재인 탄소나노튜브를 사용하는 가능성에 대한 연구도 진행되고 있다.^(6,7) 하지만, 탄소나노튜브는 나노단위 소자이어서 측정 및 관측의 어려움이 있고, 한 개의 탄소나노튜브를 압저항소자로서 이용하는 데에 많은 어려움이 존재해, 압력센서 제작이 용이하지 않다.

본 연구에서는 탄소나노튜브와 물리적, 기계적, 화학적 특성들이 유사하지만, 크기가 마이크로 단위인 금속성 탄소섬유(Pitch-based Carbon Fiber)를 압저항소자로 이용한 새로운 개념의 압력센서를 제작하고 그 특성을 평가하였다. 전체적인 압력센서 구조는 마이크로머시닝 기술을 기반으로 제작되는 실리콘 압저항 압력센서와 유사하지만, SOI(Silicon on Insulator) 웨이퍼와 탄소섬유를 사용함으로써, 기존 실리콘 압저항 압력센서의 비교적 복잡한 제작 공정을 매우 단순화하였다. 즉, SOI 웨이퍼 내부의 산화막층(SiO_2)을 이용함으로써, 압력센서의 다이어프램 두께를 균일하고, 정확하게 형성할 수 있다. 또한, 기존 실리콘 압저항 압력센서의 압저항소자 형성시 요구되는, 불순물확산공정인 이온주입(Ion Implantation)은 고가 장비의 이용을 필요로 한다는 단점을 가지기 때문에 이를 대신하여, 압저항소자의 역할을 하는 전도성 탄소섬유를 유전영동법(Dielectrophoresis)을 이용하여 매우 빠르고, 저렴하며, 간편하게 원하는 위치에 정렬하였다. 제작된 압력센서를 이용하여, 인가압력에 따른 다이어프램의 변형, 탄소섬유의 저항 변화, 온도 의존성과 같은 특성을 측정, 분석하여, 새로운 압력센서로서의 가능성을 살펴보았다.

2. 압력센서 제작

2.1 탄소섬유의 특성

탄소섬유는 복합재료 생산에 가장 많이 이용되는 강화섬유이며, 탄소의 육각 고리가 연이어 층상격자를 형성하고 있는 구조이다. 금속 광택이 있고, 흑색이나 회색을 띠며, 금속(알루미늄)보다 가벼운 반면, 금속(철)에 비해 탄성과 강도가 뛰어나다. 다핵 방향족으로 구성된 탄소섬유는 탄소 원자 사이에 sp^2 혼

성궤도에 의한 결합을 하고 있고, p 궤도에 있는 전자가 쉽게 이동할 수 있기 때문에 전기전도도가 우수하다. 특히, 압저항소자처럼 외부 응력에 따라 저항 변화가 나타나는 압저항효과(Piezoresistive Effect)가 나타나고 전기전도성이 우수하기 때문에 응력 센서로써도 이용되고 있다.⁽⁸⁾ 본 연구에서 사용한 탄소섬유는 1,000 °C의 열처리를 통해 얻은 피치계 탄소섬유이며, 전도성이고 $5.2 \times 10^3 \sim 6.8 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 범위의 비저항값을 갖는다.

2.2 압력센서의 제작

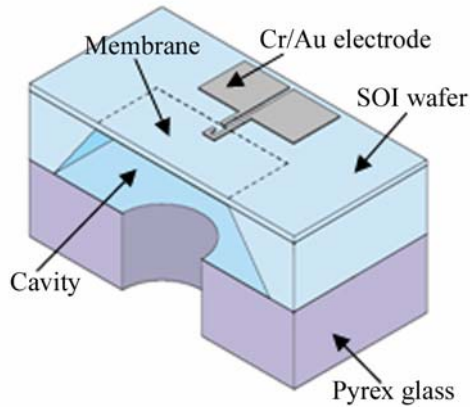
현재 상용화된 실리콘 압저항 압력센서를 제작하기 위해서는 보통 4 ~ 5 장 정도의 마스크가 필요하며, 제작 공정이 비교적 복잡하다. 일반적인 실리콘 압저항 압력센서의 다이어프램은 대개 습식식각에 사용되는 KOH나 TMAH(Tetramethyl Ammonium Hydroxide)와 같은 이방성 식각 용액에 의한 벌크 마이크로머시닝 기술을 기반으로 제작된다. 압력센서의 다이어프램을 습식식각으로 제작하려면, 식각 용액에 대한 실리콘 식각비를 계산하고 정확한 제어를 통해 제작하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 복잡한 공정을 단순화하기 위하여, SOI 웨이퍼를 사용하였다. SOI 웨이퍼는 반도체 소자간의 전기적 격리를 더욱 강화시키기 위해서, 실리콘과 실리콘 사이에 일정 두께의 산화층을 만들어 놓은 웨이퍼이다. 이 웨이퍼를 사용하면, 산화막층은 식각 용액에 반응을 하지 않으면서 식각이 정지되므로, 간단하게 다이어프램 두께를 정확히 제작할 수 있다. 즉, SOI 웨이퍼의 중간 산화막층 위의 실리콘 두께가 다이어프램의 두께가 된다.

또한, 불순물확산공정인 이온주입법에 의해 형성되는 저항소자를 사용하는 대신에, 압저항소자의 역할을 하는 전도성 탄소섬유를 이용함으로써, 필요한 마스크 수를 2 장으로 줄여 제작 공정을 크게 단순화하였다. 사용된 마스크는 다이어프램 위의 전극형성용 마스크와 습식식각으로 형성되는 다이어프램 제작을 위한 식각용 마스크이다.

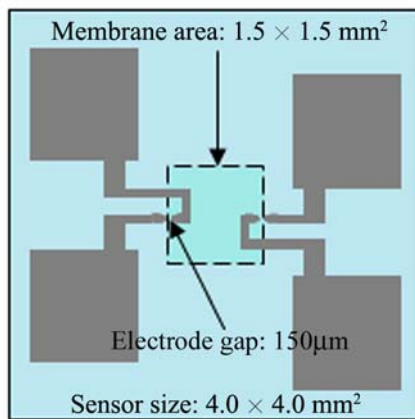
탄소섬유가 정렬되게 되는 전극 위치와 형상을 결정할 때, 다이어프램의 변형에 따른 탄소섬유의 저항 변화를 가장 많이 얻기 위해서는, 응력이 가장 크게 걸리는 부분, 즉 변형률이 가장 큰 위치를 파악하여야 한다. 이를 위하여, 일정 압력을 다이어프램에 인가하였을 때, 다이어프램의 응력 분포와 변형률에 대해 상용 ANSYS 프로그램을 이용하여 수치해석하였다. 해석 결과 다이어프램 가장자리의 중앙 위치 주변에서 변형률이 가장 크게 나타

Table 1 Specifications of fabricated pressure sensors

Contents	Specifications
Sensor size	$4.0 \times 4.0 \text{ mm}^2$
Diaphragm thickness	3, 21 μm
Diaphragm size	$1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$
Electrode gap	150 μm
Electrode thickness	0.1 μm



(a)

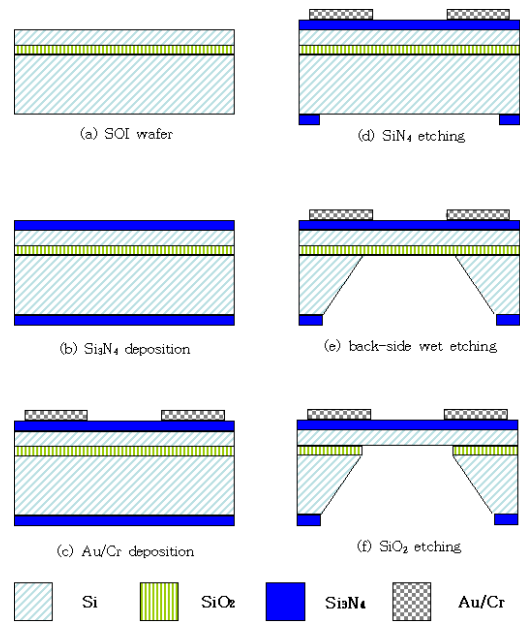


(b)

Fig. 1 Schematics of a pressure sensor; (a) cross section view (b) top view

나는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로, 탄소섬유를 가장자리의 중앙 위치에서 가장자리와 수직 방향으로 정렬되도록 전극 위치를 결정하였으며, 전극 간격은 사용하는 탄소섬유의 평균 길이인 150 μm 로 하였다.

Table 1은 제작된 압력센서의 사양이며, Fig. 1은 제작된 압력센서를 간략하게 나타낸 것이다. 인가 압력의 범위를 고려하여 다이어프램 두께는 3, 21 μm 인 두 종류의 압력센서를 제작하였다. 압력센서의 제작 공정은 Fig. 2에 나타내었다. 웨이퍼는 525 μm 두께의 4인치 SOI 웨이퍼이고, 유전층인

**Fig. 2** Fabrication process for 3 μm diaphragm thickness

산화막 두께는 1 μm , 산화막 위 실리콘 두께는 3 μm 이다[Fig. 2(a)]. 이 웨이퍼 양면에 저압화학기상증착법(LPCVD, Low Pressure Chemical Vapor Deposition)을 이용하여 두께 250 nm의 저응력 질화막(Si_3N_4)을 증착하였다[Fig. 2(b)].

다이어프램 위의 전극을 형성하기 위해, 웨이퍼 앞면에 음성감광액(AZ 5124)을 코팅하고, 전극 형성용 마스크를 이용하여 노광하였다. 다음, 전자선 증착기(Electron Beam Evaporator)를 이용하여 Au/Cr(1500 Å/300 Å)를 증착하고, 기생층 제거 공정(Lift-off)에 의해 Au/Cr 금속 전극을 형성하였다[Fig. 2(c)]. 습식식각으로 센서의 캐비티를 만들기 위해, 웨이퍼 뒷면에 감광액을 코팅하여 식각용 마스크를 이용해 노광하고, 건식식각 장비인 RIE(Reactive Ion Etching)로 질화막을 부분적으로 식각하여 패터를 형성하였다[Fig. 2(d)]. 다음으로 웨이퍼 뒷면에 캐비티를 만들기 위해, 실리콘 습식식각 용액인 TMAH(22 w%, 83 $^{\circ}\text{C}$)를 이용하여 웨이퍼 유전층의 산화막이 드러날 때까지 습식식각하였다[Fig. 2(e)]. 식각 용액에 산화막은 반응하지 않고 산화막 아래의 실리콘만 식각되므로, 산화막이 드러나면 식각이 멈춘다. 습식식각 시 웨이퍼 앞면의 금속층을 식각 용액으로부터 보호하기 위해, 테플론으로 제작한 홀더를 사용하여, 웨이퍼 뒷면만이 식각되도록 하였다. 드러난 1 μm 두께의 산화막층은 불산(BHF) 용액으로 제거하였다[Fig. 2(f)].

2.3 탄소섬유 정렬 및 부착 방법

SOI 웨이퍼를 이용해 제작된 압력센서의 다이어프램 위에 형성된 두 전극 사이에 탄소섬유를 정렬하는 방법으로, 매우 빠르고 저렴하며, 간단하게 상온에서도 탄소섬유의 정렬과 부착이 가능한 유전영동법(Dielectrophoresis)을 이용하였다.⁽⁸⁾ 유전영동에 관한 이론이나 실험은 이미 여러 논문들에서 보고가 되었으며, 탄소나노튜브를 정렬하는 방법으로도 많이 이용되고 있다.^(10,11)

Figure 3은 유전영동법을 이용하여 탄소섬유를 정렬하는 방법을 나타내고 있다. 양 전극에 교류나 직류 전압을 가하면, 균일하지 않은 전기장에서 발생하는 유전영동에 의한 힘이 입자에 작용하여, 입자가 전극으로 끌려와 정렬되면서 금속 전극 끝부분에 부착되게 된다. 유전영동에 의해 발생하는 힘은 다음과 같이 표현된다.^(10,11)

$$F = 2\pi a^3 \epsilon_m \text{Re} \left[\frac{\epsilon_p - \epsilon_m}{\epsilon_p - 2\epsilon_m} \right] \nabla |E|^2 \quad (1)$$

여기서, a 는 입자의 크기를 나타내며, ϵ_m 은 매개물의 유전상수(Dielectric Constant), ϵ_p 는 입자의 유전 상수, 그리고 E 는 전기장을 나타낸다.

유전영동법의 준비과정으로, 탄소섬유를 아주 짧게 자른 후($L=150 \sim 250 \mu\text{m}$), 에탄올에 아주 적은 양을 희석한 뒤, 초음파기(Sonicator)를 이용하여 1~2시간 정도 분리작업을 하였다. 탄소섬유들이 적절하게 분리되었는지 여부는, 탄소섬유 용액의 미세량을 광학현미경을 이용하여 관찰하였으며, 탄소섬유가 개별적으로 잘 분리되었음을 확인하였다. 다음으로 두 전극 사이에 함수발생기를 이용하여 직류와 교류 전압을 가해준 후, 탄소섬유 용액 미세량을 두 전극 사이에 떨어뜨려, 1개의 탄소섬유가 전극 사이에 정렬되도록 하였다. 사용 전압은 직류는 5 V, 교류는 10 V, 주파수 5 MHz 이다. Figure 4는 두 금속 전극 사이에 1개의 탄소섬유($L=203 \mu\text{m}$, $D=7.22 \mu\text{m}$)가 정렬된 사진이다.

두 전극 사이에 정렬된 탄소섬유는 단순히 전극 위에 놓여진 상태이기 때문에 전극과의 접촉이 좋지 않다. 따라서 탄소섬유가 부착된 전극 위로 Au 금속을 증착하여, 전극 금속면과 탄소섬유의 접촉면에서 발생하는 접촉 저항을 크게 감소시켰다. Figure 4의 탄소섬유의 경우, Au 금속 증착 전 탄소섬유의 저항값이 2.567 k Ω 이었지만, 증착 후에는 0.492 k Ω 으로 약 6 배 정도 저항값이 감소되었고,

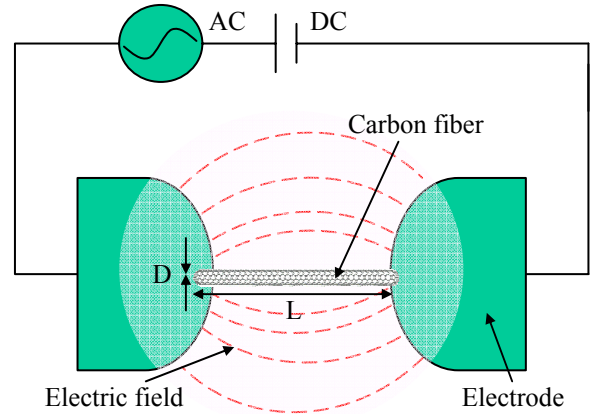


Fig. 3 Deposition of a carbon fiber between electrodes using dielectrophoresis

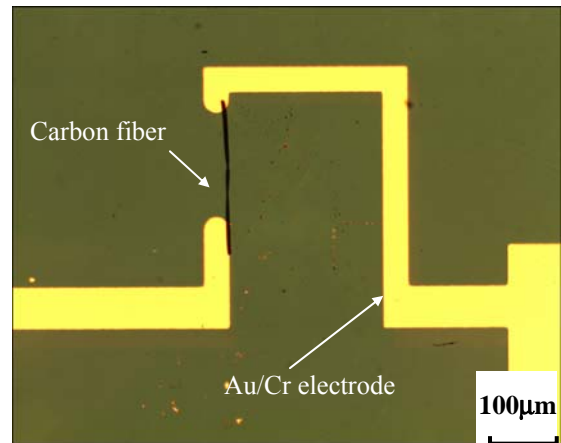


Fig. 4 A carbon fiber assembled on between electrodes

실험에 사용한 다른 탄소섬유의 경우도 하부전극과 탄소섬유간의 접촉 저항값 감소로 인해 평균 2~6 배 정도 감소하였다.

3. 실험 장치

실험 장치는 Fig. 5와 같이 센서의 캐비티에 압력을 공급하기 위한 시스템, 다이어프램의 변위를 측정하기 위한 레이저 변위계(Laser Vibrometer), 탄소섬유의 미세 저항 변화를 측정하는 시스템으로 구성되어 있다.

제작된 센서는 파이렉스 유리를 가공하여 양극 접합 방법(Anodic Bonding)을 이용하여 접합한 후, 접합부 주위를 에폭시 접합(Epoxy Bonding)하여, 압력 인가 시 기체의 누설을 방지하였다. 파이렉스 유리 위에는 압력센서의 신호를 검출하기 위해 소스미터와 연결된 회로기판을 접합하였고, 와이어 본더(Kulicke & Soffa Ltd., Model 4254)를 이용하여 회로기판과 압력센서의 전극 사이를 연결하였다. 질소 고압실린더와 압력센서의 캐비티 사이에

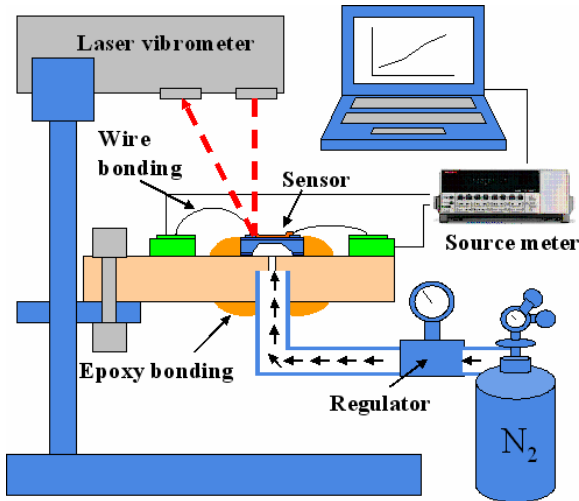


Fig. 5 Schematic diagram of measurement setup

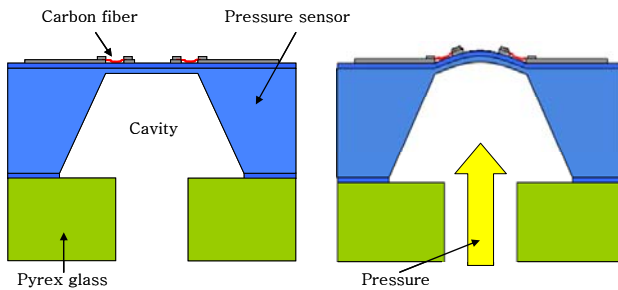


Fig. 6 Deflection of a carbon fiber on the diaphragm of pressure sensor

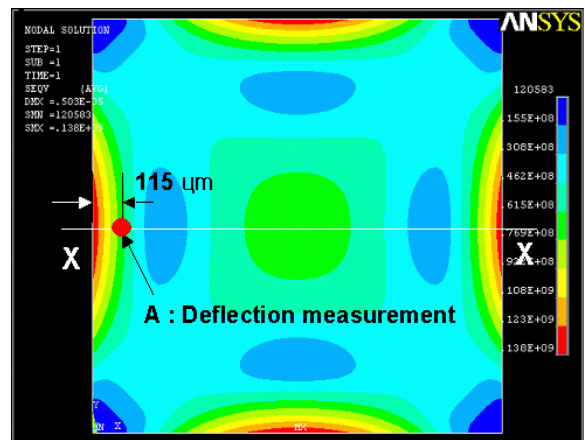
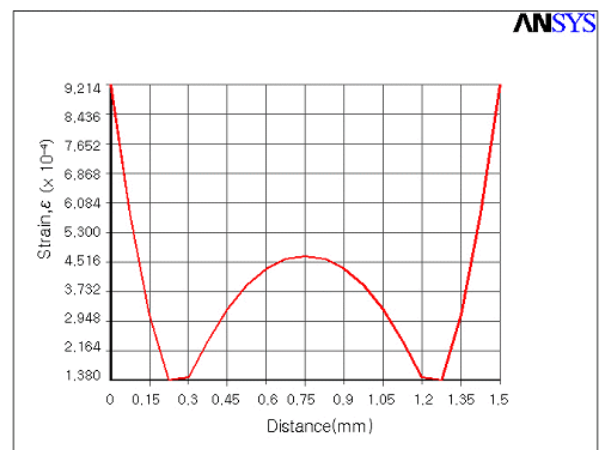
는 압력조절장치를 이용하여 압력을 미세하게 조절할 수 있도록 하였다. Figure 6은 인가 압력에 따른 다이어프램과 탄소섬유의 변형을 간략하게 나타낸 것이다.

압력센서의 다이어프램 변위를 측정하는 레이저 변위계는 10 nm의 분해능을 가지고 있어, 다이어프램의 아주 미세한 변위도 측정할 수 있으며, 진동에 의한 잡음 영향을 최대한 줄이기 위하여 방진테이블 위에서 측정하였다. 제작된 압력센서의 인가 압력에 따른 미세 저항변화 측정은 상온에서 수행하였으며, 소스미터(Keithely, Model 2400)를 사용하여, 일정 전류 모드로 1 mA를 인가하였고, 압력 인가에 따른 미세 저항변화를 측정하였다.

압력센서의 특성을 평가하기 위한 실험 조건 및 사용한 탄소섬유의 특성은 Table 2에 나타내었다. 다이어프램 두께가 21 μm 인 압력센서는 압력을 0 ~ 3 기압까지 변화시켰으며, 최고 5 기압까지 측정이 가능하였다. 반면에, 두께가 3 μm 인 압력센서는 1 기압 이상의 경우 다이어프램이 파열되어 0 ~ 1 기압까지만 압력을 변화시켰다.

Table 2 Experimental conditions and characteristics of carbon fibers

Case	Length (μm)	Diameter (μm)	Resistance at 22 $^{\circ}\text{C}$ (R_0 , k Ω)	Diaphragm thickness (μm)	Pressure range (bar)
A-1	250	13.42	1.9835	21	0 ~ 3
A-2	172	8.54	1.7122		
A-3	193	7.07	2.1123		
B	246	8.25	0.4927	3	0 ~ 1

Fig. 7 Simulation result of diaphragm stress at $t = 21 \mu\text{m}$ Fig. 8 Simulation result of diaphragm strain at $t = 21 \mu\text{m}$

4. 결과 및 고찰

4.1 다이어프램의 변위 해석 및 측정

압력센서의 설계시, 다이어프램의 변형에 따른 탄소섬유의 저항 변화를 가장 많이 얻기 위하여, 인가 압력에 따른 다이어프램의 응력 분포와 변형률을 수치해석하였다. 21 μm 두께 다이어프램에 1 기압의 일정 압력을 가했을 때, 다이어프램의 응

력 분포와 변형률을 Fig. 7과 8에 나타내었다.

응력이 큰 부분은 다이어프램 가장자리 중앙부터 중심 방향으로 140 μm 까지의 영역임을 알 수 있고, 3 μm 두께의 다이어프램의 해석 결과도 유사하였다.

Figure 8은 Fig. 7에 표시한 X-X 길이 단면에서의 변형률을 나타낸다. 응력을 크게 받는 부분의 변형률이 높음을 알 수 있으며, 이를 토대로 탄소 섬유를 가장자리의 중앙 위치에서 가장자리와 수직 방향으로 정렬되도록 전극 위치를 결정하였다.

Figure 9는 인가 압력에 따른 압력센서 다이어프램의 변위를 레이저 변위계를 이용하여 측정한 결과와 수치해석 결과를 비교하여 나타내었다. 변위 측정은 다이어프램의 가장자리 중앙부터 150 μm 전극 간격 사이의 110 ~ 120 μm 정도 지점에 레이저 변위계의 초점을 맞추어 측정하였다. 인가 압력에 따라 다이어프램의 변위는 선형적으로 증가하였으며, 실험측정값과 수치해석값이 유사하였다. 또한, 다이어프램의 두께에 따라 변위의 차이가 매우 큼을 확인할 수 있다. 두께가 21 μm 인 압력센서는 1 기압 당 0.5 μm 정도의 변위를 보인 반면, 3 μm 두께의 다이어프램은 0.1 기압 당 8 μm

정도의 변화하여 총 80 μm 정도의 변형이 나타나, 두께 21 μm 인 다이어프램보다 약 160 배 높은 변형을 나타냈다.

4.2 인가압력에 따른 저항 특성

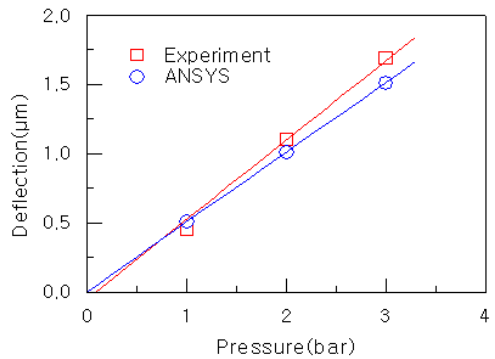
일반적인 압저항 압력센서의 감도, S (Sensitivity, $\Omega/\text{k}\Omega\cdot\text{bar}$)는 아래 식으로 구해진다.

$$S = \frac{\Delta V}{V} \times \frac{1}{\Delta p} = \frac{\Delta R}{R_0} \times \frac{1}{\Delta p} \quad (2)$$

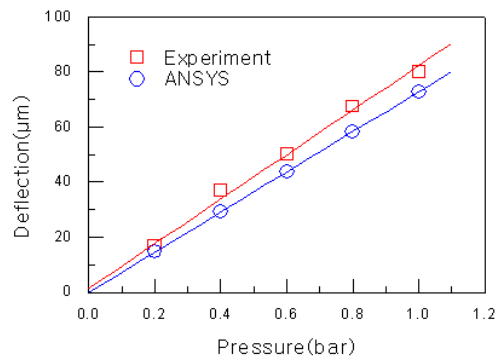
여기서, ΔV 는 전압차, ΔR 은 저항변화값($R - R_0$, Ω), R_0 는 초기저항값($\text{k}\Omega$), Δp 는 압력차(bar)이다.

Figure 10은 상온에서 인가 압력에 따른 탄소섬유의 저항변화($\Delta R/R_0$)를 측정한 결과이며, 일반적으로 인가 압력에 따라 탄소섬유의 저항변화가 선형적으로 나타남을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 탄소섬유를 압저항소자로 이용한 압력센서의 가능성을 확인시켜 주는 점이다.

두께 21 μm 다이어프램 압력센서의 감도는 A-1, A-2, A-3 각각의 경우, 0.31, 0.35, 0.25 $\Omega/\text{k}\Omega\cdot\text{bar}$ 이

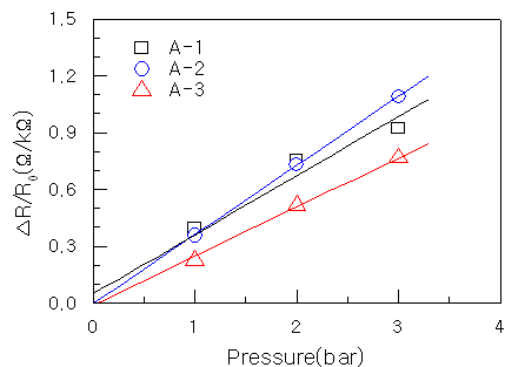


(a)

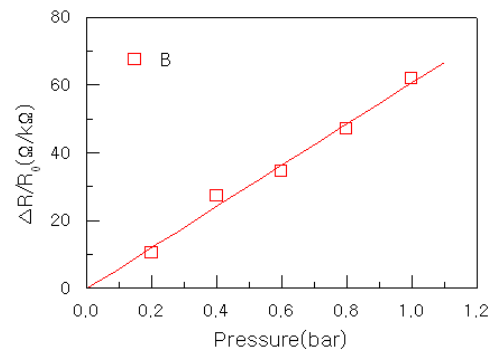


(b)

Fig. 9 Diaphragm deflection by applied pressure; (a) $t = 21 \mu\text{m}$, (b) $t = 3 \mu\text{m}$



(a)



(b)

Fig. 10 Change in resistance of a carbon fiber according to applied pressure; (a) $t = 21 \mu\text{m}$, (b) $t = 3 \mu\text{m}$

다. A-1의 경우, 선형적 저항변화 특성에서 약간 벗어나는 경향을 보이는데, 이는 탄소섬유가 두 전극 사이에 정확히 일렬로 정렬이 되지 않았거나, 약간의 뒤틀림을 갖고 있는 탄소섬유의 경우 등으로 예측된다. 두께 3 μm 다이어프램 압력센서의 감도는 61.8 $\Omega/\text{k}\Omega\cdot\text{bar}$ 로써, 두께가 21 μm 인 경우보다 약 200 배 높은 감도를 보였다. 이는, 같은 인가 압력일지라도 다이어프램 두께에 따라 탄소섬유의 저항변화가 달라져 감도에 차이를 가져오기 때문이다. 즉, 다이어프램의 변형 특성에서도 설명하였듯이, 다이어프램의 두께가 얇을수록 변형이 크게 일어나서 탄소섬유의 저항 변화가 커지기 때문에 압력센서의 감도는 높아진다. 하지만, 다이어프램은 인가 압력에 파열되지 않을 정도의 최소한의 두께는 있어야 한다.

압력센서의 감도는 제작되는 다이어프램의 크기와 두께, 압저항소자의 게이지 계수, 온도 조건 등에 따라 매우 다르기 때문에, 센서간의 정확한 비교는 다소 어렵지만, 본 연구에서 제작한 탄소섬유를 이용한 압력센서의 가장 높은 감도는 단결정 실리콘을 이용한 압저항 압력센서의 일반적인 감도인 30 $\text{mV}/\text{V}\cdot\text{bar}$ 보다 높거나 비슷한 수준임을 알 수 있다.

압력센서의 감도와 밀접한 관계가 있는 압저항소자의 게이지 계수, K 는 아래 식 (3)에서와 같이 외부 압력에 따른 압저항소자의 변형률, ϵ 에 대한 저항 변화율로 정의된다.

$$K = \frac{\Delta R}{R_0} \times \frac{1}{\epsilon} \quad (3)$$

게이지 계수값이 크다는 것은 압저항소자의 감도가 우수함을 나타내며, 단결정 실리콘 압저항소자의 게이지 계수는 대략 100 정도이다.

식 (3)을 이용하여 탄소섬유의 게이지 계수를 계산하려면, 외부 응력에 의한 탄소섬유의 저항변화와 변형률을 알아야 한다. 하지만, 탄소섬유의 변형률은 탄소섬유의 작은 크기로 인해 정확한 값을 측정하기가 어렵다. 따라서, 탄소섬유가 다이어프램과 완벽하게 밀착되어 있다고 가정하여, 탄소섬유의 변형률 대신 다이어프램의 변형률을 사용하면, 약 50 정도의 게이지 계수값이 나온다.

실제 실험에서는 탄소섬유가 다이어프램과 완전히 밀착되어 있다고 보기가 어렵고, 금속 전극 사이에 탄소섬유의 끝단이 고정되어 있고 가운데 부분만이 다이어프램과 접촉했을 가능성이 높다.

만일, 탄소섬유가 다이어프램과 완벽하게 밀착되어 있다면, 탄소섬유의 변형이 훨씬 크게 일어나고, 그에 따른 저항변화도 많이 일어나서, 50 보다는 높은 게이지 계수값이 구해질 것으로 예측된다.

4.3 온도 특성

Figure 11은 탄소섬유를 이용한 압력센서를 상온에서 250 $^{\circ}\text{C}$ 까지 온도 변화를 주었을 때, 온도 변화에 따른 탄소섬유의 저항변화 특성을 나타낸 것이다. 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서의 저항값은 상온에서의 저항값보다 약 8.5 % 감소하였다. 이를 바탕으로 하여 상온 ~ 250 $^{\circ}\text{C}$ 사이의 온도 범위에서 탄소섬유를 이용한 압력센서의 온도 의존성은 0.0375 $\%/^{\circ}\text{C}$ 의 감도 오차가 존재함을 알 수 있다. 일반적인 실리콘 압저항 압력센서는 -40 ~ 120 $^{\circ}\text{C}$ 온도 범위에서 온도 의존성에 의한 감도 오차가 0.1 $\%/^{\circ}\text{C}$ 이하이므로,^(12,13) 탄소섬유를 이용한 압력센서의 온도 특성이 기존의 실리콘 압저항 압력센서와 비슷하거나 작음을 알 수 있다. 또한, 일반 실리콘 웨이퍼를 이용하여 제작한 실리콘 압저항 압력센서는 p-n 접합 특성상 150 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 고온에서는 p-n 접합을 통한 누설 전류가 급격히 증가하여 사용이 불가능해진다.⁽¹⁴⁾ 하지만 본 연구에서 제안한 탄소섬유를 이용한 압력센서는 압저항소자인 탄소섬유와 압력센서의 다이어프램 사이에 저응력 질화막의 증착이 가능하다. 이 박막은 센서부에서 실리콘기판으로 흘러가는 누설전류를 막는 절연체 역할을 하기 때문에, 고온에 따른 탄소섬유와 웨이퍼 사이의 접합 누설은 발생하지 않는다고 볼 수 있다.

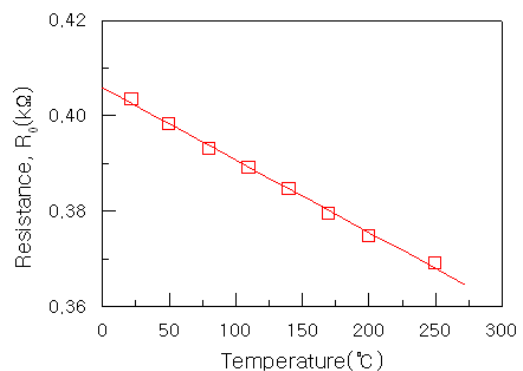


Fig. 11 Effect of temperature on the resistance of a carbon fiber.

5. 결 론

본 연구에서는 복합재료 생산에 많이 이용되는 탄소섬유를 압저항소자로 이용한 새로운 개념의 압력센서를 제작하고, 그 특성을 분석하였다. 전체적인 압력센서 구조와 원리는 마이크로머시닝 기술을 기반으로 제작되는 실리콘 압저항 압력센서와 유사하지만, SOI 웨이퍼와 탄소섬유를 압저항소자로 사용하고, 유전영동법을 이용하여 탄소섬유를 간단하고 빠르게 전극 사이에 정렬함으로써, 기존 실리콘 압저항 압력센서의 복잡한 제작 공정을 매우 단순화하였다. 제작된 압력센서를 이용하여, 인가압력에 따른 다이어프램의 변형, 탄소섬유의 저항 변화, 온도 의존성과 같은 특성을 측정, 분석하였다.

인가 압력에 따른 압력센서 다이어프램의 변위는 선형적으로 변화하였으며, 실험과 수치해석 결과가 유사하였다. 인가 압력에 따른 탄소섬유의 저항변화도 선형적으로 나타났으며, 두께 3, 21 μm 다이어프램 압력센서의 감도는 각각 61.8, 0.25 ~ 0.35 $\Omega/\text{k}\Omega\cdot\text{bar}$ 로 나타났다. 탄소섬유를 사용한 압력센서도 감도에 영향을 미치는 온도 의존성은 존재하였다.

본 연구에서 제안한 탄소섬유를 압저항소자로 이용하는 새로운 개념의 압력센서는, 간단한 제작 공정과, 기존 압력센서와 유사한 성능 특성으로 인하여, 소형, 경량 및 고성능의 압력센서로 이용 가능할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- (1) Sze, S. M., 1994, "Semiconductor Sensors," John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- (2) Carr, J. J., 1997, "Sensors and Circuits," Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA.
- (3) Obieta, I. and Gracia, F. J., 1994, "Sputtered Silicon Thin Film for Piezoresistive Pressure Microsensors," *Sensor & Actuators A*, Vol. 41, pp. 521~528.
- (4) Singh, R., Ngo, L. L., Seng, H. S. and Mok, F. N. C., 2002, "A Silicon Piezoresistive Pressure Sensor," *The 1st IEEE Int. Workshop on Electronic Design, Test and Applications (DELTA '02)*, p. 181.
- (5) Ishihara, T., Suzuki, K., Suwazono, S., Hirata, M. and Tanigawa, H., 1987, "CMOS Integrated Silicon Pressure Sensor," *J. Solid-state Circuit*, Vol. SC-22, pp. 151~156.
- (6) Kuzumaki, T. and Mitsuda, Y., 2004, "Dynamic Measurement of Electrical Conductivity of Carbon Nanotubes during Mechanical Deformation by Nanoprobe Manipulation in Transmission Electron Microscopy," *Applied Physics Letters*, Vol. 85, pp. 1250~1252.
- (7) Stampfer, C., Hebling, T., Oberfell, D., Schoberle, B., Tripp, M. K., Jungen, A., Roth, S., Bright, V. M. and Hierold, C., 2006, "Fabrication of Single-Walled Carbon-Nanotube-Based Pressure Sensors," *Nano Letters*, Vol. 6, No. 2, pp. 233~237.
- (8) Chen, P. W. and Chung, D. D. L., 1995, "Concrete as a New Strain/stress Sensor," *Carbon*, Vol. 27B, pp. 11~23.
- (9) Takahashi, T., Mureyama, T., Higuchi, A., Awano, H. and Yonetake, K., 2005, "Aligning Vapor-grown Carbon Fibers in Polydimethylsiloxane using DC Electric or Magnetic Field," *Carbon*, Vol. 44, pp. 1180~1188.
- (10) Chung, J. H. and Lee, J. H., 2003, "Nanoscale Gap Fabrication and Integration of Carbon Nanotubes by Micromachining," *Sensor & Actuators A*, Vol. 104, pp. 229~235.
- (11) Chung, J. H., Hoon, K. and Lee, J. H., 2004, "Toward Large-scale Integration of Carbon Nanotubes," *Langmuir*, Vol. 20, pp. 3011~3017.
- (12) Melvas, P., Kalvesten, E. and Stemme, G., 2002, "A Temperature Compensated Dual Beam Pressure Sensor," *Sensors and Actuators A*, Vol. 100, pp. 46~53.
- (13) Lee, B. N., Kim, K. N., Park, H. D. and Shin, S. M., 1999, "Calibration and Temperature Compensation of Silicon Pressure Sensors using Ion-implanted Trimming Resistors," *Sensors and Actuators A*, Vol. 72, pp. 148~152.
- (14) Lee, Y. T., Seo, H. D., Takano, R., Matsumoto, Y., Ishida, M. and Nakamura, T., 1995, "Design Consideration for Silicon Rectangular Diaphragm Pressure Sensor with Single-element Four-terminal Strain Gauge," *Sensors and Materials*, Vol. 7, pp. 53~63.