

## 탄소섬유의 게이지 계수 측정 및 센서 응용

김지관 · 박창신 · 이동원\*<sup>†</sup>

### Measurement of a gauge factor of a carbon fiber and its application to sensors

Ji-Kwan Kim, Chang-Sin Park, and Dong-Weon Lee\*<sup>†</sup>

#### Abstract

In this paper we report on the electrical properties of carbon fiber which is an attractive material for strain gauges and can also be applied to resonating micro sensors. The carbon fibers used in this research was manufactured from polyacrylonitrile (PAN). The fabricated carbon fibers had about 10  $\mu\text{m}$  in length and several centimeters in length. We employed a micro structure to measure electrical properties of the carbon fiber. The measured electrical resistivity of the carbon fibers were about  $3 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ . A gauge factor of the carbon fiber is also observed with the same system and it was about 400, depending on the structure of the carbon fiber. For the sensor applications of the carbon fiber, it is selectively placed between the gap of Al electrodes using a dielectrophoresis method. When the carbon fiber is resonated by a piezoelectric ceramic, resistance change at a variety of resonance mode was observed through an electrical system.

**Key Words :** carbon fiber, gauge factor, dielectrophoresis, resonating sensor

## 1. 서 론

압저항 효과(piezoresistive effect)는 반도체와 같은 물체에 응력을 부여하면 전기 저항이 변화하는 효과<sup>[1]</sup>로써, 높은 게이지 계수(gauge factor)를 갖는 재료에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다<sup>[2,3]</sup>. 통상적으로 반도체 재료인 실리콘이 이용되고, 그 종류에는 단결정 벌크 게이지, 기판 위에 실리콘을 박막화한 박막 스트레인 게이지, 확산형의 게이지 등이 있다<sup>[4,5]</sup>. 단결정 실리콘은 우수한 탄성특성 뿐만 아니라 90 정도의 큰 게이지 계수를 가지고 있어서 반도체 압력센서의 재료로 주로 이용되고 있다. 실리콘 기반의 압력센서들 가운데 확산공정을 통해 형성된 압저항을 이용하는 압력센서는 형성된 압저항에 가장 큰 응력이 작용하도록 설계가 된다. 그러나 이 압저항은 불순물 농도의 불균일성에 따른 저항 값의 불일치, 압저항 계수의 온도 의존성 및 실리콘 자체의 온도 의존성에 따른 오작동의

가능성이 있으며, 압저항 형성을 위해 1000 °C 부근의 고온공정을 요구한다. 이러한 단결정 실리콘의 문제점들을 고려하고 높은 게이지 계수 값을 갖는 새로운 재료 중 하나로써 우수한 물리, 화학, 전기와 기계적 성질을 갖고 있는 탄소섬유(carbon fiber)를 압저항 소자로 이용, MEMS 압력센서를 제작한 선행연구가 수행되어 탄소섬유도 압저항 소자로서의 가능성이 검증되었다<sup>[6]</sup>.

본 연구에서는 탄소섬유의 정확한 게이지 계수 값을 측정하기 위해 마이크로조작기와 마이크로머시닝 기술로 제작한 소자를 이용하였으며, 측정된 탄소섬유의 압저항 게이지 계수 값을 이용한 다양한 센서 응용의 한 예로 공진형 마이크로 센서를 설계 및 제작하고, 그 특성을 평가하였다.

## 2. 탄소섬유

탄소섬유는 재료와 제조방법에 따라 셀룰로오스, 아크릴 섬유, 비닐론, pitch 계, PAN 계 등으로 나누어지며, 원료 또는 처리 온도에 따라 분자배열과 결정의 변화가 생긴다. 일반적으로 탄소의 육각 고리가 연이어 층상격자를 형성한 구조이며, 금속광택이 있고 흑색이

전남대학교 대학원 기계공학과(Graduate school of Mechanical Engineering, Chonnam National University)

\*전남대학교 기계시스템공학부(School of Mechanical Systems Engineering, Chonnam National University)

<sup>†</sup>Corresponding author: mems@chonnam.ac.kr

(Received : December 31, 2007, Accepted : February 5, 2008)

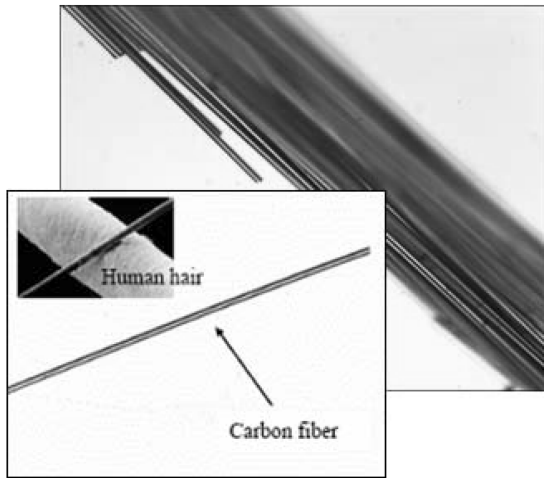


그림 1. 탄소섬유의 사진  
Fig. 1. Optical images of carbon fibers

나 회색을 띤다. 본 연구에 사용된 탄소섬유는 선행 연구에 사용되었던 pitch계의 탄소섬유<sup>[6]</sup>가 아닌 PAN계의 탄소섬유로써, 선행 연구에 사용한 탄소섬유에 비해 전기 전도도가 우수하고 직선으로 곧은 형태를 보이는 게 특징이다. 또한 길이는 수 cm이며, 평균 직경은 약  $10\ \mu\text{m}$ 이고  $1.5\sim 3.0\times 10^{-3}\ \Omega\cdot\text{cm}$ 의 비저항( $\rho$ ) 값을 갖는다. 그림 1은 사용한 탄소섬유 다발과 한 가닥의 사진을 나타낸다.

### 3. 실험방법 및 측정

그림 2는 탄소섬유의 게이지 계수를 측정하기 위해 마이크로 조작기와 마이크로머시닝 공정을 이용하여 제작한 구조물을 간략히 나타내었다. 실리콘 웨이퍼에 절연층으로써 산화막( $\text{SiO}_2$ )을 증착하고, 탄소섬유가 놓이게 될 전극 부분은 사진식각공정과 마스크를 이용하여 Al 전극을 형성하였다. 길이가 긴 탄소섬유 다발은 광학현미경으로 관찰하며 적당한 크기로 잘라 에탄올 용액 속에 넣고 초음파기를 이용하여 5분간 분리작업을 하였다. 잘려진 탄소섬유는 마이크로 트위저를 이용, 탄소섬유 한 가닥을 집어 전극 위에 탄소섬유를 정렬하였다. 이렇게 전극 위에 올려진 탄소섬유는 단순히 전극에 놓여진 상태이기 때문에 접촉면에 발생하는 저항이 문제가 된다. 따라서 금속면과 탄소섬유의 접촉면에서 발생하는 접촉저항을 고려하여, 접촉면에 선택적으로 Al 금속을 다시 증착하므로 접촉면에서 발생하는 저항을 감소시켰다. 제작한 구조물은 마이크로 조작기와 함께 위치를 고정하고, 마이크로 조작기와 구조물의

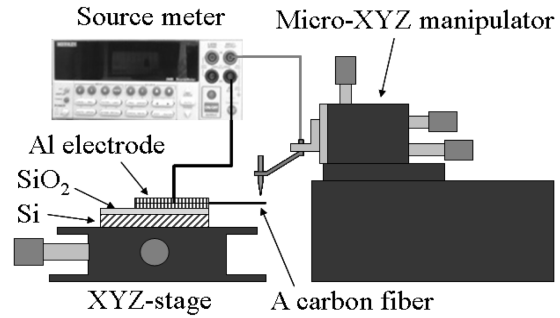


그림 2. 탄소섬유의 게이지 계수 측정 장치도  
Fig. 2. An experimental setup to measure a gauge factor of the carbon fibers

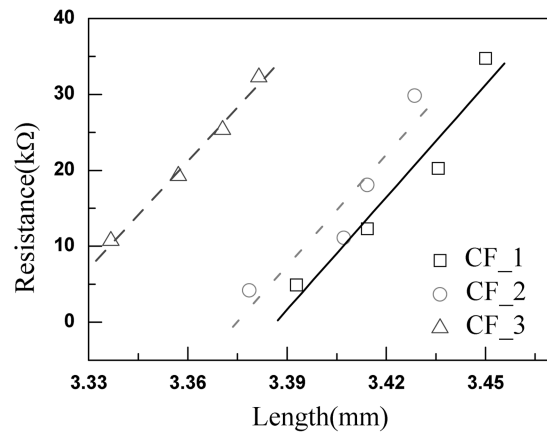


그림 3. 탄소섬유의 길이 변화에 따른 저항 변화  
Fig. 3. Resistance change with respect to length change of carbon fibers

전극과는 소스미터(source meter: Keithley, model 2400)를 이용하여 탄소섬유의 저항변화를 측정할 수 있게 하였다. 탄소섬유의 저항변화 측정은 CCD 카메라를 통한 모니터 화면을 관측하면서 마이크로 조작기를 이용, 조금씩 탄소섬유에 변형을 유도하여 탄소섬유의 길이변화에 따른 탄소섬유의 저항 변화를 측정하였다.

그림 3은 탄소섬유 한 가닥의 길이 변화에 따라 측

표 1. 탄소섬유의 치수 및 저항 값  
Table 1. Dimensions and Electrical Resistances of Carbon Fibers

Case	Length (mm)	Diameter ( $\mu\text{m}$ )	Initial resistance ( $\text{k}\Omega$ )
CF_1	3.450	10.124	34.724
CF_2	3.428	10.650	29.825
CF_3	3.381	9.871	32.264

정한 저항변화들을 나타내며, 표 1은 사용한 탄소섬유의 길이와 측정된 초기저항 값들을 나타낸다. 측정 실험은 다양한 길이의 탄소섬유를 각각 측정하여 데이터를 산출하였으며, 길이변화에 따른 탄소섬유의 저항변화 값을 측정하여 탄소섬유의 게이지 계수 값을 아래와 같은 간단한 식을 이용하여 계산하였다.

$$K = \frac{\Delta R}{R} \times \varepsilon = \frac{\Delta R}{R} \times \frac{L}{\Delta L}$$

여기서, R은 탄소섬유 초기 저항,  $\Delta R$ 은 길이변화에 따른 탄소섬유의 저항 변화,  $\varepsilon$ 은 탄소섬유의 스트레인, L은 탄소섬유의 초기길이 이며,  $\Delta L$ 은 길이변화량을 의미한다.

탄소섬유의 미소 길이변화에 따른 저항 값의 변화를 측정하여 게이지 계수 값을 계산하였으며, 약 400 정도의 높은 값이 산출되었다. 이는 고온공정을 요구로 하는 단결정 실리콘과 비교하면, 약 5배 정도 우수한 게이지 상수를 가지므로, 탄소섬유를 센서 소자로써 사용한다면 압력센서의 응용<sup>[6]</sup> 이외에도 무한한 가능성이 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 탄소섬유를 이용한 공진형 마이크로 센서 제작 및 특성평가

탄소섬유를 이용한 공진형 마이크로 센서의 원리는 간단하다. 마이크로 센서의 두 전극 사이에 탄소섬유를 정렬하고 탄소섬유와 센서의 기판 사이에 공기층(air-gap) 구조를 주어 탄소섬유가 전극 사이에 매달린 구조를 이용, 외부진동에 의한 특정주파수의 진동을 측정하는 원리이다. 공기층 구조를 갖는 공진형 마이크로 센서의 구조는 그림 4와 같다. 공진형 마이크로 센서는 직사각형의 간단한 모양으로 설계 되었으며, 길이와 폭

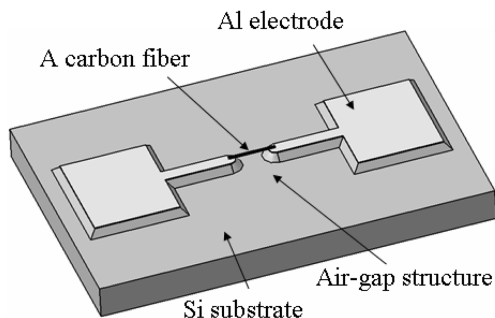


그림 4. 탄소섬유를 이용한 공진형 마이크로 센서 개략도  
Fig. 4. A schematic diagram of a resonating micro sensor based on the carbon fiber.

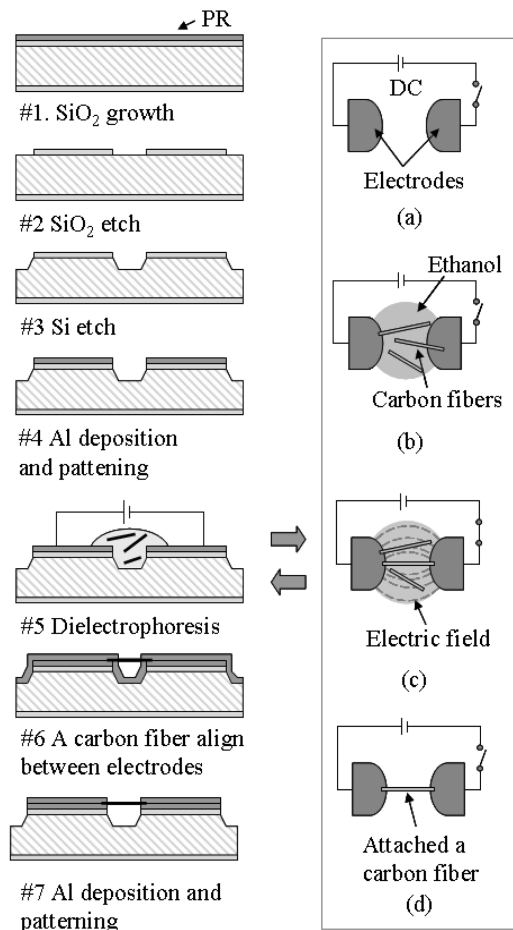


그림 5. 공진형 마이크로 센서 제작 공정도

Fig. 5. Process flow for resonating micro sensor fabrication.

을 일정하게 유지하였고, 마이크로 센서 위의 전극 넓이와 간격을 다양한 크기로 설계 및 제작하였다.

공진형 마이크로 센서의 제작 공정은 그림 5에 나타내었으며, 0.525  $\mu\text{m}$  두께의 실리콘 웨이퍼 기판 양면에 산화로(furnace)를 이용, 절연층으로써 산화막을 증착한 후(#1), 탄소섬유가 놓이게 될 전극 사이에 탄소섬유와 기판과의 공기층 구조를 만드는 것으로 시작한다. 공기층 구조는 전극용 마스크와 사진공정을 이용하여 산화막을 패터닝한 후(#2), 습식식각 용액인 TMAH (Tetramethylammonium hydroxide)를 사용, 20  $\mu\text{m}$  깊이로 실리콘 웨이퍼의 앞면을 식각하여 형성하였다(#3). 다음으로 식각이 되지 않은 부분에 물리 증착공정으로 이용되는 sputter 장비를 이용하여 Al 전극을 형성하였다(#4). 이렇게 제작된 마이크로 센서의 전극 사이에는 함수 발생기(function generator)를 이용하

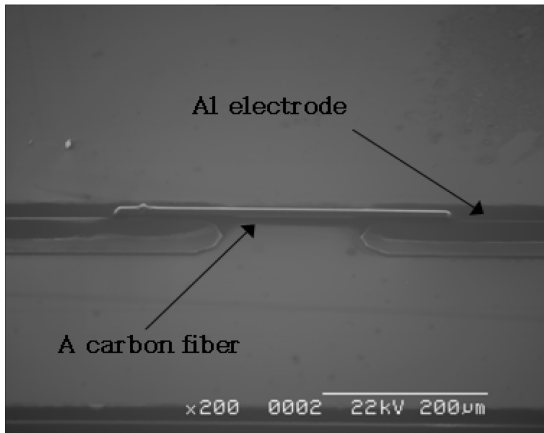


그림 6. 제작된 공진형 마이크로 센서의 전자현미경 사진  
Fig. 6. A scanning electron microscope image of the fabricated resonating micro sensor.

여 10 MHz와 DC 5 V의 분위기에서 전기영동법(dielectrophoresis)<sup>[7]</sup>으로 전도성의 탄소섬유를 정렬하였다(#5). 전극 사이에 정렬된 탄소섬유는 단순히 전극 사이에 놓인 상태이기 때문에 전극과의 접촉이 좋지 않다. 따라서 전극과 탄소섬유의 접촉면에서 발생하는 이러한 접촉 저항을 고려, 사진공정으로(#6) Al 전극 위에 다시 Al 전극을 증착하여(#7) 전극이 겹치는 구조로 제작하였으며, 접촉면에 대한 저항을 크게 낮추었다. 그림 6은 150  $\mu\text{m}$  전극 간격을 갖는 제작된 마이크로 센서 사이에 탄소섬유( $L=280\ \mu\text{m}$ ,  $D=10\ \mu\text{m}$ )를 정렬한 주사형 전자현미경사진이며, 측정된 탄소섬유의 초기저항은  $96.95\ \Omega$ 으로써, 사용한 탄소섬유의 비저항 값의 범위( $1.5\sim 3.0\times 10^{-3}\ \Omega\cdot\text{cm}$ )와 일치함을 알 수 있었다.

공진형 마이크로 센서에 정렬된 탄소섬유의 공진 특성을 해석하기 위해 유한요소 해석 프로그램(ANSYS)을 이용하였으며, 그 결과는 그림 7에 나타내었다. 해석 결과에 따르면 280  $\mu\text{m}$  길이와 10  $\mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 탄소섬유는 0.28 MHz에서 1차 공진 특성이 나타났

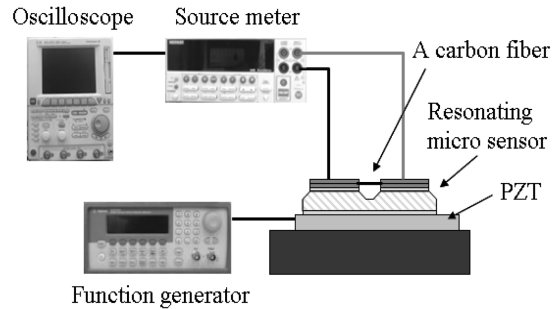


그림 8. 실험측정 장치 개략도  
Fig. 8. An experimental setup for the resonating micro sensor.

으며, 0.79 MHz와 1.45 MHz에서는 각각 3차와 5차 모드의 공진 특성을 가짐을 알 수 있었다.

공진형 마이크로 센서의 특성평가를 위한 실험장치 구성 및 측정방법은 그림 8과 같다. 공진형 마이크로 센서에 이용된 탄소섬유는 일정 주파수에서 진동시키기 위하여 초소형 압전세라믹(PZT)을 마이크로 센서와 접합하였고, 함수발생기를 이용하여 압전세라믹을 탄소섬유의 공진 주파수 부근에서 가전하였다. 압전세라믹의 가전에 의한 탄소섬유의 진동 특성 및 저항변화는 소스미터와 오실로스코프를 이용하여 측정하였다. 그림 9는 압전세라믹을 1차(0.28 MHz)와 3차(0.79 MHz) 그리고 5차 공진모드(1.45 MHz)로 가진하였을 때, 오실로스코프를 통하여 측정된 탄소섬유의 전압파형을 나타낸다. 0.28 MHz(탄소섬유의 1차 공진주파수)로 압전세라믹을 가진하였을 때, 41.67 mVp-p의 전압변화 값이 측정되었으며, 이때 탄소섬유의 저항변화는 약 0.41  $\Omega$ 이었다. 또한 0.79 MHz(3차 모드 공진주파수)와 1.45 MHz(5차 모드 공진주파수)로 각각 압전세라믹을 가진하였을 때는 104.16 mVp-p와 187.50 mVp-p의 전압변화 파형이 측정되었으며, 이는 각각 10.4  $\Omega$ 과 18.7  $\Omega$ 의 탄소섬유 저항변화 값에 대응된다. 압전세라믹을 1.45 MHz, 즉 5차 이상의 고차모드에서 가진하였

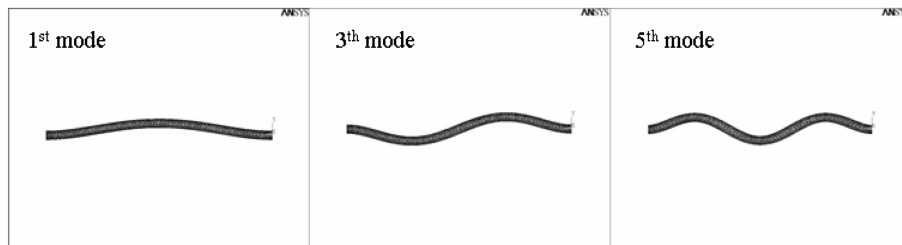


그림 7. 탄소섬유의 공진모드 해석 결과  
Fig. 7. Simulation results of the carbon fiber oscillating at various resonance modes.

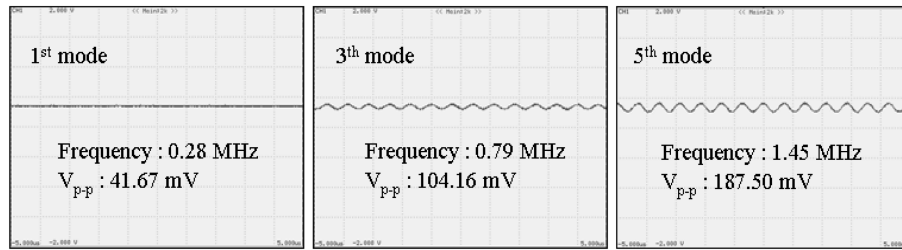


그림 9. 다양한 공진 주파수에서 가진된 공진형 마이크로 센서의 진동 특성

Fig. 9. Oscillation characteristics of the resonating micro sensor driven at various frequencies.

을 때 탄소섬유의 전압변화 파형이 다시 낮아짐을 확인하였으며, 이는 제작된 공진형 마이크로 센서의 경우 5차 공진모드인 1.45 MHz에서 가장 높은 감도를 가짐을 의미한다. 더불어, 본 연구에서 계산한 탄소섬유의 게이지 상수를 이용하여 5차 공진모드일 때의 탄소섬유 미소길이 변화를 계산한 결과, 전체 길이의 약 0.05 %의 길이변화가 발생하였음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 PAN계 전도성 탄소섬유를 이용, 길이변화에 따른 탄소섬유의 저항 변화를 측정하여 탄소섬유의 게이지 상수 값을 계산하였으며, 그 결과 약 400 정도의 높은 게이지 상수 값을 얻을 수 있었다. 이러한 높은 탄소섬유의 게이지 상수 값을 이용하면 다양한 물리적 센서로의 응용이 가능할 것으로 기대된다. 특히 탄소섬유를 이용하여, 공진형 마이크로 센서를 제작하여 공진기의 측정 소자에 대한 가능성을 살펴보았으며, 특성평가 결과를 바탕으로 공진기 제작에 있어서 매우 중요한 기초 실험결과로 활용할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구의 일부는 2005년도 젊은과학자 연구활동 지원사업에 의해서 지원되었으며 이에 감사드립니다 (MOEHRD, Basic Research Promotion Fund) (KRF-2005-205-D00010).

## 참고 문헌

- [1] J. W. Dally, and W. F. Riley, *Handbook of experimental mechanics-chapter 2. Strain gauges*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, pp. 41-78, 1987.
- [2] S. Keil, "The thermal output of a strain gauge", *Reports in Applied Measurement*, vol. 4, no. 1, pp. 15-17, 1988.
- [3] V. V. Grishenko, V. M. Lubimsky, and A. A. Kharkov, "An influence of linear sizes of the polysilicon piezoresistor units sensitivity", *Electron Devices and Materials (EDM) 2000*, Siberian Russian Student Workshops on, pp. 141-148, 2000.
- [4] W. K. Schomburg, "The design of metal strain gauges on diaphragms", *J. Micromech. Microeng.* vol. 14, pp. 1101-1108, 2004.
- [5] Ö. Vallin, "High-temperature piezoresistive gauge fabricated on commercially available silicon-on-insulator wafers", *J. Micromech. Microeng.* vol. 10, pp. 196-199, 2000.
- [6] C. S. Park, B. S. Kang, and D. W. Lee, "Fabrication and characterization of a pressure sensor using a pitch-based carbon fiber", *Microelectronic Engineering*, vol. 84, pp. 1316-1319, 2007.
- [7] J. W. Song, J. H. Lee, E. S. Lee, and C. S. Han, "Pressure sensing of air flow using multi-walled carbon nanotubes", *J. Kor. Sensors Society*, vol. 16, no. 5, pp. 377-383, 2007.

**김 지 관**

- 2006년 2월 조선대학교 기계설계학과 졸업(공학사)
- 현재 전남대학교 대학원 기계공학과 석사과정
- 주요관심분야 : Micro Four-point probe

**박 창 신**

- 2004년 2월 남부대학교 기계공학과 졸업(공학사)
- 2006년 8월 전남대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사)
- 현재 전남대학교 대학원 기계공학과 박사과정
- 주요관심분야 : MEMS fabrication, 질량분석기가 집적화된 원자현미경 시스템

**이 동 원**

- 센서학회지 제14권 제 1호 p.1 참조