

## 초정밀 스프레이 방법을 이용한 단일벽 탄소나노튜브 pH센서 개발

권재홍 · 이경수\* · 이윤희\* · 주병권†

### Development of single walled-carbon nanotubes based pH sensor using ultra-precision spray method

Jae-Hong Kwon, Kyong-Soo Lee\*, Yun-Hi Lee\*, and Byeong-Kwon Ju†

#### Abstract

Recent studies demonstrated the ability of carbon nanotube (CNT) to promote electron transfer reactions of important compounds and to impart higher stability onto electrochemical sensors. CNT-based sensors measured by hydroxyl radical concentration or pH value suggest great promise for biosensors. This paper describes a new method for fabricating a very simple and inexpensive pH sensor composed of single walled-carbon nanotubes (SW-CNTs) using an ultra-precision spray. CNT-based sensor shows pH sensitivity in buffer solution at different pH range. Our experimental results show the sensor responses to pH buffer solution and the conductance of depends on the pH values. These results support application possibility of SW-CNTs based pH sensor for mass production.

**Key Words :** electrochemical sensor, pH sensor, single walled-carbon nanotube, ultra-precision spray

## 1. 서 론

탄소나노튜브(carbon nanotube)는 구조에 따라 반도체의 성질을 보이기도 하며, 여러 가지 뛰어난 특성을 갖고 있기 때문에 이를 응용하고자 하는 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다<sup>1,2</sup>. 탄소나노튜브는 직경이 수~수십 나노미터 수준이며 전기적 선택성, 뛰어난 전계방출, 높은 전기전도성, 우수한 기계적 강도, 고효율의 수소저장매체 등으로 인하여 각종 장치의 전자 방출원(electron emitter), VFD(vacuum fluorescent display), 백색광원, FED(field emission display), 탄소반도체, 이차전지 전극재, 수소저장 연료전지, 나노와이어(nano-wire), nano-capsules, nano-pipet, AFM/STM tip, 단전자 센서, 가스센서, 습도센서, 의·공학용 미세부품, 고기능 복합재료, 열방산재, 타이어, 전도성 코팅제 등에서 무한한 응용 가능성을 보여주고 있다<sup>3-13</sup>. 자연계에 존재하는 탄소는 비등방성이 크며, 단일벽(single-

wall), 이중벽(double-wall), 다중벽(multi-wall), 다발(ropes) 등의 다양한 구조가 있다. 또한, 감긴 형태에 따라 도체, 반도체의 성질을 띠며 직경에 따라 에너지 갭(energy gap)이 달라지고 준 일차원적인 구조(quasi-1Dimension)를 가지고 있어 양자효과(quantum effect)<sup>14</sup>를 나타낸다. 따라서 탄소나노튜브는 미시적 및 거시적인 측면에서 다양한 나노구조의 응용이 예상되는 신기능의 재료이다. 탄소나노튜브는  $sp^2$  결합의 원자구조로 이루어진 판상 흑연(graphite)을 둥글게 말아 놓은 형태를 가진다.  $sp^2$  결합 구조의 탄소 원자 사이에는 시그마결합( $\sigma$ -bonding)으로 연결되어있으며, 각각의 탄소 원자에 대해서는 파이결합( $\pi$ -bonding)으로 연결된  $p$  오비탈(orbital)에 전자가 있다<sup>15</sup>. 탄소원자의 파이결합( $\pi$ -bonding)은 흑연면과 마찬가지로 비편재화(delocalized)된 파이전자( $\pi$  electron)들을 가지고 있어서 전하의 수송이 가능하다. 이러한 전기 전도성은 구조에 따라서 탄소나노튜브의 특성을 결정짓는다. 탄소나노튜브의 전하 수송은 흑연에 비해 우수한데, 그 이유는 탄소 원자의  $p$  오비탈이 실린더 형태의 탄소나노튜브에서는 나노튜브의 바깥쪽에서 더욱 넓게 확장되기 때문이다. 이렇게 확장된  $p$  오비탈은 외부의 분자나 이온과 쉽게  $\pi$ - $\pi$  결합을 이룰 수 있으며 탄소나노튜브의 탄소 원자들

고려대학교 공과대학 전기·전자공학부 (School of Electrical Engineering, College of Engineering, Korea University)  
\*고려대학교 이과대학 물리학과 (College of Science, Department of Physics, Korea University)

†Corresponding author: bkju@korea.ac.kr  
(Received : November 16, 2005, Accepted : January 16, 2006)

은 모두 표면에 분포해 있고 직경이 작기 때문에 반응하는 면적도 상대적으로 크다. 이런 이유로 탄소나노튜브는 다른 물질보다도 매우 우수한 흡착력을 지니고 있다<sup>[15]</sup>.

최근 들어 탄소나노튜브를 이용한 pH센서의 연구가 매우 활발하게 진행되고 있다. 이는 화학 및 바이오 프로세서를 관찰하는데 있어서 중요한 지표로서 사용되며, 바이오 분자나 수많은 화학종에 대한 미세 pH 및 물질의 농도변화 통해서 화학적 특성 및 바이오 반응을 관찰 하는데 필수적으로 사용되기 때문이다. 이러한 pH 측정은 화학, 의학, 생명, 산업 그리고 환경 등의 여러 분야에 쓰이고 있다<sup>[16-19]</sup>.

그러나, 최근 연구되고 있는 단일벽 탄소나노튜브를 적용한 pH-FETs(pH-sensitive field-effect transistors)<sup>[20]</sup>은 감지물질의 선폭 및 길이가 각각 수 나노에서 수 마이크로인 single-semiconductor SW-CNT<sup>[21]</sup> 혹은 random networks of SW-CNTs<sup>[22]</sup>을 사용하기 때문에 제작공정의 균일성 및 이를 적용한 소자를 실제로 응용하는데 한계를 갖는다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 초정밀 스프레이 방법(ultra-precision spray)으로 단일벽 탄소나노튜브(single walled-carbon nanotubes, SW-CNTs)를 감지부로 적용하여 pH센서를 개발하였다. 이는 새로운 기술로써 아직까지 보고된바 없으며, 현재 활발히 연구가 되고 있는 탄소나노튜브 감지부 제작은 진공장비를 사용하는데 반하여 진공장비를 사용하지 않고도 실온에서 간단하게 공정시간을 줄여 저가 대량생산에 적합한 pH센서를 제작하였다. 또한, 제작된 pH센서의 전기적 특성을 분석하여 그 가능성을 검토하였다.

## 2. 탄소나노튜브 pH 센서 원리

탄소나노튜브 센서는 나노튜브 표면에 분자흡착에 의한 화학 반응결과 전기적 특성 변화를 유발하여 감지하고자 하는 물질의 정량적 분석이 가능하다.

그림 1은 전극사이에 형성된 탄소나노튜브 감지부에 OH<sup>-</sup>가 흡착 되었을 경우의 pH센서 반응 메커니즘을 나타내는 모식도이다. (10×0)Zigzag 구조(반도체성)의 탄소나노튜브에 OH<sup>-</sup>가 흡착되기 전과 후의 에너지 밴드 다이어그램을 각각 그림 1(b), (c)에 나타내었으며  $x$  축 wavevector( $k$ )에 대한 에너지 상태( $E_k$ )  $y$ 축으로 나타내었다. 그림 1(c)는 OH<sup>-</sup>가 탄소나노튜브에 흡착이 되었을 경우 그림 1(b)의 에너지 밴드갭보다 협소해지는 것을 보여주고 있다. OH<sup>-</sup>가 탄소나노튜브에 흡착되면 반도체성 탄소나노튜브의 양자상태밀도(density of state, DOS)를 증가시키어 페르미준위(Fermi level)와 밴드갭(band gap)이 현저히 감소된다. 이는 산소원자의  $p_x$  오비탈과 탄소원자의  $p$  오비탈 간의 결합작용으로 인한 반도체형 단일벽 탄소나노튜브에 있어서 축퇴준위(degenerate levels)들이 형성되어 나뉘지기 때문이다. OH 그룹은 홀 전자(unpaired electron)를 가지고 있어 탄소원자와 혼성화(hybridization)되며 억셉터 준위(acceptor level)를 형성하여 탄소나노튜브의 전도도를 증가시키게 된다<sup>[23]</sup>.

## 3. 실험

### 2.1. 재료 및 기기

본 실험에서는 사용한 pH 완충용액은 Tokyo Kasei

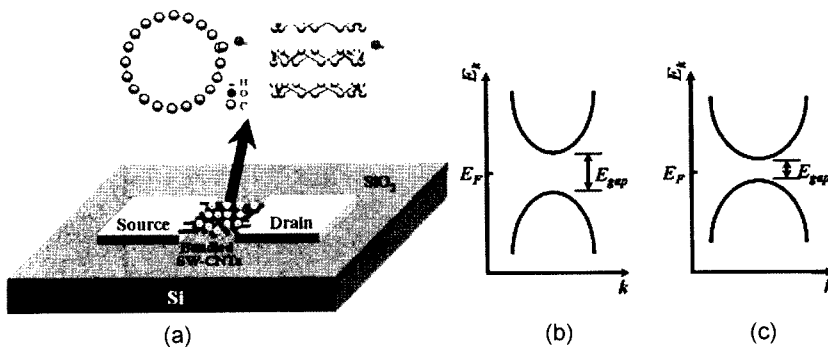


그림 1. SW-CNTs pH센서 반응원리: (a) 전극사이에 형성된 감지부에 OH<sup>-</sup>가 흡착 하였을 경우를 나타낸 모식도, (b) 반도체성 탄소나노튜브에 OH<sup>-</sup>가 흡착 전의 에너지 밴드 다이어그램, (c) 반도체성 탄소나노튜브에 OH<sup>-</sup>가 흡착 후의 에너지 밴드 다이어그램

Fig. 1. Schematic of mechanism for SW-CNTs pH sensor: (a) OH group is attached on the wall of the SW-CNT, (b) Energy-band diagram for zigzag (10×0) SW-CNT, (c) Energy-band diagram for SW-CNT+OH<sup>-</sup> system.

표 1. 화합물 조성에 따른 pH 완충용액  
Table 1. pH buffer solution of chemical compositions

Buffer solution	Chemical formula
pH 1	KCl-HCl
pH 3	KHC <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> -HCl
pH 4	KHC <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> -NaOH
pH 5	KHC <sub>8</sub> H <sub>4</sub> O <sub>4</sub> -NaOH
pH 7	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> -NaOH
pH 9	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> -KCl-NaOH
pH 10	NaHCO <sub>3</sub> -NaOH
pH 11	NaHCO <sub>3</sub> -NaOH
pH 13	NaOH-HCl

Kogyo Co., Ltd.에서 제작된 시약을 그대로 썼다. 표 1은 화학 조성에 따른 완충용액을 나타낸다.

제작된 센서의 전극사이의 감지물질질을 형성하기 위하여 아크 방전(Arc-discharge)으로 성장된 단일벽 탄소나노튜브 분말을 사용하였다. 단일벽 탄소나노튜브는 Iljin nanotech Co., Ltd.에서 판매하는 ASP-100F(평균직경: 1~1.2 nm, 길이: 5~20 μm, 순도: ~90%)을 썼다. 40 mg의 단일벽 탄소나노튜브 분말과 100 mL의 에탄올(ethanol)을 조성하여, DAIHAN Scientific Co., Ltd.의 초음파 세척장치를 이용하여 50 W, 45 kHz 강도의 초음파로 30분 동안 분산 처리하였다. 이러한 공정은 에탄올 용액 내에 탄소나노튜브를 균일하게 확산 되도록 한다.

전극사이의 감지물질질을 분산하기 위한 초정밀 스프레이(ultra-precision spray)는 LiPO Functional materials institute에서 특수 제작된 제품이다.

pH 완충용액에 따른 전기적 특성은 Keithley Instruments, Inc.의 4200 SCS 제품을 사용하여 측정을 하였다.

형성된 단일벽 탄소나노튜브를 관찰하기 위하여, Hitachi Ltd.에서 제작된 S-4300 unit의 전계방출 주사현미경(field emission-scanning electron microscope, FE-SEM)을 사용하였으며, 샘플의 정확한 표면형상을 위하여 Hitachi Ltd.에서 제작된 Hitachi E-1030의 ION sputter을 이용하여 백금(platinum)을 3~5 nm 코팅하여 관찰하였다.

2.2. 탄소나노튜브 pH 센서제작

본 연구에서는 SW-CNTs를 이용하여 pH센서를 제작 하였다. 그림 2은 pH센서 제작 공정 개략도이다.

(a) Si wafer에 황산과 과산화수소(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>=3:1)의 조성용액을 사용하여 wafer 표면의 유기물, 금속이온, 불순물 등을 제거하고 (b) Si 기판과 금속전극사이를 절연하기 위해 ULTECH Inc.의 HLF series인 thermal furnace로 SiO<sub>2</sub>을 300 Å 성장하였으며 (c) 감광액인 AZ 7220을 4000 rpm으로 스핀코팅 하여 95 °C에서 150 초 동안 굽기(baking)를 하였다. (d) Si 기판위에 도포된 감광액을 Karl Suss MA6, DOUBLE SIDE ALIGNER을 사용하여 사외선에 노광시켜 4 μm 전극간격의 패턴을 형상화 한 후, (e) 금속전극패턴을 형성하기 위해 ULVAC Technologies Inc.의 EBX-1000인 e-beam 증

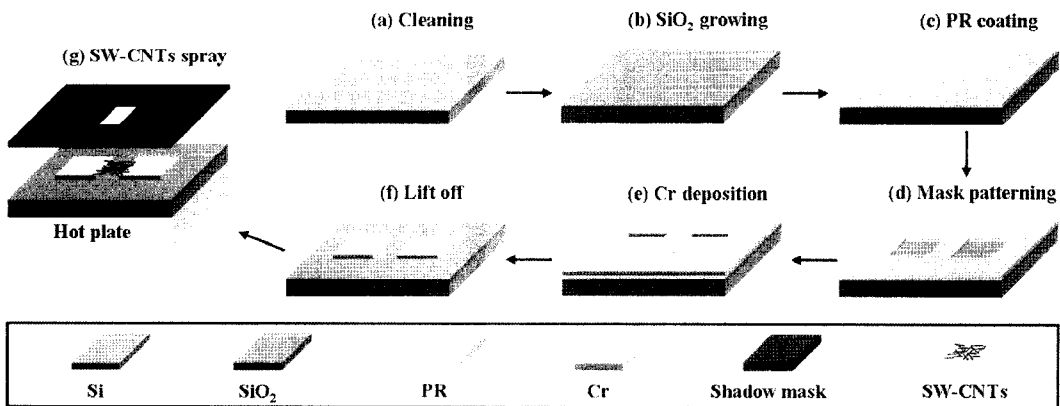


그림 2. SW-CNTs pH센서 공정 순서도: (a) cleaning, (b) 산화막 형성, (c) 스핀 코팅, (d) 전극패턴, (e) 크롬 증착, (f) 희생층 제거, (g) 웨도우 마스크 위에서 SW-CNTs 분산

Fig. 2. Fabrication process flow for bundled SW-CNTs based pH sensor: (a) cleaning, (b) thermal oxidation, (c) spin coating, (d) electrode patterning, (e) chromium deposition, (f) sacrificial layer leaving, (g) SW-CNTs dispersion on shadow mask.

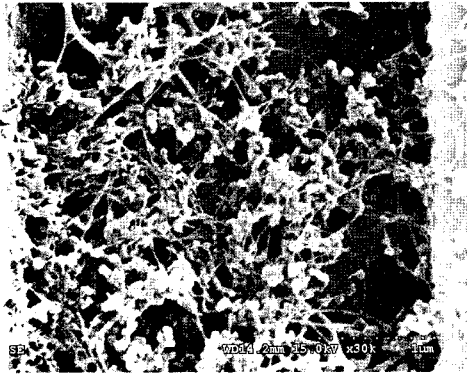


그림 3. 금속전극 패드 사이에 무작위로 분산된 SW-CNTs 감지부의 FE-SEM 사진

Fig. 3. FE-SEM image showing the random networks of SW-CNTs bridging two metal electrode pads.

착기를 사용하여 크롬(chromium)을 3000 Å으로 증착하였다. (f) AZ REMOVER 700로 감광액이 도포된 희생층(sacrificial layer)을 리프트 오프(lift off)로 제거하여 전극간의 간격이 4 μm인 전극 패드(pad)를 형성한다. (g) 전극패드 사이에 감지부가 되는 탄소나노튜브를 형성시키기 위해 섀도우 마스크(shadow mask)를 사용하여 노출된 부분에 초정밀 스프레이로 단일벽 탄소나노튜브를 분산하였다. 100 °C인 hotplate 위에 제작된 소자를 올려놓고 0.4 mg/mL의 탄소나노튜브 조성액을 분산시켰다. 전극 패드위에 형성된 탄소나노튜브 다발은 6~9 μm의 길이로 분산되었으며, 휘발성이 좋은 에탄올이 증발됨과 동시에 탄소나노튜브 다발이 형성 된다. 그림 3은 단일벽 탄소나노튜브 pH센서의 감지부를 나타낸 FE-SEM 사진이다.

#### 4. 탄소나노튜브 pH센서 측정 및 고찰

본 실험에서는 초정밀 스프레이로 SW-CNTs를 감지 물질을 형성하여 pH 완충용액에 따른 감응을 실온에서 측정하였다. pH 완충용액을 감지막 부분에 접촉시키기 위해서 Eppendorf Co.의 Eppendorf Research Pipettes인 micro-pipette을 사용하여 전극패드사이에 0.5 μl을 떨어뜨려 pH에 따른 감응특성을 측정하였다. 완충용액은 pH 1부터 11까지 측정하였다. 그림 3은 SW-CNTs 감지부 형상을 나타낸 FE-SEM 사진이다. 이 사진으로부터 알 수 있는 바와 같이 감지 부분인 SW-CNTs의 형상은 반데르발스 힘(Van der Waals force)<sup>[24]</sup>에 의해 무작위로 형성된 단일벽 탄소나노튜브로 이어져 있으며, 이는 감응 물질이 잘 흡착 될 수 있는 구조로 이루어

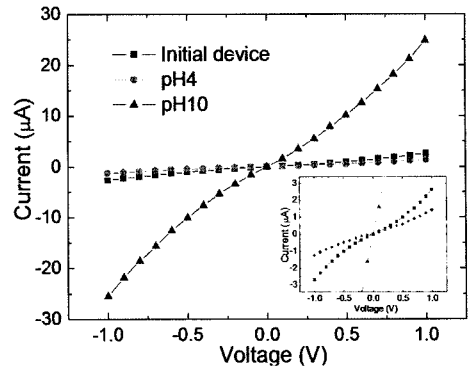


그림 4. pH 변화에 따른 SW-CNTs 센서 전류-전압 특성 그래프

Fig. 4. I-V characteristics of bundled SW-CNTs pH sensor at two different pH buffer solutions.

진 것을 확인 할 수 있다. 제작된 소자는 수십 kΩ에서 수백 kΩ사이 범위의 소자 저항을 나타내었다. 이는 분산된 탄소나노튜브의 격자 결합구조(lattice geometries)에 따른 것이며, 금속 전극과 탄소나노튜브 사이에 독특한 contact system으로 접촉 저항(contact resistance)을 가지는데, 이는 페르미준위 표면(Fermi-surface)에서 전기적으로 약하게 연결되었기 때문이다<sup>[25]</sup>.

그림 4는 SW-CNTs pH센서 전류-전압 특성 그래프를 나타낸다. 게이트전압은 개방시키고 소스와 드레인 전압을 -1~1 V의 범위로 sweep하여 드레인 전류에 대한 전기적 특성을 모니터링 하였다. 또한, 주입된 OH<sup>-</sup> 농도에 따른 탄소나노튜브 감지부분의 전기적 특성을 관찰하기 위해서 OH<sup>-</sup> 농도가 상대적으로 크게 차이나는 pH 4와 pH 10으로 측정을 하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 pH 4를 주입한 센서와 pH 10과의 전기적 특성은 확연히 다르며 전기전도도( $\Delta I/\Delta V$ , 기울기) 차이가 크다는 것을 알 수 있으며 그림 4의 삽입된 그림에서 확인 할 수 있다. 이는 탄소나노튜브에 흡착된 OH<sup>-</sup>의 농도 따른 전기적 특성변화가 확연히 나타나며, OH<sup>-</sup> 농도에 따른 탄소나노튜브의 전기적 특성변화를 통하여 pH 센서의 선택적 감응에 적용할 수 있다는 것을 알 수 있다. 금속 전극 간에 연결된 탄소나노튜브의 페르미준위가 상대적인 OH<sup>-</sup> 농도에 따라 탄소나노튜브의 전기전도도가 증가 혹은 감소하게 된다.

그림 5는 OH<sup>-</sup>의 농도 변화에 따른 감응특성과 pH의 변화에 따른 SW-CNTs 전기전도도를 모니터링 하여 나타내었다. OH<sup>-</sup>의 농도 변화에 따른 감응특성을 관찰하기 위해 소스-드레인 전압을 일정하게 고정시키고 OH<sup>-</sup>의 양을 1 mM, 10 μM, 0.1 μM, 10 nM, 10 pM,

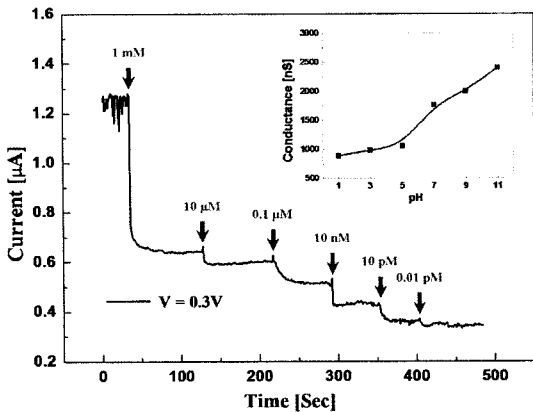


그림 5. OH<sup>-</sup>의 농도 변화에 따른 감응특성곡선과 pH 변화에 따른 SW-CNTs 센서 전기전도도

Fig. 5. The real time current measurement with different concentration of hydroxyl radical. The inset figure shows the conductance of SW-CNTs versus pH.

0.01 pM의 순으로 변화 시키며 관찰 하였다. 즉, H<sup>+</sup>와 OH<sup>-</sup>의 상대적 이온 농도를 수치적으로 계산하여 측정을 하였다. 그림 5에서 OH<sup>-</sup>의 농도에 따른 시간응답특성을 알 수 있다. 감응 시간은 1초 내로 아주 빨랐다. 그림 5에 삽입된 그림에서는 pH가 증가 할수록 전기 전도도가 증가함을 나타낸다. 삽입된 그림에서 알 수 있는 바와 같이 pH에 따른 전기전도도는 선형성을 가지고 있지 않다. 전기전도도는 pH 1~5 사이보다 pH 7~11 사이가 크다. 이는 탄소나노튜브 감지부에 유도된 전하의 양 즉, 표면전하밀도(surface charge density) 때문이다<sup>[26,27]</sup>. 탄소나노튜브는 OH<sup>-</sup>와 산화반응(oxidization)을 일으켜 에칭하지 않고 흡착하여 전기전도도를 변화시키며 반응기(chemical reactor)의 농도에 따라 응답특성에 영향을 주게 된다. 이는 pH가 바뀔 때 감지부에 유도되는 전하량이 바뀌기 때문에 게이트 전압을 변화시키는 것과 유사한 효과를 일으키므로 탄소나노튜브의 전기전도도가 pH에 따라 바뀌게 된다. 스프레이 방법으로 제작된 탄소나노튜브 pH센서에 있어서 0.01 pM의 미세농도에 대한 감응 특성은 떨어졌으나 pH센서로써 극소량의 물질도 검출 가능함을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 탄소나노튜브 센서 감지부 제작에 비해 간단한 방법인 초정밀 스프레이방법으로 SW-CNTs pH센서를 개발하

였으며, pH 1~11범위의 OH<sup>-</sup>농도에 따른 전기적 감응 특성을 관찰하여 pH센서로써 사용 가능함을 확인 하였다. 그러나 향후에는 더욱 세밀한 분해능 측정에 대한 심도 있는 연구가 필요한 사항이며 웨도우 마스크로 인한 미세 패터닝으로 탄소나노튜브 센서를 제작하여 나노스케일의 물질응답 및 회복특성 연구를 수행할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부 21세기 프론티어 기술개발사업인 지능형마이크로시스템 · 개발사업(<http://www.microsystem.re.kr>)의 연구비 지원을 받아 수행되었음.

## 참고 문헌

- [1] Iijima, S., "Helical microtubules of graphitic carbon", *Nature*, vol. 354, pp. 56-58, 1991.
- [2] M. Baxendale, "The physics and applications of carbon nanotubes", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 14, pp. 657-659, 2003.
- [3] B. Chung, H. Cho, S. Lee, T.-Y. Ko, J.-Y. Lee, D. Jeon, K.-R. Lee, B. K. Joo, and M. H. Oh, "Silicon field emitters coated with diamond-like carbon", *Journal de Physique IV*, vol. 6, pp. C5/85-C5/89, 1996.
- [4] J. H. Sung, H. S. Kim, H.-J. Jin, H. J. Choi, and I.-J. Chin, "Nanofibrous membranes prepared by multiwalled carbon nanotube/poly(methyl methacrylate) composites", *Macromolecules*, vol. 37, no. 26, pp. 9899-9902, 2004.
- [5] Y. H. Lee, Y. T. Jang, D. H. Kim, J. H. Ahn, and B. K. Ju, "Realization of gated field emitters for electrophotonic applications using carbon nanotube line emitters directly grown into submicrometer holes", *Advanced Materials*, vol. 13, no. 7, pp. 479-482, 2001.
- [6] W. S. Cho, S. I. Moon, Y. D. Lee, Y. H. Lee, S. W. Kim, J. H. Park, and B. K. Ju, "Multi-wall carbon nanotube gas sensor fabricated using thermo-mechanical structure", *IEEE Electron Device Letters*, vol. 26, pp. 498-500, 2005.
- [7] M. M. Waje, X. Wang, W. Li, and Y. Yan, "Deposition of platinum nanoparticles on organic functionalized carbon nanotubes grown in situ on carbon paper for fuel cells", *Nanotechnology*, vol. 16, no. 7, pp. S395-S400, 2005.
- [8] J. Appenzeller, J. Knoch, R. Martel, V. Derycke, S. J. Wind, and P. Avouris, "Carbon nanotube elec-

- tronics”, *IEEE Transactions On Nanotechnology*, vol. 1, no. 4, pp. 184-189, 2002.
- [9] A. S. Claye, J. E. Fischer, C. B. Huffman, A. G. Rin- zler, and R. E. Smalley, “Solid-state electrochemis- try of the Li single wall carbon nanotube system”, *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 147, no. 8, pp. 2845-2852, 2000.
- [10] C. Nützenadel, A. Züttel, D. Chartouni, and L. Schlapbach, “Electrochemical storage of hydrogen in nanotube materials”, *Electrochemical and Solid- State Letters*, vol. 2, no. 1, pp. 30-32, 1999.
- [11] K. H. An, W. S. Kim, Y. S. Park, Y. C. Choi, S. M. Lee, D. C. Chung, D. J. Bae, S. C. Lim, and Y. H. Lee, “Supercapacitors using single-walled carbon nanotube electrodes”, *Advanced Materials*, vol. 13, no. 7, pp. 497-50, 2001.
- [12] J. Martinez, T. D. Yuzvinsky, A. M. Fennimore, A. Zettl, R. García, and C. Bustamante, “Length control and sharpening of atomic force microscope carbon nanotube tips assisted by an electron beam”, *Nanotechnology*, vol. 16, no. 11, pp. 2493-2497, 2005.
- [13] 나필선, 김효진, 이영화, 이정오, “단결탄소나노튜브 트랜지스터의 나노습도센서 응용가능성 연구”, *센서학회지*, 제14권, 제5호, pp. 331-335, 2005.
- [14] T. W. Odom, J.-L. Huang, C. L. Cheung, and C. M. Lieber, “Magnetic clusters on single-walled carbon nanotubes: The kondo effect in a one-dimensional host”, *Science*, vol. 290, no. 5496, pp. 1549-1552, 2000.
- [15] M. Meyyappan, “Carbon nanotubes science and application”, New York CRC Press, 2005.
- [16] P. S. Patil, R. K. Kawar, and S. B. Sadale, “Effect of substrate temperature on electrochromic properties of spray-deposited Ir-oxide thin films”, *Applied Surface Science*, vol. 249, pp. 367-374, 2005.
- [17] M. Yuqing, C. Jianrong, and F. Keming, “New technology for the detection of pH”, *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, vol. 63, no. 1, pp. 1-9, 2005.
- [18] 이정민, 이명, 이상학, 김영선, 김창진, 이부형, “실리카 졸-겔막을 이용한 pH 광학센서”, *센서학회지*, 제13권, 제3호, pp. 169-174, 2004.
- [19] 이봉수, 홍주영, 황영목, 조승현, “내시경용 광섬유 pH 측정 센서 개발을 위한 기초 연구”, *센서학회지*, 제13권, 제3호, pp. 213-217, 2004.
- [20] K. Besteman, J.-O. Lee, F. G. M. Wiertz, H. A. Heering, and C. Dekker, “Enzyme-coated carbon nanotubes as single-molecule biosensors”, *Nano Letters*, vol. 3, no. 6, pp. 727-730, 2003.
- [21] T. Someya, J. Small, P. Kim, C. Nuckolls, and J. T. Yardley, “Alcohol vapor sensors based on single-walled carbon nanotube field effect transistors”, *Nano Letters*, vol. 3, no. 7, pp. 877-881, 2003.
- [22] Q. Fu and J. Liu, “Integrated single-walled carbon nanotube/microfluidic devices for the study of the sensing mechanism of nanotube sensors”, *Journal of Physical Chemistry B(Letter)*, vol. 109, no. 28, pp. 13406-13408, 2005.
- [23] H. Pan, Y. P. Feng, and J. Y. Lin, “Ab initio study of OH-functionalized single-wall carbon nanotubes”, *Physical Review B*, vol. 70, p. 245425-245429, 2004.
- [24] T. Hertel, R. E. Walkup, and P. Avouris, “Deformation of carbon nanotubes by surface van der Waals forces”, *Physical Review B*, vol. 58, pp. 13870-13873, 1998.
- [25] Q. Ngo, D. Petranovic, S. Krishnan, A. M. Cassell, Q. Ye, J. Li, M. Meyyappan, and C. Y. Yang, “Electron transport through metal/multiwall carbon nanotube interfaces”, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 3, no. 2, pp. 311-317, 2004.
- [26] R. Qiao and N. R. Aluru, “Atypical dependence of electroosmotic transport on surface charge in a single-wall carbon nanotube”, *Nano Letters*, vol. 3, no. 8, pp. 1013-1017, 2003.
- [27] G. H. Bolt, “Determination of the charge density of silica sols”, *Journal of Physics Chemistry*, vol. 61, pp. 1166-1169, 1957.



권재홍

- 1977년 11월 21일생
- 2003년 2월 세종대학교 공과대학 전자공학과 졸업(학사)
- 2005년 2월 세종대학교 공과대학 전자공학과 졸업(석사)
- 2005년~현재 고려대학교 공과대학 전자전기공학과 박사과정
- 주관심분야 : MEMS, 탄소나노튜브, 유기박막트랜지스터



이경수

- 1979년 9월 15일생
- 2005년 2월 인하대학교 이과대학 물리학과 졸업(학사)
- 2005년 2월~현재 고려대학교 이과대학 물리학과 석사과정
- 주관심분야 : MEMS, 탄소나노튜브



**이 윤 희**

- 1963년 2월 28일생
- 1985년 2월 고려대학교 이과대학 물리학과 졸업(학사)
- 1987년 2월 고려대학교 이과대학 물리학과 졸업(석사)
- 1994년 8월 고려대학교 이과대학 물리학과 졸업(박사)
- 1987년~2005년 2월 한국과학기술연구원(KIST) 책임연구원
- 2002년 2월~현재 고려대학교 이과대학 물리학과 교수
- 주관심분야 : 탄소나노튜브, 전계효과트랜지스터, 나노와이어



**주 병 권**

- 1962년 12월 2일생
- 1986년 서울시립대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1988년 서울시립대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1995년 고려대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 1988년~2005년 KIST 마이크로시스템연구센터, 책임연구원
- 1996년 Univ. South Australia(Australia) 방문연구원
- 2005년~현재 고려대학교 전기전자전파공학부 부교수
- 주관심분야 : Flat panel display(FED, OLED), MEMS, Nano-devices