

나노기술의 MEMS 응용

양상식

아주대학교 전자공학부

1. 서론

나노기술(NT: Nano Technology)은 유망한 차세대 기술의 하나로 주목받고 있으며 나노기술에 대한 관심과 연구가 나날이 증가하고 있다. 나노(nano)란 십억 분의 일을 뜻하는 말이다. 일반적으로 나노기술은 1차원적인 두께나 2차원적인 패턴의 크기, 혹은 3차원적인 미세 구조의 크기가 원자나 분자의 크기(나노미터 이하)에서 100 나노미터 정도에 이르는 구조물이나 소자와 관련된 기술을 총칭한다.

나노 크기의 구조물을 얻을 수 있는 제작 및 가공 기술은 각 분야에서 다양하게 개발되고 있다. 자기 조립 단분자막(SAM: Self-Assembly Monolayer) 제작 기술로는 1차원의 얇은 막을 제작할 수 있고, 나노머시닝 혹은 나노리소그래피 기술로는 평면상에서 나노 크기를 갖는 2차원의 패턴을 형성할 수 있다. 다양한 방법으로 제작되는 탄소나노튜브(Carbon Nano Tube)는 3차원적인 나노 구조물이라 할 수 있다.

최근에 나노기술이 미래의 주요 핵심기술로 주목받게 된 것은 다양한 방법으로 나노 크기의 구조물 제작이 가능해짐과 함께 나노구조물이 갖는 그 성질이 마이크로 혹은 그 이상의 크기의 구조물에서 나타나는 성질과 크게 다르기 때문이다. 물질이 나노미터 크기가 되면 질량에 비하여 표면적이 넓어지게 되어 표면효과가 두드러지게 나타나고 이로 인해 여러 가지 성질이 변하게 된다. 물질과 구조에 따라 기계적, 전기적, 물리적, 화학적, 광학적 특성 등이 다르게 나타날 수 있다. 한 예로, 노란색으로 보이는 금의 크기가 아주 작으면 붉은 색을 띄게 된다. 탄소나노튜브의 경우는 기계적 특성이 우수하고 화학적으로 안정하며 구조에 따라 여러 전기적 특성을 보인다.

과학 기술 분야에서 나노기술을 이용하는 다양한 연구가 행되고 있다. 최근 10여 년간 초소형 구조물의 제작 기술로 상당한 진척을 보인 마이크로머시닝 기술과 이를 이용하여 제작되는 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 연구 분야에서 나노기술을 접목하여 소자의 제작 방법을 개선하거나 소자의 성능을 향상시키려는 다각적인 시도가 이루어지고 있다.

이 글에서는 나노 크기의 구조물을 제작하는 다양한 제작 방법과 함께 나노구조물의 MEMS 응용에 관한 연구 동향을 살펴보고자 한다.

2. 자기조립단분자막

자기조립단분자막(SAM)을 이용하여 표면 개질을 할 수 있다. 기판 위에 얇은 자기조립단분자막을 형성함으로써 결합력을 작게 하거나 크게 하는 것이 가능하다. 그림 1은 자기조립단분자막을 이용하여 결합력을 작게 하여 패턴을 형성하는 방법을 보여준다[1]. 먼저 (a)와 같이 기판 위에 자기조립단분자막을 형성하고 그 위에 (b)와 같이 알루미늄 패터를 제작한다. 그리고 나서 (c)와 같이 SU-8을 코팅한 후 SU-8을 떼어내면 자기조립단분자막에 의해 결합력이 약해진 알루미늄 패터는 (d)와 같이 SU-8으로 전이된다.

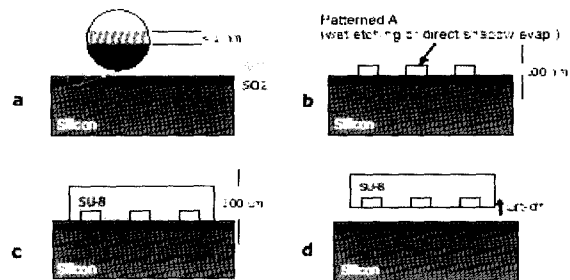


그림 1. SAM을 이용한 패턴 전이 과정.

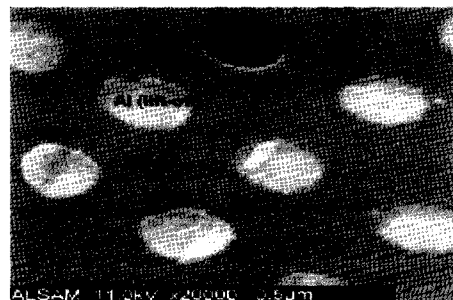
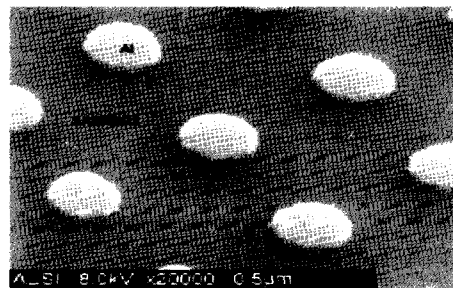


그림 2. SAM으로 제작된 패턴의 SEM 사진.

그림 2는 제작된 패턴의 사진이다[1]. 위쪽은 자기조립 단분자막 위의 알루미늄 패턴을 보여주고 있고 아래쪽은 SU-8에 전이된 패턴을 보여준다. 이와 반대의 경우도 가능하다. 결합력이 약해서 금속이 잘 증착되지 않는 표면에 자기조립단분자막으로 결합력을 증가시켜서 금속 패턴을 전이시키기도 한다[2].

3. 나노머시닝

나노머시닝은 평면상의 구조물에 나노 크기의 2차원 패턴을 제작하는 기술을 말한다. 그림 3은 FIB(Focused Ion Beam)를 이용하여 폴리실리콘 층의 패턴을 제작하는 과정을 보여준다[3]. FIB로 밀링과 유사하게 대상을 직접 가공한다. 그림 4는 이 방법을 이용하여 제작된 구조물이다[3]. 80 nm 간격의 구조물을 제작한 것이다. 이 가공 방법은 마이크로머시닝 기술로 제작되는 마이크로 소자의 나노 패턴 형성에 유용하다.

4. 나노 리소그래피

마이크로 크기의 미세 패턴을 형성하는 리소그래피 기술은 일반적으로 빛을 이용한다. 그러나 빛을 이용하여 작은

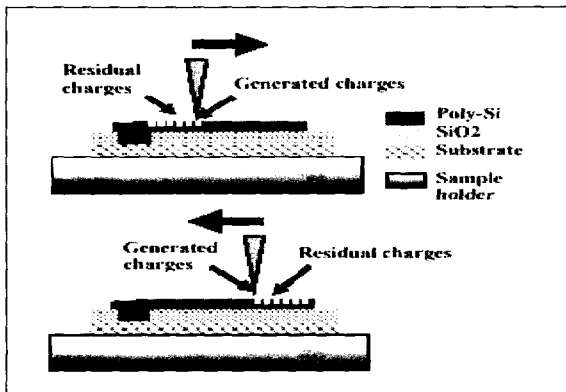


그림 3. FIB를 이용한 나노머시닝.

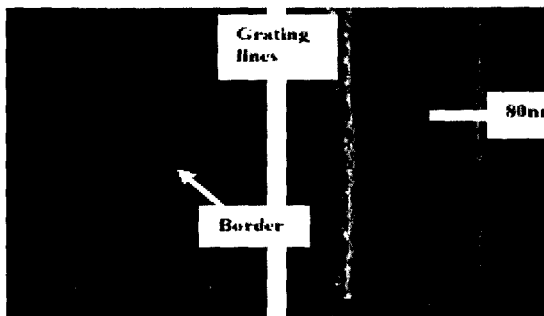


그림 4. FIB를 이용하여 제작된 구조물.

크기의 패턴을 형성하는 데에는 한계가 있다. 따라서 비교적 쉽게 나노미터 크기의 패턴을 형성할 수 있는 방법으로 원자 현미경을 이용한 기술이 이용된다. 이 기술은 각종 나노 크기의 미세 패턴과 바이오 칩의 패턴을 형성하는데 이용이 가능하나 패턴을 형성하는 속도가 느리다는 단점이 있다.

4.1. 원자 혹은 분자의 관찰 및 조작

1980년대 IBM 쿨리히 연구소에서 개발된 STM(Scanning Tunneling Microscopy)으로 원자나 분자의 관찰과 조작이 가능해지면서 나노기술이 크게 진전하였다. 그림 5는 35개의 크세논(Xe) 원자를 이용하여 글자를 만든 것이다[4]. 이후 AFM(Atomic Force Microscopy)과 SNOM(Scanning Near-field Optical Microscopy) 같은 원자 현미경의 개발로 원자의 조작 기술이 더욱 발전하게 되었다.

4.2. Dip Pen 나노리소그래피

Dip Pen 나노리소그래피는 AFM 팁을 이용하여 미세 패턴을 형성하는 방법이다. 그림 6은 Dip Pen 나노리소그래피의 방법을 보여준다[5]. 팁에 자기조립단분자막(SAM)을 형성하는 분자를 묻혀서 기판 표면에 패턴을 만드는 것으로 일정한 나노 선포로 패턴을 형성하는 것이 가능하다. 유기분자를 사용할 수 있는 것이 이 방식의 특징이므로 바이오 분야에 응용될 수 있다.

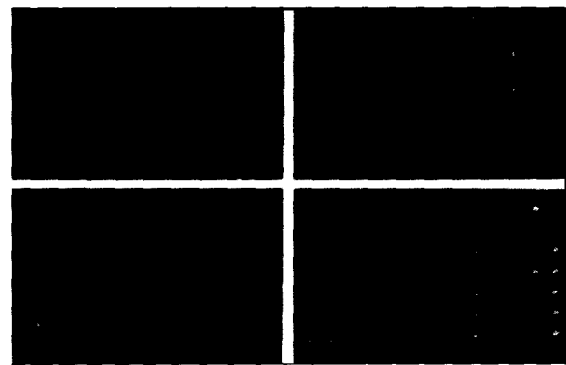


그림 5. 크세논 원자로 형성한 글자 사진.

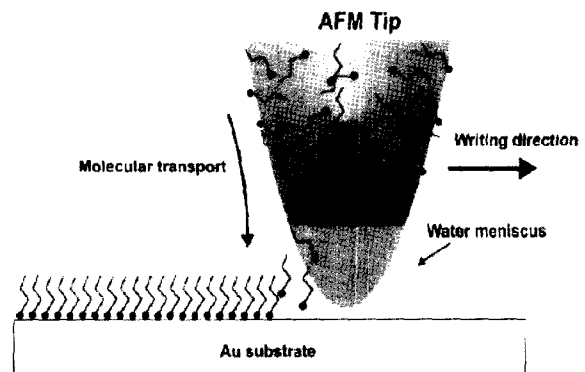


그림 6. Dip Pen 나노리소그래피.

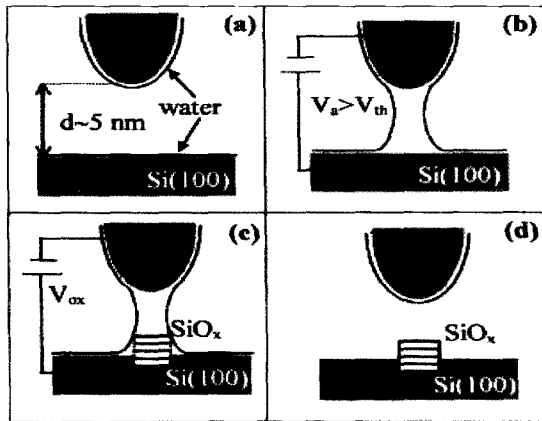


그림 7. 나노 산화막 형성 원리.

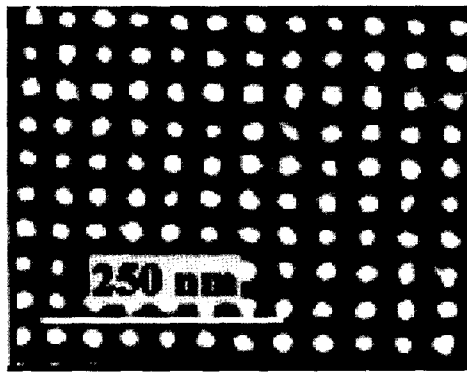


그림 8. 나노 산화막 방법으로 제작된 패턴.

4.3. 나노 산화막 제작 기술

나노 산화막 제작은 Dip Pen 나노리소그래피와 같이 AFM을 이용한다. 그림 7은 나노 산화막의 형성과정을 보여준다(6, 7). 팁과 기판 사이의 거리가 아주 가깝기 때문에 공기중의 습기에 의해 팁과 기판 사이에 수막이 형성된다. 여기에 전압을 가하면 기판의 표면에 산화막이 형성된다. 습도와 인가전압, 그리고 노출시간을 조절함으로써 산화막의 폭과 두께를 어느 정도 조절할 수 있다. 그림 8은 이 방법을 이용하여 형성한 패턴의 사진이다(6). 어레이 형태로 패턴을 형성한 것이다.

5. 탄소나노튜브의 응용

탄소나노튜브는 다이아몬드, 흑연, 풀러렌과 함께 탄소 동소체의 하나로 튜브 형태를 지니고 있다. 탄소나노튜브의 합성 방법에는 전기방전법, 레이저 증착법, 플라즈마 화학기상증착법, 기상합성법 등이 있다. 탄소나노튜브는 기계적, 전기적 특성이 우수하고 화학적으로 안정하기 때문에 여러 분야에 응용되고 있다. 2차 전자 전극, 단전자 트랜지스터, 수소 저장, STM/AFM 팁, 연료전지 전극, 전자방출원 등 여러 곳에 이용되고 있다.

5.1. 초소형 연료전지

마이크로머싱 기술을 이용한 연료전지의 소형화 연구가 많이 이루어지고 있다(8, 9, 10). 연료전지는 화학에너지를 전기에너지로 변환하는 고효율의 에너지 변환장치이다. 그림 9는 연료전지의 일반적인 구조이다. 전해질막인 멤브레인과 양극, 그리고 음극으로 구성된다. 전해질막을 경계로 연료로부터 나오는 수소와 산소의 화학반응에 의해 전기를 생산한다. 반응을 위해서 촉매가 필요하고 전극에 촉매층이 있다. 탄소나노튜브를 촉매층으로 이용하면 반응 면적을 크게 함으로써 효율을 높일 수가 있다. 그림 10은 탄소나노튜브의 일종인 나노혼을 이용하여 연료전지의 촉매층으로 사용한 것이다(11). 촉매인 백금을 나노혼에 아주 작은 크기로 형성할 수 있다. 그리고 나노혼으로 인해 반응 면적이 증가하고 연료의 통과가 용이하게 된다. 나노혼을 촉매층으로 사용함으로써 20% 정도 향상된 출력을 얻게 된다(12).

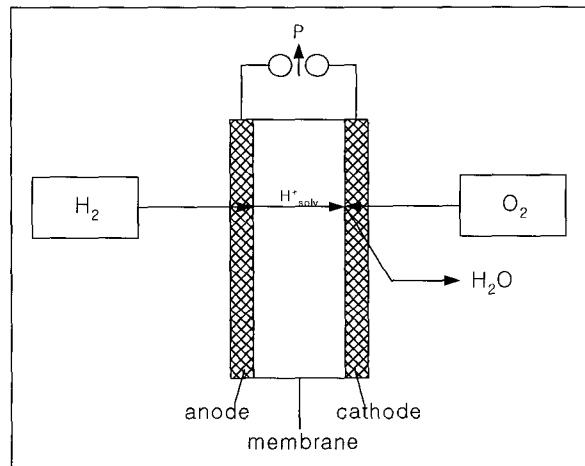


그림 9. 연료전지의 구조.

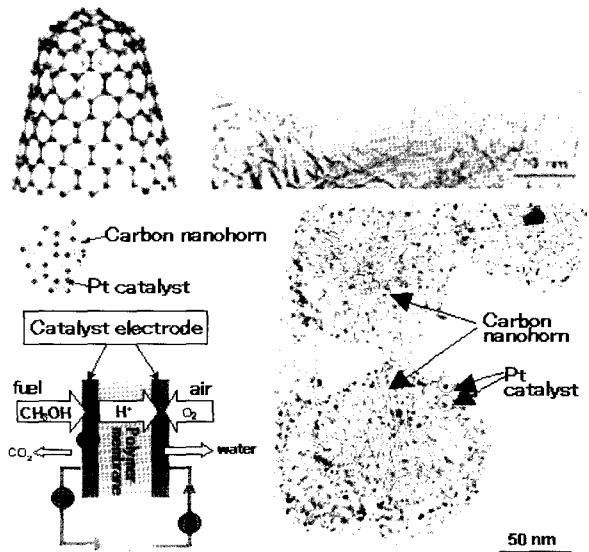


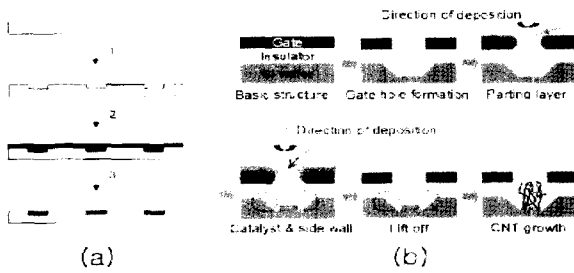
그림 10. 나노혼을 이용한 연료전지.

5.2. 전자방출원

전자 방출원은 게이트 전극과 음극에 일정 전압을 인가하여 전자들을 방출시키는 장치이며 일반적으로 전계 방출 표시 소자(FED : Field Emission Display)에 이용되며 실리콘 팁이나 탄소계열 박막을 이용한다.

전자 방출원에 기존의 실리콘 팁 대신 탄소나노튜브를 사용하면 낮은 전압에서 상대적으로 많은 전자 방출 전류를 얻을 수 있기 때문에 전자 방출원으로 아주 적합하다.

전자 방출원에 탄소나노튜브를 형성하는 대표적인 두 가지 방법으로는 그림 11(a)와 같이 탄소나노튜브 분말과 전도성 폴리머를 혼합체로 만들어 스크린 프린팅을 이용하는 방법과 그림 11(b)와 같이 촉매 금속이 있는 기판에 수직방향으로 성장시키는 열화학 기상증착법(Thermal Chemical Vapor Deposition)이 있다[13, 14]. 스크린 프린팅 방법은 주로 대면적 FED에 이용되며, 열화학 기상증착법은 고순도의 탄소나노튜브를 수직 방향으로 균일하게 성장할 수 있기 때문에 최근에 FED에 많이 사용되고 있다.



(a) 스크린 프린팅 방법 (b) 열화학 기상증착법
 그림 11. 전자 방출원에 사용되는 탄소 나노튜브 형성 방법.

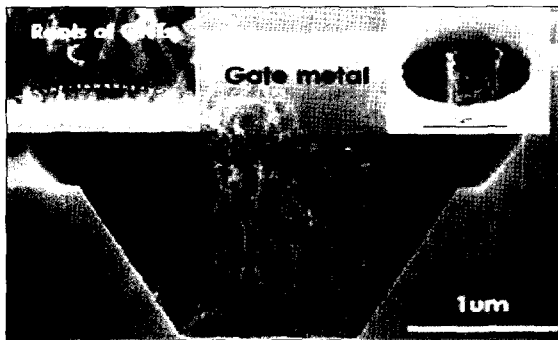


그림 12. 탄소나노튜브 전자 방출원의 단면도.

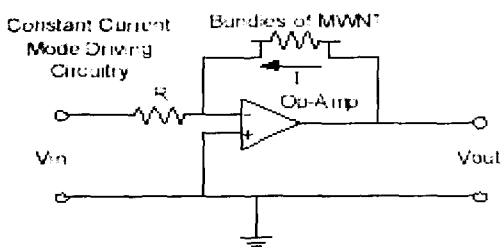


그림 13. 탄소나노튜브 저항을 이용한 온도센서의 원리.

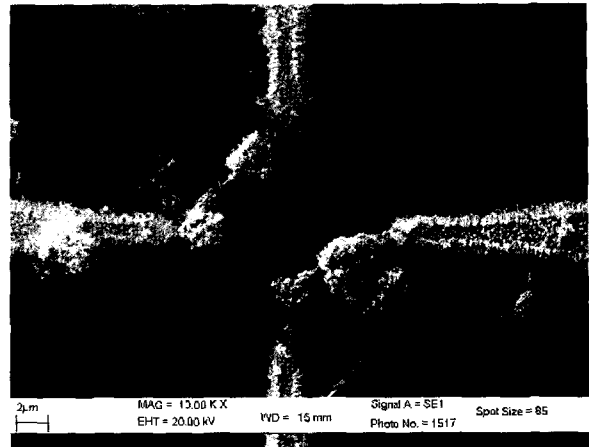


그림 14. Au 전극사이에 형성된 탄소나노튜브.

그림 12는 열화학 기상증착법으로 탄소나노튜브를 형성한 전자 방출원의 SEM 사진이다[14]. 게이트 구멍의 직경은 1.5 µm이고 구멍의 높이는 2.5 µm이다. 직경이 20~30 nm 인 탄소나노튜브들이 잘 정렬되어 성장하였음을 볼 수 있다.

5.3. 온도 및 유량센서

그림 13은 탄소나노튜브 저항을 이용한 온도센서의 원리를 나타낸다[15]. 기존의 온도 센서나 유량센서에서 사용하는 열 필라멘트 대신 탄소나노튜브를 사용하여 정전류 하에서 온도나 유량의 변화에 따른 저항 변화를 측정하는 방식이다.

다중벽 탄소나노튜브와 메탄올의 혼합체 속에서 네 개의 전극에 1 MHz의 AC 전장을 가하면 AC 전기영동 현상이 일어나 그림 14와 같이 탄소나노튜브가 전극사이에 형성된다[15].

이 센서는 10 µW 이하에서 작동될 수 있기 때문에, 기존의 마이크로머시닝 공정으로 제작한 폴리실리콘 온도 센서가 전력을 많이 소모하는 문제점을 해결할 수 있다[16]. 또한 100 kHz 이상의 매우 빠른 응답 특성을 가지고 있다.

6. 결론

본문에서는 자기조립단분자막, 나노머시닝, 나노 리소 그래피, 탄소나노튜브 등의 나노기술과 이를 MEMS에 응용한 연구 사례를 살펴보았다. 나노기술은 이외에도 나노 입자 혹은 나노 영역의 역학 등의 다양한 학문을 포함하며 광범위하게 응용될 수 있다. 나노기술의 사용으로 극미세 구조물이나 소자의 제작이 가능해 집에 따라 창의적인 소자가 개발될 것이다. 나노기술은 이미 MEMS에 다양하게 이용되고 있으며 과학과 공학 전반에 큰 영향을 미칠 것으로 예측된다. 앞서서도 언급했듯이 나노기술은 정보기술, 바이오기술과 함께 다음 세대를 이끌 기술로 평가받고 있다. 나노기술의 발달은 우리 생활에 많은 변화를 가져다 줄 것으로 기대한다.

참고문헌

1. B. J. Kim, G. M. Kim, M. Liebau, J. Huskens, D. N. Reinhoudt, J. Brugger, "SAMs meet MEMS : surface modification with self-assembled monolayers for the dry-demolding of photoplastic MEMS/NEMS," *Proc. IEEE MEMS 2001*, pp. 106-109, 2001.
2. 박용민, 노경원, 박노경, 임관섭, 김진호, 한종훈, "Enhancement in Bonding Strength of Metal Thin-Film Micropatterns on PDMS using Self-Assembled Monolayers," *대한화학회 제89회 학술 발표회*, 2002.
3. B. Li, X. Tang, H. Xie, X. Zhang, "Focused Ion Beam (FIB) Nano- Machining and FIB Moire Technique for Strain Analysis in MEMS/NEMS Structures and Devices," *Proc. IEEE MEMS 2003*, pp. 674-677, 2003.
4. R. W. Siegel, E. Hu, M. C. Roco, "Nanostructure Science and Technology," *National Science and Technology Council (NTSC) report*, 1999.
5. R. D. Piner, J. Zhu, F. Xu, S. Hong, C. A. Mirkin, "Dip-Pen Nanolithography," *Science*, vol. 283, pp. 661-663, 1999.
6. Ricardo Garcia, Montserrat Calleja, "Patterning of silicon surfaces with noncontact atomic force microscopy: Field-induced formation of nanometer-size water bridges," *Journal of Applied Physics*, pp. 1898-1903, 1999.
7. 박강호, "나노세계의 눈과 손: 원자현미경 기술," *기계 저널* 제43권 제3호, pp. 39-48, 2003.
8. W. Y. Sim, G. Y. Kim, S. S. Yang, "Fabrication of Micro Power Source (MPS) using Micro Direct Methanol Fuel Cell (μ DMFC) for the Medical Application," *Proc. IEEE MEMS 2001*, pp. 341-344, 2001.
9. Y. H. Seo, Y. H. Cho, "A Miniature Direct Methanol Fuel Cell using Platinum Sputtered Microcolumn Electrodes with Limited Amount of Fuel," *Proc. IEEE MEMS 2003*, pp. 375-378, 2003.
10. K. B. Min, S. Tanaka, M. Esashi, "Silicon-based Micro-polymer Electrolyte Fuel Cells," *Proc. IEEE MEMS 2003*, pp. 379-382, 2003.
11. T. Yoshitake, Y. Shimakawa, S. Kuroshima, H. Kimura, T. Ichihashi, Y. Kubo, D. Kasuya, K. Takahashi, F. Kokai, M. Yudasaka, S. Iijima, "Preparation of fine platinum catalyst supported on single-wall carbon nanohorns for fuel cell application," *Physica B 323*, pp. 124-126, 2001.
12. NEC annual environmental report 2002 <http://www.nec.co.jp/eco/en/annual2002/04/05.html>.
13. Q. H. Wang, A. A. Setlur, J. M. Lauerhaas, J. Y. Dai, E. W. Seelig, R. P. H. Chang, "A nanotube-based field-emission flat panel display," *Applied Physics Letters*, vol. 72, no. 22, pp. 2912-2913, 1998.
14. Y. T. Jang, C. H. Choi, B. K. Ju, J. H. Ahn, Y. H. Lee, "Gated field emitter using carbon nanotubes for vacuum microelectronic devices," *Proc. IEEE MEMS 2003*, pp. 37-40, 2003.
15. Victor T. S. Wong, Wen J. Li, "Bulk carbon nanotubes as sensing element for temperature and anemometry micro sensing," *Proc. IEEE MEMS 2003*, pp. 41-44, 2003.
16. C. Liu, J. B. Huang, Z. Zhu, F. Jiang, S. Tung, Y. C. Tai, C. M. Ho, "A Micromachined Flow Shear-Stress Sensor Based on Thermal Transfer Principle," *Journal of MEMS* vol. 8, no. 1, pp. 90-99, 1999.

..... 저자소개



《양상식(梁翔植)》

- 1958년 1월 16일 생.
- 1980년 서울대 공대 기계공학과 졸업.
- 1983년 동 대학원 기계공학과 졸업 (석사).
- 1988년 U. C. Berkeley 졸업(공박).
- New jersey Institute of Technology 연구 조교수.
- 현재 아주대 공대 전자공학부 교수.
- 주 연구분야 : MEMS.
- 연락처 : Tel : (031)219-2481,
Fax : (031)212-9531
E-mail : ssyang@ajou.ac.kr