

실리콘에 기초한 마이크로 가공 기술

김 창 진*

(*UCLA 기계항공원자핵공학과 조교수)

1. 머리말

Microelectromechanical Systems(MEMS)에서 마이크로가공(micromachining)의 역할은 오늘날 정보 자동화 기술에서 반도체 IC 생산의 역할에 비할 수 있을 것이다. 마이크로가공을 마이크로미터(μm) 단위를 중요치수(feature size)로 하는 기계전자적 요소와 그 시스템을 만드는 기술이라고 정의할 때, 거기에는 IC 공정에 기초한 사진식각 기술 외에도 여러가지 다른 기술들이 포함되겠다[1]. 그러나 현재 MEMS에서의 제작기술은 IC공정을 바탕으로 한 가공법이 대부분을 이루고 있으며, 이 글에서는 이런 실리콘에 기초한 마이크로 가공(silicon-based micromachining)에 대해 소개한다.

2. 기판 마이크로가공 (bulk micromachining)

구조물의 관점에서 보면, 일반 IC 제작과정에서 웨이퍼 자체는 기판 역할만 할뿐 물리적 가공의 대상은 아닌데 비해 기판 마이크로가공은 웨이퍼(기판)자체를 본격 가공하는 기술이다. 그 시작은 IC의 발명에 곧 뒤따라서(1960년대 초), 이미 상용화 된 실리콘 마이크로 가공물들(압력 센서, 가속도 센서 등)은 거의 모두 이 기판 가공에 기초하고 있다. 기판가공에서는 이방성 습식식각(anisotropic wet etching)이 주를 이루고 있다. 몇몇 실리콘 식각액

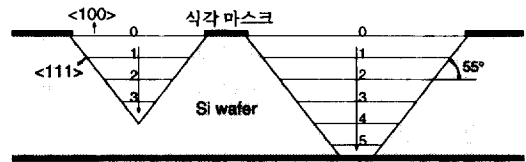


그림 1. <100> 방향 실리콘 웨이퍼의 기판 마이크로가공

의 경우, 식각속도는 실리콘의 결정방향에 따라 크게 다른데, 이 이방성을 이용해 결정체인 실리콘 웨이퍼를 조각(sculpting)하는 것이 기판 마이크로가공의 대표적 방법이다. 그림 1의 단면도는 (100) 실리콘 웨이퍼의 기판 마이크로가공 예를 보여준다.

먼저 일반적인 리소그래피와 식각으로 웨이퍼 표면에 산화층 혹은 질화층의 식각마스크를 형성한 후 기판의 식각을 시작한다. 그림 1은 <111> 방향의 식각 속도가 웨이퍼 두께 방향인 <100> 방향에 비해 무시할 정도인 경우이다. 그림에서 숫자는 시간에 따라 진행 되는 식각 전면의 이동이다. 식각 마스크의 열린 폭이 작으면(그림 왼쪽) 어느시점에서 식각은 거의 멈추게 되어 V형의 홈이 만들어지며, 그 폭이 크면(그림 오른쪽)웨이퍼의 반대쪽까지 식각이 진행되어 거기에 박막이 형성된다. 이러한 박막이 압력계의 기본 구조로 이용됨은 쉽게 이해 될 것이다. 또한 박막을 제거하면 아주 작은 구멍이 만들어 지고, 수 많은 구멍을 배열하여 inkjet printer의 헤드(head)로 사용되기도 한다[2]. 결정

학(crystallography)을 조금 더 응용하면 웨이퍼표면에 미세보를 형성하거나 더욱 복잡한 구조를 만들 수도 있고, (110) 웨이퍼를 사용하면 아주 좁고 깊은(수 μm 너비에 백 μm 깊이) 홈을 파 낼 수도 있다. 기관 마이크로 가공에서는 위에서 예로 든 웨이퍼 결정방향을 이용한 이방성 식각과 함께 불순물 농도에 따른 식각 멈춤(etch stop) 기술이나 p-n junction을 이용한 전기 화학적 식각 멈춤기술 등이 이용된다.

3. 표면 마이크로가공 (surface micromachining)

앞에서 본 기관마이크로 가공과 달리, 표면 마이크로가공은 일반 IC 제작처럼 표면에 더해진 박층들만을 가공함으로써 원하는 구조를 만들어 내는 기술인데, 희생층(sacrificial layer)개념[3]이 그 핵을 이룬다. 여기서 가장 간단하나 대표적인 예로서 다결정 실리콘으로 만들어 지는 미세 외팔보의 제작 과정을 그림 2를 통해 보이겠다. (a)웨이퍼 표면에 희생층이 될 박층을 입힌 후 리소그라피와 식각으로 표면 한 곳을 노출시킨다. 이 희생층으로는 1~2 μm 두께의 PSG(phosphosilicate glass)가 많이 쓰인다. (b)다음으로, 구조층이 될 1~3 μm 두께의 다결정 실리콘을 그 위에 입히고, 리소그라피와 식각으로 보의 형상을 이룬다. 이 구조층의 식각은 수직벽을 얻기위해서 습식 식각이 아닌 건식식

각, 특히 RIE(Reactive Ion Etching)가 많이 쓰인다. 이 구조층은 희생층이 식각되어 표면이 노출된 부분에서 기관에 직접 접합하게 된다. (C)마지막으로 리소그라피 필요없이 희생층만 선택적으로 식각제거하면 그림에서와 같은 다결정 실리콘의 미세 외팔보가 완성된다.

표면가공은 IC제작공정과 밀접하게 연결되어 있어 IC제작밀도에 근접하고, 따라서 다른 마이크로가공들에 비해 훨씬 미세한 구조물들을 만들 수 있다. 방금 소개한 기본 공정에 한 두가지 과정을 보태 선형공진모터가 만들어 지고[4], 더 응용하면 회전모터가 만들어진다[5]. 표면가공으로 만들어 지는 미세 구조물은 IC와 일관 공정을 통해 함께 제작될 수 있어, 크나큰 경제적, 기능적 의미를 지닌다. 또한, 이미 고도로 발달된 IC 제작기술을 쉽게 이용할 수 있고, 앞으로도 계속 그 발전에 편승하기 쉽다. 일찌기 60년대부터 시작된 기관 마이크로가공기술이 이미 상용화 되어 있었고, 다른 여러 마이크로가공들이 존재함에도 불구하고 이 실리콘 표면 마이크로가공이 MEMS연구의 태동이 된 것은[6] 이런 실질적인 이유들 때문이다. 표면가공에 의한 대량 제품으로는 수 년간의 연구 개발을 거쳐 올해 처음으로 one chip air-bag triggering system이 시판되기 시작했는데, 여러 기술상이 수여될 만큼 각광을 받고 있다.

4. 마이크로 전기도금

순수 IC제작 공정에 기초한 표면가공기술로는 얻을 수 있는 구조층의 두께(높이)가 수 μm 이상은 힘들어 지는데, 마이크로 전기도금을 사용하면 이 한계를 극복할 수 있다. 일반적 마이크로 가공은 IC 공정과 마찬가지로 균일하게 입혀진 구조층의 불필요한 부분을 제거해 원하는 구조를 만드는데 (building by subtraction) 비해 마이크로 전기도금은 만들어 진 틀에 구조층을 채워(building by addition) 원하는 구조를 얻는다. 간단한 예로 마이크로 전기도금에 의한 외팔보 제작을 그림 3을 통해 살펴보자. (a) 우선 희생층을 완성한 후 그 위에 도금의 전극이 될 아주 얇은 금속층(seed layer)을 입힌다. (b) 다음, 두꺼운 감광제를 입히고 마스크를 통해 강한 빛을 쬐 후 현상하면 감광제의 틀이

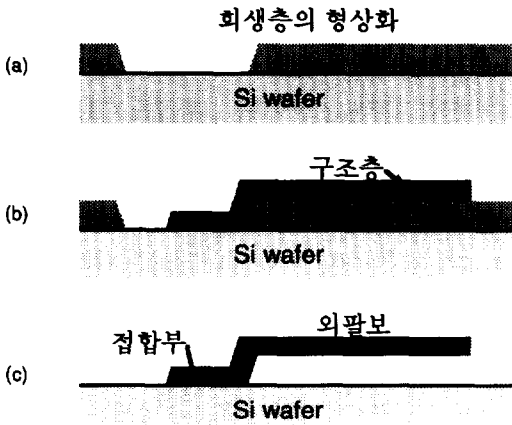


그림 2. 표면 마이크로가공에 의한 미세 외팔보의 제작

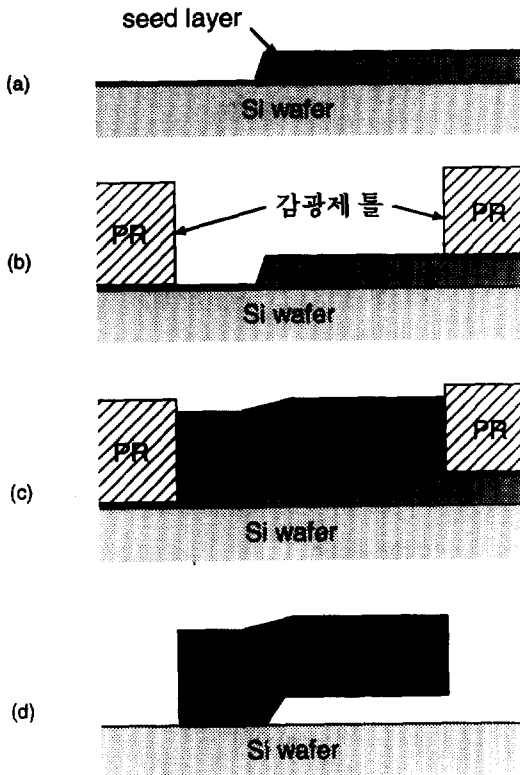


그림 3. 마이크로 전기도금에 의한 미세 외팔보의 제작

완성된다. (c) 전기도금으로 이 틀에 금속을 채운 후, (d) 틀과 희생층을 제거하면 원하는 구조를 얻는다.

특히 X-Ray를 광원으로 사용할 때는 $100\mu\text{m}$ 이상 두께의 수직벽도 만들 수 있는데 LIGA(독일어: Lithographie, Galvanoformung, Abformung)라고 불리는 이 방법[7]이 마이크로 전기도금의 시초이기도 하다. 그러나 엄청난 가격이 문제이므로, 대신 강 자외선을 광원으로 이용하는 방법들이 최근 개발되고 있다. 싸구려 LIGA(cheap LIGA)라고 불리는 이러한 방법들로도 $10\sim 20\mu\text{m}$ 정도 두께는 가능해진다[8]. 마이크로 전기도금으로는 주로 Ni, Cu 등 금속의 기계소자가 만들어지나, 이 금속구조를 다시 틀로 해 플라스틱 구조를 대량으로 찍어 낼 수도 있다. 마이크로 전기도금은 IC 제작공정과 달라, 실리콘 표면 마이크로가공이 가지는 "집적회로와의 일관공정"이라는 큰 잇점을 살리

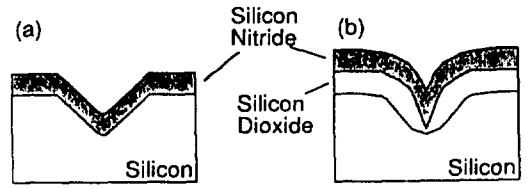


그림 4. AFM용 질화실리콘 탐침 제작[9] (a)상용 (b)첨예화

는데는 제한이 따르나, 높은 (두꺼운) 수직벽이나 전자기 구동을 위해서는 매우 유용하다.

5. 응용기술에

이 절에서는 앞에서 보인 기본기술을 출발로 실제 마이크로가공이 어떻게 응용개발되는지를 몇가지 예를 보임으로써 소개해 본다.

5.1 탐침(scanning tip)과 첨예화(sharpening)기술

원자 해상도(atomic resolution)를 가지는 STM(scanning tunneling microscope)과 AFM(atomic force microscope)등은 끝이 뾰족한 탐침으로 시편 위를 주사(scan)한다. 이를 위한 가공으로는 마이크로 가공을 응용한 간단하면서도 재미있는 기술들이 많이 이용된다. 현재 시편되고 있는 대부분의 AFM은 피라밋형의 질화실리콘 탐침을 사용하는데, 그림 4(a)에서 보통 2절에서 소개한 기판 마이크로가공이 그 기초를 이루고 있다. 이방성 식각을 이용해 실리콘 웨이퍼 표면에 피라밋형의 홈을 만들고 그 위에 질화층을 별도의 기판에 접합한 후 원래의 실리콘 기판을 제거하면 새 기판 위에 피라밋형 질화실리콘의 날카로운 침이 완성된다.

상용 탐침은 끝 부분의 곡률반경이 $0.05\sim 0.1\mu\text{m}$ 정도인데, 매끄러운 표면의 관찰에는 문제가 없으나, IC나 생물학에서의 시편등 매끄럽지 못한 표면에는 더욱 날카로운 탐침이 바람직하게 된다. 이를 위해 여러 가공법이 개발되었으며, 그림 4(b)는 (a)의 예를 간단히 개량하는 방법이다[9]. 즉, 피라밋형 홈에 질화층을 증착하기 전에 실리콘 표면을 산화시키면 불균일 산화로 홈은 더욱 날카로와지는데, 이 간단한 개량으로 $0.05\mu\text{m}$ 이던 곡률반경을



그림 5. AFM용 결정실리콘 탐침의 전자 현미경 사진[10]

0.01 μm 이하로 줄일 수 있었다. 그림 5는 AFM용 탐침의 전자현미경 사진이다[10]. 질화 실리콘의 외팔보 끝에 결정체 실리콘의 탐침이 만들어져 있다.

5.2 미세 밀봉공간 제작기술

(micro-encapsulation technique)

표면 마이크로가공 기술로 실현하는 진공 밀봉공간 제작의 원리를 알아본다. 그림 6에서, (a)–(c) 산화층을 희생층으로 해 다결정 실리콘으로 된 구조를 만든 후, (d) 구조내의 산화층을 식각해 내는데 필요했던 통로를 메꾸면 구조물 내에 밀봉공간이 만들어진다. (d-1)은 실리콘이 산화로 내에서 산화되면서 부피가 팽창하여 식각통로를 메꾸는 예이다. 산화로내에서 이루어지는 공정이라 밀봉공간 내에는 산소만이 존재하는데, 밀봉된 후에도 그 속의 산소는 계속 산화에 소모되므로 결국 진공공간이 이루어진다. (d-2)는 박층을 한번 더 식각 식각 통로를 메꾸는 방법이다. 마지막 이 공정을 저압 화학증착로(LPCVD furnace)내에서 시행하면 역시 이 공간도 진공이 된다.

밀봉공간 기술로는 절대 압력계를 만들기도 하고 [11], 조금 더 응용하여 마이크로 전등을 만들기도 한다[12]. 그러나, 이런 특수목적 이외에, 일반 표면 마이크로 가공물들을 커다란 밀봉공간 내부에 만들 수 있다면 그 의의는 자못 커진다. 미세 구조물을 외부(접촉, 먼지 등)로부터 보호하는 역할과 마이크로 구조물이 진공내에서 운동하게도 할 수 있는 것은 큰 이득이 된다. on-chip packaging이라 부를 수 있는 이 기술은 가공공정에 상당한 어려움이 따르나, 그간의 노력으로 해결의 기미가 보인다[13].

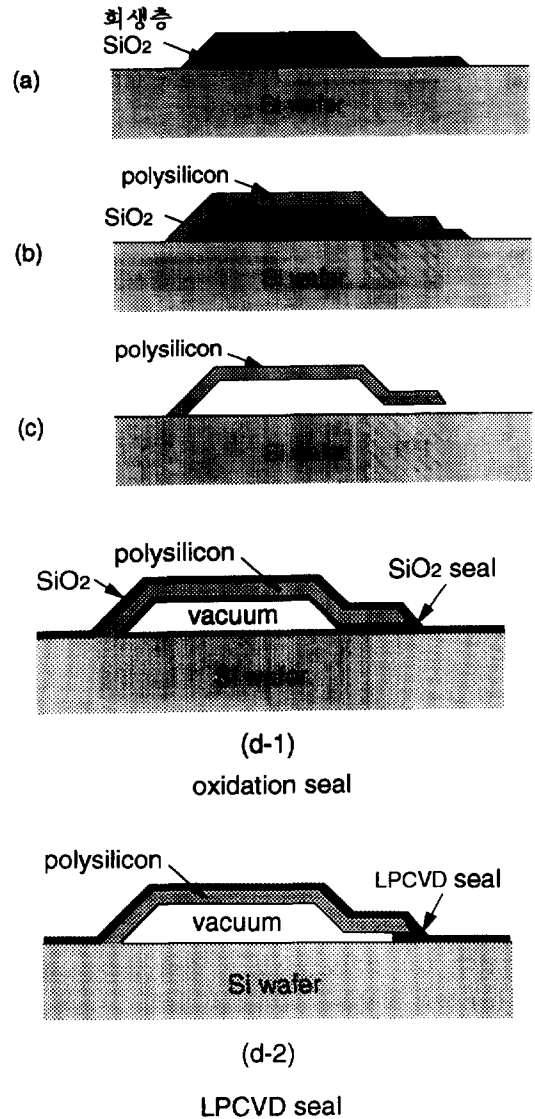


그림 6. 표면 마이크로가공에 의한 진공 밀봉공간 제작

5.3 표면-기판 혼합 마이크로가공 기술

표면가공과 기판가공이 혼합되는 공정의 대표적인 예는 미세 돌출물의 가공이다. 삼차원 공간에서 작업지역으로 접근해야 할 미세구조의 경우에 필수적임은 짐작이 갈 것이다. 여기서는 단세포 크기의 미소 대상물을 위한 돌출형 마이크로 집게(overhanging microgripper - 두께 2.5 μm , 폭 2 μm , 길이 400 μm)[14]의 가공예를 그림 7로 소개한다.

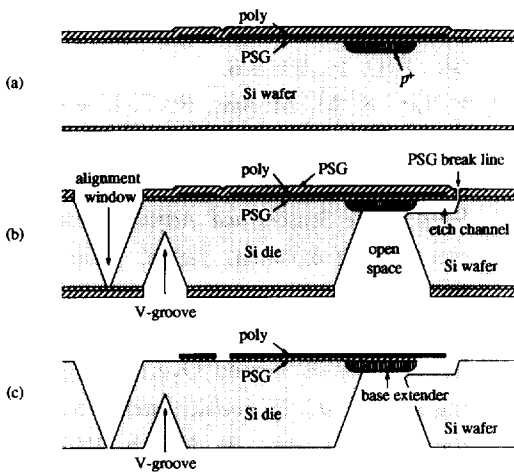


그림 7. 다결정 실리콘 돌출 마이크로 집계의 가공

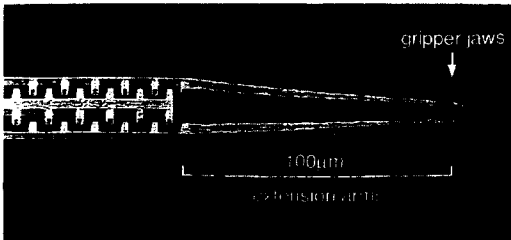


그림 8. 마이크로 집계 끝 부분의 전자 현미경 사진 [14].

(a) 먼저 웨이퍼 표면에 보론(B)을 선택적으로 확산시킨다. 다음, PSG와 다결정 실리콘을 증착하고 다결정 실리콘의 마이크로 집계 형상을 만든 후, 그 위에 PSG층을 또 증착한다. (b) PSG를 보호막으로 해서 집계 아래의 기판 실리콘을 식각하여 제거한다. (c) 이어 PSG층을 선택적으로 제거하면 돌출형 마이크로 집계를 얻는다. PSG break line은 내부응력 불일치에서 오는 문제점 해결을 위해, etch channel은 습식 식각과 행금에서 돌출 마이크로 구조가 쉽게 파괴되는 문제의 해결을 위해 각각 개발되었다. 공정이 끝난 후 V-groove을 이용해 Si-die를 떼어내 packaging한다. 그림 8은 완성된 마이크로 집계 끝부분의 전자 현미경 사진이다.

이 공정은 물질간 내부응력의 불일치와 표면 마이크로가공물의 연약성이라는 마이크로가공의 큰 두 문제점이 극대화된 상황에서, 처음으로 가공 공

정에 기계적인 해결책을 도입함으로써, IC 공정을 벗어나지 않고 목적을 이루었다는데 가장 큰 의의가 있다. 이 마이크로 집계를 실험을 통해 단세포를 집을 수 있음을 보였다.

6. 맺음말

실리콘에 기초한 마이크로가공은 IC제작 기술에서 태동하여, MEMS의 실현을 위해 다양한 기술들이 개발되고 있다. 이 글에서는 그 중 큰 가치를 할 수 있는 기판 마이크로가공, 표면 마이크로가공, 그리고 마이크로 전기도금의 원리에 대해 설명하고 몇 가지의 응용예를 소개해 보았다. 이를 바탕으로, 하루가 다르게 발전하는 마이크로 가공기술들을 접하는 데 조금이나마 도움이 되었으면 한다.

이 글에 인용되어 쓰인 사진들의 게재를 허락해 준 저자들에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김창진, “MEMS에서의 마이크로가공 기술”, 대한 기계학회지 1993년 6월호, pp. 499-514
- [2] K. E. Petersen, “Silicon as a Mechanical Material”, *Proceeding of the IEEE*, Vol 70, No, 5, May 1982, pp. 420-457.
- [3] R. T. Howe and R. S. Muller, “Polycrystalline Silicon Micromechanical Beams”, *J. Electrochemical Societh*, Vol. 130, June 1983, pp. 1420-1423.
- [4] W. C. Tang, T. H. Nguyen, and R. T. Howe, “Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures”, *Sensors and Actuators*, Vol, 20, No. 1&2, Nov. 1989, pp. 25-32.
- [5] Y.-C. Tai, L.-S. Fan, and R. S. Muller, “IC-Processed Micro-Motors: Design, Technology, and Testing”, *Proc. IEEE Micro Electromechanical Systems Workshop*, Salt Lake City, UT, U.S.A., Feb. 1989, pp. 1-6.

- [6] Small Machines, Large Opportunities: A Report on the Emerging Field of Microdynamics, edited by K. Gabriel, J. Jarvis, and W. Trimmer, 1988, National Science Foundation, U.S.A.
- [7] W. Ehrfeld, F. Götz, D. Münchmeyer, W. Schelb, D. Schmidt, "LIGA Process: Sensor Construction Techniques via X-Ray Lithography", *Tech. Digest, IEEE Solid-State Sensor and Actuator Workshop*, Hilton Head Island, SC, U.S.A., June 1988, pp. 1-4.
- [8] B. Frazier, J. W. Babb, M. G. Allen, and D. G. Taylor, "Design and Fabrication of Electroplated Micromotor Structures", *Micromechanical Sensors, Actuators, and Systems*, DSC-Vol. 32, Asme Winter Annual Meeting, Atlanta, GA, U.S.A., Dec 1991, pp. 135-146.
- [9] S. Akamine and C. F. Quate, "Low Temperature Thermal Oxidation Sharpening of Microcast Tips", *J. Vac. Sci. Technol.*, B 10(5), Sept./Oct. 1992, pp. 2307-2310.
- [10] S. Akamine, Stanford University, Personal contribution.
- [11] H. Guckel and D. W. Burns, "Planar Processed Polysilicon Sealed Cavities for Pressure Transducer Arrays", *Technical Digest, IEEE Int. Electron Devices Meeting*, San Francisco, CA, U.S.A., Dec. 1984, pp. 223-227.
- [12] C. H. Mastrangelo and R. S. Muller, "Vacuum-Sealed Silicon Micromachined Incandescent Light Source", *Technical Digest, IEEE Int. Electron Devices Meeting*, Dec. 1989, pp. 503-506.
- [13] L. Lin, K. M. McNair, R. T. Howe, and A. P. Pisano, "Vacuum-Encapsulated Lateral Microresonators", *Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators(Transducers '93)*, Yokohama, Japan, June 1993, pp. 270-273.
- [14] C. J. Kim, A. P. Pisano, and R. S. Muller, "Silicon-Processed Overhanging Microripper", *J. Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, No. 1, March 1992, pp. 31-36.



김창진(金昌津)

1958년 9월 14일생, 1981년 서울대 기계공학과 졸업. 1983년 Rotary International Scholar로 도미. 1985년 Iowa State University 기계공학과 석사. 동대학 Graduate Research Excellence Award 수상. 1991년 University of California, Berkeley 기계공학과 박사. 1992년 동대학 및 1992-1993년 동경대학교 연구원. 현재 University of California, Los Angeles(UCLA) 기계항공원자핵공학과(Mechanical, Aerospace, and Nuclear Engineering Dept.)의 Assistant Professor로 재직. 전공 및 관심분야: MEMS전공. 마이크로 구조물, 액츄에이터, 센서등의 설계와 제작, 특히 마이크로가공 기술과 기계공학에의 응용에 관심이 있다.