

실리콘 센서와 구동기를 이용한 초소형 장치

梁 翔 植

亞洲大學校 制御工學科

I. 서 론

실리콘은 지난 30여년간 반도체의 대명사로 불리워질 정도로 마이크로 일렉트로닉 칩의 중요한 재료로 사용되어졌다. 실리콘은 단순히 집적 회로의 재료로 뿐만 아니라, 1960년대 초반에 실리콘으로 만든 초소형 압력센서^[1]의 개발 이후로 스트레인 게이지^[2] 및 이온 측정기^[3] 등의 센서 재료로서도 중요한 위치를 차지하고 있다. 1970년대 후반부터 1980년대에 이르기까지는 센서와 신호 처리 회로를 단일 실리콘 칩에 제조한 집적 센서^[4] 개발에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 이와 같이 실리콘이 널리 사용됨에 따라 그 공정 기술이 발달되었고, 또한, 초소형 기계 장치(micromechanical device)의 제작이 가능하게 되었다.

마이크로 머시닝(micromachining)이라 불리우는 초소형 기계 장치의 제작 기술은 마이크로 일렉트로닉 디바이스 제조 기술과 거의 동일하다. 다만 차이점은 초소형 기계 장치 내에는 물체의 이동 혹은 진동을 위한 공간이 있어야 하므로 3차원적인 구조를 만들기 위하여 식각 공정이 더욱 중요시 된다는 점이다. 한번의 혹은 여러 번의 식각 공정을 통하여 구멍, 홈, 혹, 구덩이, 박막, 킨틸레버 등의 3차원적인 형상을 0.5mm 정도 두께의 실리콘 웨이퍼 내에 제조할 수 있다.^[5] 이런 형상들을 가진 웨이퍼 한 장으로 혹은 여러장을 겹쳐서 모세관, 밸브, 노즐, 박막 등^[6]과 비틀림 거울^[7] 등의 초소형 기계 요소를 제작한다.

최근 몇년간에 걸쳐서는 정전(electrostatic) 모터^[8]와 정전 펌프 및 압축 공기(pneumatic) 터빈 등의 초소형 동력 전환 장치와 기어, 레버, 크랭크,

링크 장치 등^[9]의 동력 전달 장치가 제조되었다. 이 장치들의 크기는 수 마이크로에서 수백 마이크로에 이른다. 처음에는 각기 제조된 부품을 조립할 때 손으로 조작하였으나, 요즘에는 조립을 거치지 않고 일련의 제조 공정을 통하여 장치를 완성할 수 있을 정도로 재료와 공정기술이 혁신되고 있다. 따라서, 센서와 구동기(동력 전환기)를 위한 전자기계 장치, 신호 처리와 제어를 위한 전자 회로 및 동력 전달을 위한 기계 장치 등을 단일 실리콘 칩에 집적하여 제조할 수 있는 단계에 이르렀다. 이러한 집적 장치를 초소형 전자 기계 장치(microelectromechanical device)라 부른다.

현재 초소형 전자 기계 장치 분야에 관한 이해는 1940년대에 실리콘에 많은 전자회로를 집적하여 현재의 컴퓨터를 만들 수 있으리라고는 거의 상상하지 못했고, 또 그 공정 기술이 미숙했던 것과 같은 수준에 머물러 있다. 그러나, 많은 센서와 구동기(actuator)를 갖춘 마이크로 로봇은 우리가 지금 상상할 수 있는 범위 밖의 세밀한 작업을 할 수 있게 되며, 이는 큰 혁신임이 분명하다. 따라서, 이에 관한 많은 연구와 지원이 절실하다. 최근의 연구 동향과 해결해야 할 문제점 및 연구 방향 등을 2, 3장에 걸쳐 제시하고자 한다.

II. 최근의 연구 동향

1. 실리콘의 성질

실리콘은 원소 주기율표에서 금속과 비금속 사이에 있는 반도체 원소로서 표면에 실리콘 산화막이 쉽게 생성된다는 점에서 다른 반도체들과 대별된다.^[6] 실리콘 산화막은 화학적으로 불활성이고 전기적으로

절연성을 띄므로 마이크로 일렉트로닉 디바이스 제조 중에 보호막으로 쓰이고, 이 때문에 실리콘이 다른 반도체보다 널리 사용된다. 마이크로 머시닝에서도 실리콘 산화막이 널리 쓰이는 것은 같은 이유 때문이다.

단결정 실리콘은 집적 회로에서 요구되는 성질을 성질을 갖추고 있을 뿐만 아니라, 기계적인 성질¹⁰⁾ 면에서도 바람직하다. 단결정 실리콘은 취성이 있고 결정 방향으로 쪼개지나, 대부분의 금속보다 경도가 높다. 게다가, 단결정 실리콘은 기계적 응력에 잘 견딘다. 즉, 인장이나 압축의 경우 탄성 한계가 강철보다 더 높다. 한계에 다다르면 강철은 소성 변형을 하는 반면, 단결정 실리콘은 깨어진다. 마지막으로, 다결정 금속은 반복되는 인장과 압축에 응력이 쌓여 깨어지는 경향이 있으나, 단결정 실리콘은 반복 응력에 강하다.

GaAs를 제외한 다른 반도체에 비해 실리콘이 집적센서의 재료로 널리 쓰일 수 있는 이유는 트랜스듀서로 적합한 물리적 효과를 표 1과 같이 다양하게 갖추고 있기 때문이다. 그러나, 주파수 영역이나 감도가 적당치 않음으로 인해 표1에 나타난 물리적 효과가 현재 집적센서 분야에서 모두 이용되는 것은 아니다. 실리콘이 갖지 못한 물리적 효과가 필요하거나 갖고 있더라도 다른 재료에 비해 그 효과가 미약할 경우 실리콘 기판에 적당한 재료의 층을 증착하는 것이 보편적이다. 예를 들어, 피조일렉트릭 트랜스듀서로는 ZnO 필름을, 온도 센서로는 Ni-Cr 필름을, 가스센서로는 polymer 필름을, 자기 녹음 헤드로는 자성층을 증착한다. 다른 재료의 층을 증착하는 공정뿐만 아니라 실리콘 기판에 초소형 구조를 제조 가능케 하

는 식각공정이 현재 사용되는 실리콘 제조 공정과 크게 다를 바가 없다는 장점 때문에 실리콘이 집적센서로 널리 쓰일 수 있는 잠재력을 갖고 있다.

2. 마이크로 머시닝

실리콘 공정 기술에는 산화, 확산, 이온 주입, 화학 기상 증착, 사진 식각, 금속 공정 등이 있다. 이 중에서 마이크로 머시닝에서 자주 쓰이는 공정은 산화, 확산, 이온 주입, 사진 식각 공정이다. 또, 정전기력을 이용한 구동기나 센서, 혹은 전극등을 제조하기 위해서는 금속 공정이 필수적이다. 2장 이상의 웨이퍼를 쌓아 3차원적 구조를 만들 필요가 있을 때는 열접합 방법¹¹⁾을 사용한다. 실리콘과 실리콘, 혹은 실리콘과 유리, 유리와 금속 면을 서로 맞대고 포개어 열을 가하면서 양단에 고저압(800~1200V)을 걸어주면 접합되면서 밀봉 효과도 얻게 된다.

공정 기술 중 식각 공정은 3차원적 구조를 만들기 가장 핵심적인 공정이라 할 수 있다. 사진식각 과정은 보통 사진 현상과 흡사하게 시작한다. 실리콘 웨이퍼에 감광제를 도포하고 그 위에 마스크를 얹은 후 자외선을 쬐으면, 빛을 받은 부분의 감광제가 감광되어 현상 후에 양성 혹은 음성 감광제에 따라 마스크와 같은 혹은 정반대의 형태로 남게되며, 이 감광제 막이 실리콘 산화막 혹은 실리콘을 식각할 때 마스크로 작용하게 된다. 실리콘 결정 방향, 감광제 및 식각액의 종류 등을 선택하여 시간과 양을 적당히 조절하고, 식각 공정 중에 산화막 형성 및 실리콘 결정층 성장이나 붕소이온 주입 등의 공정을 적절히 배합함으로써 초소형 기계 장치 구성에 기본적인 요소가 되는 구멍이, 키틸레버, 구멍, 홈, 박막 등을 제조할 수 있다. 키틸레버나 스파이럴 모양의 스프링들은 진동 및 가속도 측정용 센서^{12,13)}로 쓰이거나, 유체의 흐름을 조절하는 밸브 역할을 할 수 있다. 또, 구멍이나 홈, 박막 등을 적절히 배치하면 노즐이나 모세관, 압력 센서, 거울 및 펌프 등을 구성할 수 있다.

3. 초소형 구동기

초소형 구동기는 에너지 전환 방법에 따라 피조일렉트릭 액츄에이터, 전자 구동기(electromagnetic driver) 및 압축 공기 구동기(pneumatic driver) 등 크게 3가지 종류로 구분할 수 있다. Kuhn¹⁴⁾은 그림 1과 같이 피조일렉트릭 펌프를 이용하여 잉크 제트 인쇄기를 제작하였고, Terry와 Jerman, Angell¹⁵⁾

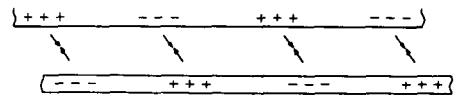
표 1. 실리콘의 물리·화학적 효과

| 신호영역 | 능동(Self-generating) 효과 | 수동(Modulating) 효과 |
|------------|---------------------------------|---|
| Radiant | Photovoltaic effect | Photoconductivity Photoelectric effect |
| Mechanical | Acoustoelastic effect | Piezoresistivity Lateral photovoltaic effect Lateral photoelectric effect |
| Thermal | Seeback effect Nernst effect | Thermoresistive effect |
| Magnetic | | Hall effect Magnetoresistance Suhl effect |
| Chemical | Galvano effect | Electrolytic conduction |

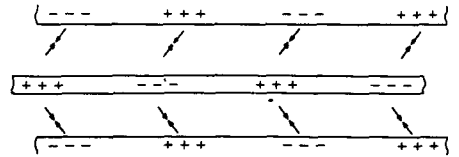
은 그림 2 와 같은 솔레노이드 밸브를 이용한 2in 웨이퍼 크기의 개스 크로마토 그래피 장치를 개발했다. 이와 같은 구동기는 1차원적이며 대개 작은 변위에 국한되어 있다. 최근에 주로 연구되고 있는 초소형 구동기는 전기 모터 (electric microactuator)이다. 기존의 모터에서는 자장에 의해 토오크가 발생되는 데 비해 초소형 모터에서는 전장에 의해 더 효율적으로 토오크가 발생될 수 있다고 한다.¹¹⁾ 초소형 전기 모터는 그림 3 과 같이 고정자와 회전자로 구성되며, 형태에 따라 그림 4 와 같은 회전형과 그림 5 와 같은 선형 모터로 구분할 수 있다. 초소형 모터에 관한 연구는 이제 시작 단계이고 이를 실제로 사용할 수 있기까지는 3장에서 언급될 전기적, 기계적인 제반 문제가 먼저 해결되어야 한다.

4. 초소형 전자 기계 장치의 예 및 응용 분야

초소형 전자 기계 장치의 다양한 예 중에서 단순하면서도 상업성이 있는 장치를 든다면 앞 절에서 소개한 잉크젯 인쇄기이다. Terry와 Jerman, Angell¹⁵⁾은 그림 6 과 같은 실용성이 있는 개스 크로마토 그

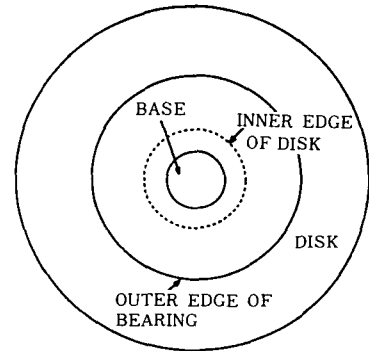


(a) Single stator

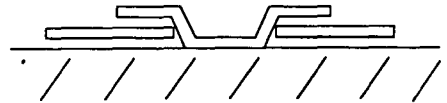


(b) Double stator

그림 3. 초소형 전기 모터 구조



(a) 평면도



(b) 단면도

그림 4. 초소형 회전형 전기 모터

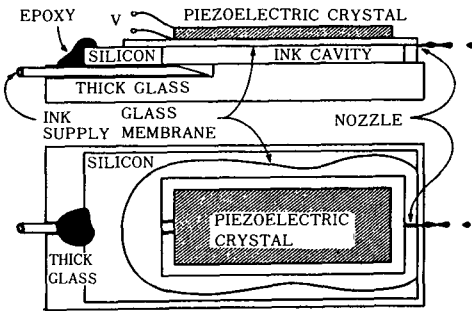


그림 1. 피이조일렉트릭 펌프를 이용한 잉크젯 인쇄기

UPPER STATOR ELECTRODES
THREE PHASES

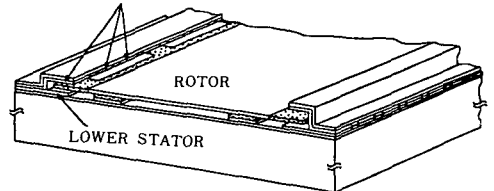


그림 5. 초소형 선형 전기 모터

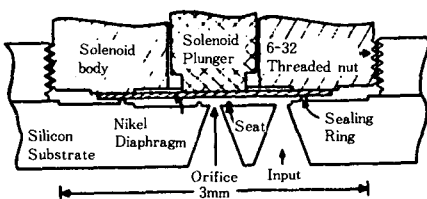
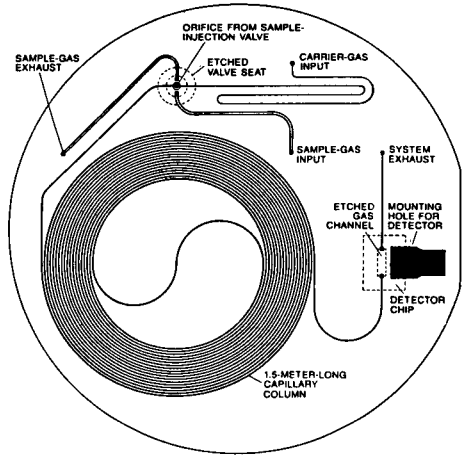


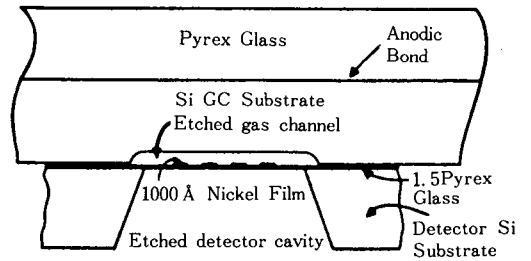
그림 2. 솔레노이드와 금속막막을 이용한 밸브

래피 장치를 개발했다. 길이가 1.5m인 모세관과 가스 조절 밸브, 검출기 등을 사진식각 공정으로 2in 실리콘 웨이퍼에 집적하였다. 샘플 개스가 모세관을 지날 때 각 성분마다 속도가 다르므로 시간의 경과에 따른 열전도율의 변화를 측정하여 가스의 성분을 분석할 수 있다. 이 외에도 다음과 같은 장치들이 개발되었다.

- Microminiature Cryogenic Refrigerators
- Microminiature Heat Sink for VLSI
- Torsional Scanning Mirror
- Resonant Gate Transistor
- Light Modulator Array
- Cantilever Beam Resonators
- Integrated Accelerometer
- Electromechanical Switches
- Thermal Printer
- Pressure Transducer and Catheter-Tip
- pH Sensor
- Ion-Sensitive Gas Sensor
- Miniature Optical Benches and Integrated Optics
- Microactuator



(a) Si 웨이퍼의 전체적인 배치도



(b) 열전도율 검출기

그림 6. 가스 크로마토그래피 장치

이와 같은 다양한 초소형 전자 기계 장치들이 개발되었으나, 장치의 성능, 신뢰명, 재료의 적합성 등의 문제들을 내포하고 있어 아직 부분적으로만 실용화되고 있다. 반면에 초소형 전자 기계 장치는 현재 사용되는 전자 기계 장치가 가질 수 없는 몇 가지 잇점이 있다. 실리콘 집적 회로 제작시 batch fabrication으로 칩의 생산 단가가 저렴해지듯이 초소형 전자 기계 장치의 생산 단가도 저렴하게 할 수 있다. 초소형 전자 기계 장치는 그 크기가 작은 잇점때문에 작은 양의 표본만으로도 작동 가능한 분석 기기, 혹은 작은 양을 측정하는 미세 측정기와 미세 조작이 요구되는 진단, 수술 및 치료용의 의료 장비에 그 이용 가능성이 높다. 산업 부문에서는 소량의 물질 제조시 측정 및 공정 제어, 조작 등을 가능하게 한다. 초소형 전자 기계 장치의 또 다른 잇점은 단일 칩내에 많은 똑같은 측정 장치들을 집적하여 신호를 통계적으로 처리함으로써 측정 정밀도를 높이거나, 일련의 유사한 측정장치들을 집적하여 분석 시간을 줄임으로써 실시간 신호 처리가 가능해질 수 있고, 신호 처리 회로가 함께 내장됨으로 인해 잡음이 적은 측정이 가능하다는 점이다. 이와 같은 장점때문에 아래와 같은 의학, 과학, 공학 및 전

산업분야에 걸쳐 실용 가능성이 크다.

- 대체 인공 기관
- 소형 치료 기구
- 검사 및 진단용 미세 조작기
- Microsurgery
- 광섬유 통신 분야
- 정밀 계측 및 분석 기기
- 정밀 산업 분야의 공정 제어
- Microrobot

장차 초소형 전자기계 장치는 장치의 개선을 통해 실용 분야가 더 넓어질 것이며 실용화 가능성은 다시 장치 개발을 가속화 할 것으로 예상된다.

III. 추후 연구 분야 및 방향

집적회로 공정 기술의 발달과 함께 각 단계의 공

정을 거친 후 시스템의 회로 해석에 관하여는 많은 연구가 되어 있으나, 각 요소의 형상과 기계적 성질의 변화를 예측하기 위한 이론적인 방법, 혹은 컴퓨터 시뮬레이션 방법에 관한 연구는 현재 전무하다 할 수 있다. 각 공정 후의 요소 기계요소 내부와 경계면의 열적 응력 분포 해석, 장치의 작동 중에 중력, 정전력 및 전자력 등의 정적 혹은 동적 하중으로 인한 기계적 응력 분포 및 진동 해석, 유체가 흐르는 부분의 유체역학적 해석, 접촉이 있는 부분의 마찰로 인한 마모 및 윤활에 관한 해석, 접촉 면에서 분자간의 인력으로 인한 부착 현상 등 장치의 제조 및 작동 중 발생하는 제반 문제에 관한 물리 및 기계공학적인 분석이 필수적이다.

제조와 작동 중의 모든 현상은 micro-world에서 일어난다. 기존의 기계요소를 단순히 크기만 축소하여 제작할 경우, macro-world에서 예측한 현상과는 다른 micro-world의 현상이 두드러지게 나타난다. 예를 들어, 초소형 구동기의 변위가 가스 분자의 평균 자유 행로(mean free path)에 점점 접근할수록 공기와의 마찰로 인한 점성 저항이 작아진다. Macro-world에서는 점성 저항이 속도의 제곱에 비례하는 근사식을 주로 이용하나 micro-world에서는 그 관계식을 그대로 적용할 수 없다. 이와 같이 물리적 혹은 전기적인 현상을 지배하는 주된 요인이 바뀌는 경계를 확인하고, micro-world에서의 해석에 근거하여 제조 및 작동 중의 시스템의 상태를 예측하고 이를 설계시에 고려함은 물론, 모든 설계 조건을 통합하고 조정하는 design tool의 개발이 요구된다.

그러나, 위와 같은 설계 방식으로는 형태상 제한된 크기의 기계요소 설계에 그치게 되고, macro-world의 기계요소와 구동기 형태가 효과적으로 적용될 수 없다. 이를 보완하기 위해서는 새로운 시스템 개념의 개발이 필요하다. Micro-world의 시스템 구성에 적합한 새로운 기계요소와 구동기의 개발을 위해서는 창의적인 연구가 수행되어야 하며, 특히 인간을 비롯한 각종 생물의 기관들의 생물학적 구조로부터 풍부한 지혜를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 새로운 시스템 개념은 설계상의 새로운 접근 방향을 제시하고, 또 새로운 설계 이론을 창출하게 될 것이다.

초소형 전자 기계 장치의 개발과 함께 병행되어야 할 대표적인 분야들 중 하나는 정보 전달 시스템이다. 초소형 장치는 array 구조로 다량의 신호 측정 및 처리가 가능하므로, 인간과 기계 간에, 혹은 micro-world와 macro-world간에 전기적으로나 기계적


으로 대량 정보 교환이 이루어지도록 인터페이스를 갖추어야 한다. 이외에도 새로운 측정 및 구동 시스템의 개발을 위해서나, 초소형 장치를 대체 인공 장치에 이용하기 위해서는 이에 적합한 신소재의 개발이 뒷받침되어야 한다.

IV. 결 론

실리콘 집적 회로 기술의 발달이 전자 산업 분야 뿐만 아니라 전 과학 및 공학에 끼친 영향을 볼 때, 과학 문명의 혁명이라 일컬을 수 있듯이, 초소형 전자 기계 장치의 개발은 과학 문명사에 또다른 전환점이 될 것으로 크게 기대된다. 초소형 전자 기계 장치의 개발과 실용화는 첨단 과학 기술의 발달에 의존하며, 또 역으로 첨단 과학 기술의 발달을 촉진하는 신기술 분야임이 분명하다. 이 장치의 개발과 발달을 위해서는 과학 및 공학 전반에 걸친 분야에서 타 분야와의 긴밀한 협조가 필수적이며, 개발에 따른 연구비가 적극적으로 지원되어야 한다.

參 考 文 獻

- [1] O.N. Tufte, P.W. Chapman and D. Long, "Silicon diffused-element piezoresistive diaphragms," *J. of Appl. Phys.*, vol. 33, no. 11, pp. 3322-3327, Nov. 1962.
- [2] H.C. Tuan, J.S. Yanacopoulos and T.A. Nunn, *Piezoresistive Force Sensors for Observing Muscle Contraction*, Stanford Univ. Electron Res. Rev., p. 102, 1975.
- [3] I.R. Lauks and J.N. Zemel, "The Si₃N₄/Si ion-sensitive semiconductor electrode," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, no. 12, pp. 1959-1964, Dec. 1979.
- [4] S. Middelhoek, J.B. Angell and D.J.W. Noorlag, "Microprocessors get integrated sensors," *IEEE Spectrum*, vol. 17, p. 42, Feb. 1980.
- [5] E. Bassous, "Fabrication of novel three-dimensional microstructures by the anisotropic etching of (100) and (110) silicon," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-25, no. 10, pp. 1178-1185, 1978.
- [6] J.B. Angell, S.C. Terry and P.W. Barth, *Silicon Micromechanical Devices*, Scientific American, pp. 44-55, April 1983.
- [7] K.E. Petersen, "Silicon torsional scanning mirror," *IBM J. Res. Dev.*, vol. 24, no. 5, pp. 631-637, Sep. 1980.

- [8] B. Bollee, "Electrostatic motors," *Philips Technical Review*, vol. 30, pp. 178-194, 1969.
- [9] L.S. Fan, Y.C. Tai and R.S. Muller, *Pin Joints, Gears, Springs, Cranks, and other Novel Micromechanical Structures*, Tech. Digest, Transducers, Tokyo, Japan, pp. 849-852, June 1987.
- [10] K.E. Petersen, "Silicon as a mechanical material," *Proc. of IEEE*, vol. 70, no. 5, pp. 420-457, May 1982.
- [11] P.B. DeNee, "Low energy metal-glass bonding," *J. Appl. Phys.*, vol. 40, p. 5396, 1969.
- [12] P.L. Chen, R.S. Muller, R.D. Jolly, G.L. Halac, R.M. White, A.P. Andrews, T.C. Lim and M.E. Motamedi, "Integrated silicon microbeam PI-FET Accelerometer," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-29, no. 1, pp. 27-33, Jan. 1982.
- [13] L.M. Roylance and J.B. Angell, "A batch-fabricated silicon accelerometer," *IEEE Trans., Electron Devices*, vol. ED-26, no. 12, pp. 1911-1917, Dec. 1979.
- [14] L. Kuhn, E. Bassous and R. Lane, "Silicon charge electrode array for ink-jet structure," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-25, p. 1257, 1978.
- [15] S.C. Terry, J.H. Jerman and J.B. Angell, "A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, no. 12, pp. 1880-1886, Dec. 1979.
- [16] S.F. Bart, T.A. Lober, R.T. Howe, J.H. Lang and M.F. Schlecht, "Design considerations for micromachined electric actuators," *Sensors and Actuators*, vol. 14, pp. 269-292, 1988. 

筆 者 紹 介


梁 翔 植

1958年 1月 16日生

1980年 2月 서울대학교 공과대학 기계공학과(공학학사)

1983年 2月 서울대학교 공과대학 기계공학과(공학석사)

1988年 2月 University of California, Berkeley 기계공학(공학박사)

1988年 3月~1989年 2月 New Jersey Institute of Technology 연구 조교수

1989年 3月~현재 아주대 공과대학 제어공학과 조교수