

## 동경대학 생산기술연구소 후지타 연구실의 마이크로 시스템 연구



양의혁

미국 NASA Jet Propulsion Laboratory, Research Associate.

### 1. 서 론

본 연구실에서는, 기계적 소자와 전기적 소자를 소형화하여, 집적하는 시스템을 연구하고 있다. 주로, 반도체 가공기술에 의하여 제작되는 마이크로 액츄에이터와 전자회로 혹은 센서를 집적화한 시스템을 중심으로 연구를 추진하고 있다. 마이크로 시스템의 장점은 그 크기가 작다는 것에만 국한되는 것이 아니고, 여러 개의 미세소자가 집적 센서, 전자회로, 액츄에이터와 함께 동시에 제작되고 사용될 수 있다는 데 있다. 이러한 장점을 살리기 위하여, 후지타 그룹에서는 병렬협조형 마이크로 시스템을 중심으로, 마이크로 액츄에이터의 제작 및 구동과 마이크로머시닝 프로세스 기술진반에 관한 연구를 추진 중에 있다.

지금까지, 그림 1과 같은 직경 100 마이크로론의 정전형 마이크로 모터[1]와, 초전도체의 마이너스

효과를 이용한 초전도 자기부상 마이크로 액츄에이터[2, 3] 등의 디바이스 제작과 동작의 확인을 실행하였다. 또한, 여러 가지 마이크로 액츄에이터를 실리콘 기판에 어레이형으로 구성하고, 물체를 운송하는 인공섬모 시스템[4]의 제작에 성공하고 동작을 확인하여, 병렬협조형 마이크로머신의 개념을 증명하였다. 또한, 응용디바이스로서 진공터널전류를 이용한 초고감도 변위센서[5,6]와, 광초퍼[7,8], 2x2 매트릭스 광스위치[9], 진공 마이크로 일렉트로닉스에 의한 평면디스플레이[10] 등을 제작하여, 양호한 성능을 보이는 것을 입증하였다. 그러나, 병렬협조형 마이크로머신에는 다수의 액츄에이터를 제어하기 위한, 센서와 전자회로의 집적화 공정의 문제가 있기에, 앞으로는 이것들을 포함하는 진정한 마이크로 메카트로닉스 기술을 추구하고 있다. 또한 기술의 발전과 실용화를 위하여, 종래의 시스템과 비교하여 마이크로 시스템이 진정으로 유리하다는 사실을 다양한 응용분야에



그림 1. 정전형 니켈 마이크로 모터  
서 나타내는 것이 과제로 남아있

다. 이를 위하여, 앞으로는 광시스템, 대용량 정보기억장치, 디스플레이 등의 유망한 응용분야를 중심으로 실용적인 마이크로 시스템을 연구하려 하고 있다.

### 2. 연구실 구성과 설비

현재 연구실에는 교수 2명(후지타 교수, 토시요시 강사), 기술관 2명, 대학원생 6명(외국인 2명 포함), 외국인 객원연구원 5명, 공동연구원 1명, 비서 3명이 있다. 국적의 분포는 일본 10명, 프랑스 4명, 한국 2명, 독일 1명, 중국 1명, 스위스 1명이며, 연구실의 회의는 영어로 진행된다.

연구설비로는 마이크로머시닝을 위한 양면정합, 스테퍼, 건식/습식 식각, 전기도금, RF/DC 스퍼터, 금속증착, 이온주입, 저압 화학기상증착, 실리콘 기판의 절삭 및 연마, 양극접합, 이온빔 증착, YAG 레이저 등의 장비와, 관찰 및 측정용을 위한 광학 현미경, 전자주사현미경, 표면단차측정기, 엘립소미터, 레이저 간섭계, 주사열량 측정계 등에 이르는 마이크로머시닝 설비를 갖추고 있어, 아이디어를 바로 디바이스화 하여 실험할 수 있도록 운영하고 있다.

### 3. 동경대 생산기술연구소와 프랑스 과학연구센터(CNRS)와의 공동연구

동경대학 생산기술연구소와 프랑스 과학기술연구소(CNRS)는 마이크로메카트로닉스에 관련된 공

동연구 프로젝트를 실행하고 있다. 생산기술연구소 내에 집적화 마이크로 메카트로닉스 시스템 연구실(LIMMS)과의 공동연구조직을 설립하여, 마이크로머신과 시스템을 연구하고 있다. CNRS에서 파견된 연구원은 생산기술연구소의 마이크로 메카트로닉스 연구 그룹의 교수 및 연구원들과 공동 연구를 실행하며, 마이크로머신과 마이크로 일렉트로닉스를 통합한 마이크로 메카트로닉스 시스템을 연구하고 있다. 개별 연구 프로젝트에서는 마이크로머싱, 즉, 초미세 기계가공기술, 새로운 액츄에이터와 센서의 개발 및 원자레벨의 주사프로브 시스템을 다루고 있다.

#### 4. 연구테마

본 고에서는 주로 최근의 연구를 중심으로 몇몇 주요 연구테마들을 소개하기로 한다.

#### 4.1 반도체 미세가공에 의한 병렬협조형 마이크로 시스템

##### 4.1.1 마이크로 인공섬모 시스템

반도체 마이크로머싱기술의 장점의 한가지인 「미세한 운동기구를 동시에 여러 개를 만들 수 있다」라는 특징을 살려서, 다수의 마이크로 액츄에이터가 협조하여 하나의 시스템을 이루는 병렬협조형 마이크로 시스템을 제안하였다. 다수의 액츄에이터를 실리콘 기판 위에 배열하여 그 위에 놓인 물체를 이동시키는 것이 가능하다. 그림 2는 폴리이미드와 금속전극으로 이루어진 인공 섬모 시스템의 구조를 나타낸다[4]. 제어회로와 액츄에이터를 포함한 모듈을 평면적으로 배열하여, 물체가 이동할 위치와 자세를 지시하

는 것만으로, 지시에 따른 움직임을 실행하는 기구, 즉, 자율분산 마이크로시스템(ADS)을 위한 제어법의 구현을 위한 유전적 알고리즘을 개발하고 있다[11,12]. 그림 3에 그에 대한 간단한 설명도를 보인다. ADS는 여러 개의 디바이스 제작이 가능하나 각각의 디바이스의 힘과 동작범위가 제한된 시스템, 즉, 마이크로 시스템으로의 적용에 적합하다.

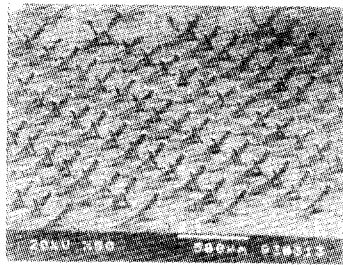


그림 2. 자율분산 운송 시스템을 위한 폴리이미드 액츄에이터

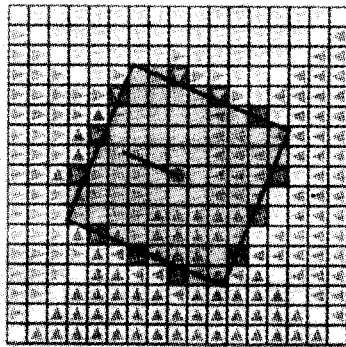


그림 3. 자율분산 운송 시스템을 위한 시뮬레이션

##### 4.1.2 소형 자기부상 운송 시스템

미세한 전극패턴과 절연박막을 이용하여, 소형 액츄에이터의 개발을 실행하였다. 세라믹계 초전도체 마이너스효과를 이용한 소형

액츄에이터로서, 초전도물질의 마이너스효과에 따라 영구자석이 초전도체에 반발하는 힘으로 자기부상하여, 전자력에 따른 중형 2 방향으로 이동하는 기구를 고안하였다(그림 4). 구동 정도의 향상과 회전운동 등에 관하여 실험적인 검증을 행하였다.

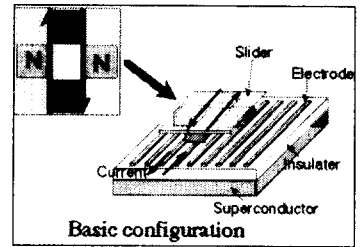


그림 4. 초전도 자기부상을 이용한 소형 운송 시스템

#### 4.2 마이크로머싱 프로세스 기술의 연구

##### 4.2.1 박막형 형상기억합금 마이크로 액츄에이터

박막형 형상기억합금 액츄에이터(이하 SMA)를 이용한 초소형 구동 메커니즘을 구현하였다. 이 액츄에이터에서 발생하는 힘은 기존의 정전 또는 바이메탈형 구동기의 그것을 훨씬 능가한다. 선(wire) 타입 혹은 벌크(bulk)타입의 SMA 액츄에이터가 다른 구조물과의 집적이 어려운 데 반하여, 박막형 SMA 액츄에이터는 센서, 전자회로, 또는 다른 마이크로 기계구조와의 집적화에 유리하다. 스퍼터(sputtering) 및 리프트 오프(lift-off) 기술에 의하여, 그림 5와 같은 액츄에이터의 제작이 가능하다[13]. 이러한 기술을 실리콘 벌크 마이크로머싱 기술과 혼합하여, 미세 광 스위치의 개발을 실행 중에 있다.[14]

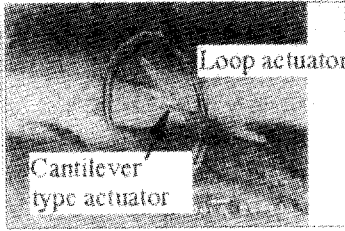


그림 5. 박막형 형상기억합금 마이크로 액츄에이터

#### 4.2.2 주울 열에 의한 실리콘의 소성변형을 이용한 3차원 구조

##### 4.2.2.1 미세 3차원 구조를 위한 자체조립 메커니즘

기존의 반도체 마이크로머시닝 기술로 제작된 구조물을, 집적화된 액츄에이터를 이용하여 들어올리고, 구조물의 길이방향으로 전류를 흘려 주울 열(Joule Heat)에 의하여 미세 지지보를 가열함으로써, 3차원적인 미세구조물의 자체조립 메커니즘을 구현하는 새로운 기술을 개발하였다[15]. 폴리실리콘 미세 보는 실온에서는 탄성의 성질, 즉 응력과 변형의 정도가 비례하며 응력의 정도가 한계치를 넘어가게 되면 소성변형 없이 부러지는 성질을 가지고 있으나, 섭씨 650도 이상의 고온에서는 응력의 정도가 한계치에 도달할 경우 부러짐이 없이 소성변형을 일으킨다[16]. 그림 6은 그 개념도를 나타낸다. 처음의 구조는 그림 6(a)와 같이 표면가공 기술에 의하여 제작된 폴리실리콘 평판으로 구성되어 있다. 그림 6(b)와 같이 SDA(scratch drive actuator)로 불리는 액츄에이터에 의하여 빔을 밀어서 탄성변형시킨다[17]. 영구적인 3차원 구조를 얻기 위하여, 그림 6(c)와 같이 적류 전류를 인가하여 주울 열에 의

하여 보의 원하는 부분만을 가열함으로써 소성변형을 일으켜, 3차원적인 미세구조를 구현한다. 이때, SDA의 위치는 또 다른 직류바이어스에 의하여 고정된다. 궁극적으로, 모든 바이어스를 제거한 후, 그림 6(d)와 같이 아무런 외부의 힘에 의지하지 않고도 영구적인 3차원적 형태의 구조가 구현될 수 있다. 그림 7은 자체조립된 3차원 미세구조의 전자주사현미경(SEM) 사진이다.

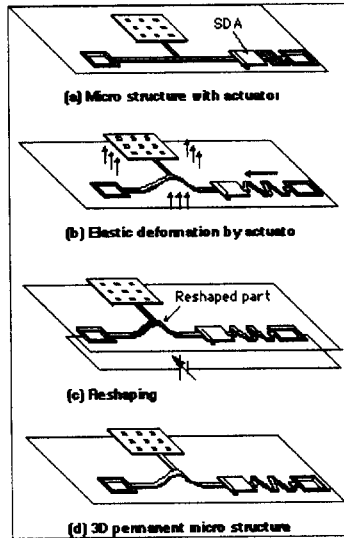


그림 6. 미세 자체조립 구조

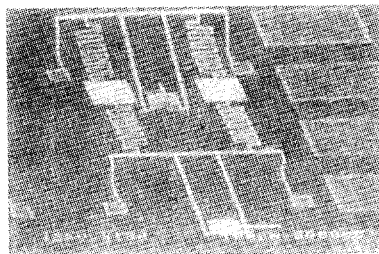


그림 7. 자체조립된 미세구조의 전자현미경 사진

##### 4.2.2.2 소성변형에 따른 폴리실리콘의 탄성계수 변화의 측정

3차원 구조물의 제작할 때 수반되는 실리콘 빔의 소성변형시, 소성변형 전과 후의 탄성계수(Young's modulus)의 변화를 알아보기 위하여 그림 8과 같은 U-자형의 미세 보를 제작하여 주울 열을 가하기 전과 후의 공진 주파수를 각각 측정하였다[18]. 그 결과, 탄성계수는 소성변형 후에도 거의 변함이 없음이 밝혀졌다.

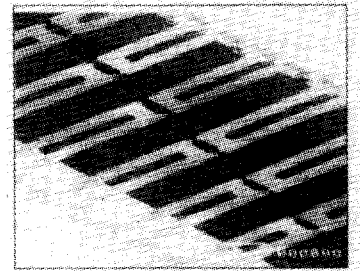


그림 8. 탄성계수 측정을 위한 U-자형 미세 보

#### 4.3 마이크로 액츄에이터 및 디바이스로의 응용

##### 4.3.1 마이크로 광학 시스템

###### 4.3.1.1 수정을 이용한 압전 초퍼

수정의 특성, 즉, 투명성, 압전성이 있으며 마이크로머시닝이 가능하다는 특성을 살린 마이크로 액츄에이터를 개발하였다[7,8]. 이 초퍼는 그림 9와 같이, 주입 광을 차단하는 홀을 가진 초퍼 판과 그 초퍼 판을 수정의 압전효과를 이용하여 공진주파수에서 구동하는 네 개의 받침대로 이루어져 있다. 압전성을 이용하여, 가동부를 지지하는 보에 전계를 걸어, 가동부를 공진시킨다. 수정의 결정 X축을 따라 인가되는 전기장이 Y축으로의 기계적 응력을 발생시킨다. 이러한 방식에 의하여 간단한 구조로 커다란 변위를 얻을 수 있

다. 미소광학에의 응용을 목표로 하여, 광센서용 초퍼를 제작하여 양호한 동작을 확인하였다.

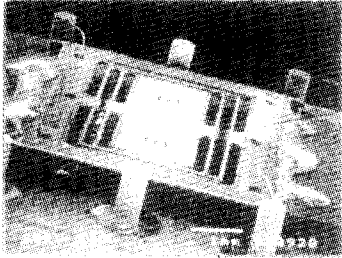


그림 9. 마이크로 광초퍼의 전자현미경 사진

#### 4.3.1.2 미세 광학 스위치

기계적 광학 스위치는 파장과 극성에 무관하고 대비가 크며 혼선이 적다는 장점을 가지고 있다. 이러한 관점에서 마이크로머시닝 기술에 의한 기계적 미세 광학 스위치를 개발하였다[9]. 그림 10은 정전력으로 구동되는 비틀림 거울(Torsion-mirror)을 실리콘 기판에 집적화한 2x2 광학 스위치의 전자현미경 사진이다. 폴리실리콘과 크롬/금으로 이루어진 미세 거울을 지지하기 위한 약 0.4 마이크로미터 두께의 폴리실리콘 빔의 비틀림을 이용하여, 주입된 빔의 방향을 90도 각도로 바꾸어 주는 미세 거울 매트릭스의 구성이 가

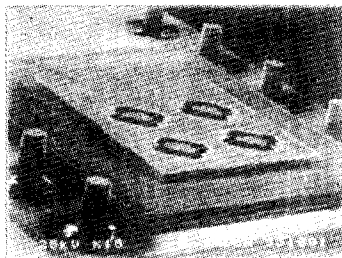


그림 10. 마이크로 거울 매트릭스 스위치

능하다. 현재, 본 디바이스의 광통신 네트워크로의 응용을 위하여 개발을 진행하고 있다

#### 4.3.2 하드디스크 헤드 구동용 마이크로 정전 액츄에이터

하드디스크 드라이브(HDD)의 저장밀도는 매년 60% 가량 증가하는 반면, 디스크의 크기는 작아지고 있다. 이 경우 헤드의 정확한 위치설정이 매우 중요하므로, 높은 트래킹 밀도를 이루기 위한 2단 서보 시스템 액츄에이터를 제안하였다[19]. 여러 개의 평행판 전극으로 이루어진 정전형 액츄에이터를 LIGA 기술과 DRIE(Deep Reactive Ion Etching) 기술을 이용하여 각각 제작하였다. 현재의 HDD 시스템에 요구되는 약 40 KTPI(Track Per Inch)의 요건을 갖추기 위하여 자기헤드 슬라이더의 끝 가장자리에 액츄에이터가 위치하고, 그 액츄에이터 위에 자기헤드 요소가 부착된다. 그림 11은 기본 개념의 설명을 위한 구조도를 나타낸다. 이 액츄에이터는 히스테리시스와 자기유동이 없고, 발생력이 비교적 크다.

DRIE 기술을 이용하여 40 KTPI의 요건을 갖춘 마이크로 액츄에이터를 개발하였다. 또한,

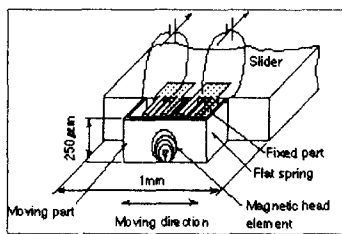


그림 11. 하드디스크 헤드의 위치 조정을 위한 마이크로 액츄에이터

LIGA 기술에 의하여 폭 2 마이크로미터, 높이 250 마이크로미터, 그리고 전

극간격이 14 마이크로미터로 약 125의 가로세로 비를 가진 니켈로 이루어진 액츄에이터를 개발하였다.[20]

#### 4.3.3 마이크로 메커니컬 스펙트럼 분석 시스템

보청 시스템 또는 발음 인식 등에 사용 가능한 인공 박막/빔 구조를 개발 중에 있다[21]. 그림 12에 그 기본 구조의 전자현미경 사진을 보인다. 이 구조는 소리신호의 실시간 스펙트럼 분석이 가능하도록 설계되어 있다. 컴퓨터 알고리즘에 바탕을 둔 스펙트럼 분석과는 달리, 마이크로 메커니컬 스펙트럼 분석기는 주파수 분해능을 잃지 않고 순간분해능을 개선할 수 있다는 장점이 있다. 따라서, 이 디바이스는 '교', '크', '트' 등과 같은 작은 출력을 가진 일정한 음을 인식하는 효과적 인 기구로 사용될 수 있다. 기본적인 원리는, 여러 개의 각각 다른 공진주파수를 갖는 연결된 외팔보들의 기계적 진동을 감지하여 스펙트럼

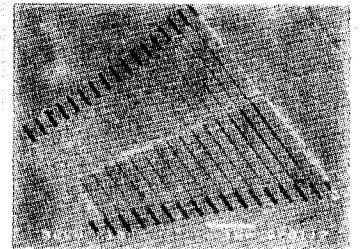


그림 12. 마이크로 스펙트럼 분석기의 전자현미경 사진

## 5. 결 론

상기와 같은 마이크로를 분석하는 것이다. 압전 PZT 액츄에이터로부터의 진동을 모세 유리관을 통하여 구조물에 가하고, 마이크로 CCD 카메라를 이용하여 스펙

트럼 분석을 위한 신호를 감지한다. 각 외팔보가 반응하는 위치는 인가 주파수에 따라 변하게 되는데, 현재 고감도의 센싱을 위하여 광학적 방법에 의한 감지법을 연구 중에 있다.

액츄에이터가 확실히 동작하고 있다. 앞으로는 제어를 위한 센서와 회로의 집적화와 실용화를 목표로 한 디바이스와 시스템 개발에 중점을 두려 하고 있다. 이를 위해서는 외부와의 공동연구가 필수적이라 생각된다.

### 감사의 글

본 원고를 위하여, 자료를 제공하여 주신 후지타 교수, 토시요시 교수, 그리고 후지타 그룹 연구원들께 감사를 드립니다.

### 6. 참고문헌

- [1] T. Furuhashi, T. Hirano, L.H. Lane, R. E. Fontana, L. S. Fan and H. Fujita, "Outer Rotor Surface-Micromachined Wobble Micromotor," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '93), Florida, USA, Feb. 7-10, 1993, pp. 161-166.
- [2] Y. K. Kim, M. Katsurai, H. Fujita, "A Levitation Type Linear Synchronous Micro Actuator using the Meissner effect of High-Tc Superconductors", Sensors and Actuators A, Vol. 29, pp. 143-150, 1991.
- [3] T. Iizuka, Y. Maeda, K. Aihara, H. Fujita, "A Micro X-Y- $\theta$  Conveyor by Superconducting Magnetic Levitation," IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation(ETFA '94), Tokyo, Japan, Nov. 6-10, 1994, pp. 62-67.
- [4] M. Ataka, A. Omodaka, N. Takeshima, H. Fujita, "Fabrication and Operation of Polyimide Bimorph Actuators for a Ciliary Motion System," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 2, pp. 156-150, Dec. 1993.
- [5] D. Kobayashi, H. Fujita, "Displacement Measurement by a Microfabricated Tunneling Unit," Trans. IEEJ, Vol. 116-E, pp. 297-302, Sept. 1996.
- [6] D. Kobayashi, H. Fujita, "Design, Fabrication and Operation of a Micro-machined Tunneling Control Unit," Trans. IEEJ, Vol. 116-E, pp. 339-344, Oct. 1996.
- [7] H. Toshiyoshi, H. Fujita, T. Kawai, T. Ueda, "A Piezoelectrically Operated Optical Chopper by Quartz Micromachining," Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '93), Yokohama, Japan, June 7-10, 1993, pp. 128-131.
- [8] H. Toshiyoshi, H. Fujita, T. Ueda, "A Self-excited Chopper made by Quartz Micromachining and its Application to an Optical Sensor", Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '94), Ohiso, Japan, Jan. 25-28, 1994, pp. 325-330.
- [9] H. Toshiyoshi, H. Fujita, "An Electrostatically Operated Torsion Mirror for Optical Switching Device", Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '95), Stockholm, Sweden, Jun. 25-29, 1995, pp. 68-71.
- [10] G. Hashiguchi, H. Mimura and H. Fujita, "Monolithic Fabrication and Electrical Characteristics of Polycrystalline Silicon Field Emitters and Thin Film Transistors," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 35, p. L84, 1996.
- [11] S. Konishi and H. Fujita, "System Design for Cooperative Control of a Microactuator Array," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 42, pp. 449-454, Oct. 1995.
- [12] I. Kohlbecker, H. Fujita, "Evolving Two-Dimensional Extended Cellular Automata for MEMS Application", Proc. 3rd France-Japan and 1st Europe-Asia Congress on Mechatronics (Mechatronics '96), Besancon, France, Oct. 1996, pp. 773-777.
- [13] Y. Nakamura, S. Nakamura, L. Buchaillet and H. Fujita, "A Three-Dimensional Shape Memory Alloy Loop Actuator," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '97), Nagoya, Japan, Jan. 1997, pp. 262-266.
- [14] E. H. Yang and H. Fujita, "Fabrication of Thin Film TiNi Shape Memory Alloy Microactuators for Optical Switching Applications," SPIE Int. Symp. on Micromachining

and Microfabrication, Sept. 1998, to be presented.

- [15] Y. Fukuta, D. Collard, T. Akiyama, E. H. Yang and H. Fujita, "Microactuated Self-Assembling of 3D Polysilicon Structures with Reshaping Technology," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '97), Nagoya, Japan, Jan. 1997, pp. 447-481.
- [16] Y. Fukuta, T. Akiyama and H. Fujita, "The Reshaping Technology for Three Dimensional Polysilicon Structures," Trans. IEEJ, Vol. 117-E, pp. 20-26, 1997.
- [17] T. Akiyama and H. Fujita, "A Quantitative Analysis of Scratch Drive Actuator using Buckling Motion," Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS '95), Amsterdam, The Netherlands, Jan. 1995, pp. 310-315.
- [18] E. H. Yang and H. Fujita, "Fabrication and Characterization of the U-shaped Beams for the Determination of the Modification of Young's Modulus after Joule Heating of Polysilicon Microstructures," IEEE Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers'97), Chicago, USA, June 1997, pp. 603-606.
- [19] S. Nakamura, K. Suzuki, M. Ataka and H. Fujita, "An Electrostatic Micro Actuator for a Magnetic Head Tracking System of Hard Disk Drive," IEEE Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '97), Chicago, USA, June 1997, pp. 1081-1084.
- [20] S. Nakamura, K. Suzuki, and H. Fujita, "A One-Body MEMS Device Composed of Mutually Insulated Metallic Part," Proc. IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '98), Heidelberg, Germany, Jan. 25-29, 1998, pp. 278-283.
- [21] M. Abe, S. Ando, et al., "A Study on Intelligent Resonator Array Microphone," IEEJ Tech. Digest of the 13th Sensor Symposium, Kawasaki, Japan, May 1995, pp. 217-220.

< 이 천 위원 >