

마이크로 머신으로의 초대(II)

김 용 권*

(*서울대학교 전기공학과 조교수)

마이크로 머신이란 글자 그대로 기계의 크기가 몹시 작은 기계를 의미한다. 기계전체의 크기가 1mm정도 혹은 그 이하인 기계를 마이크로 머신이라 일컫는 데, 이러한 기계들은 주로 아주 작고 가벼운 물체(예를 들면, 미생물체, 세포등)를 조작하거나, 아주 작은 물리량(예를 들면, 변위, 힘, 각도, 유량등)을 발생시키거나 측정하는 데 유리하다. 마이크로 머신으로의 초대(I) (전기학회잡지 1992년 11월호 기술해설 참조)에서는 마이크로 머신(MEMS, Micro Electro Mechanical Systems)의 대표적인 연구성과를 소개했고, 주요한 제작기술인 Surface micro machining과 MEMS의 개요 및 분류를 기술했다. 본 기술해설(II부)에서는 MEMS에 관련한 주요학술대회중의 하나인 IEEE Workshop을 소개하고, 1993년도 IEEE MEMS Workshop에서 발표된 연구를 중심으로 최근의 연구현황을 살펴보기로 한다.

1. IEEE MEMS Workshop

MEMS Workshop의 정식명칭은 IEEE International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems이다. 이 학술회는 IEEE Robotics and Automation Society의 지원(Sponsor)과 ASME Dynamic Systems and Control Division의 협조(Cooperation)로 매년 2월초에 열리고 있다. 1993년도의 제6회 Workshop은 미국의 플로리다주 휘

트로더데일이라는 휴양지에서 2월7일부터 2월10일까지 열렸다. MEMS Workshop은 다른 학술회와 비교해 볼 때 몇가지 특징을 가지고 있다. 첫째로 대회기간중 오직 하나의 Session만이 열린다는 점이다. 즉, 참가자는 모든 발표를 들을 수 있고, 토의할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 발표되는 논문편수는 50편정도로 제한을 두며 80-100편의 발표신청논문에서 심사를 통해 순위를 결정하여 Regular session, Poster session, Late news paper등으로 분류되어 발표된다. 둘째, VTR을 이용해서 미소한 기계의 동작을 2-3분간 직접 보여 주며 발표하는 경우가 많다. 이것은 연구의 초창기 시절에는 미소한 기계가 움직이는가 하는 것이 관심의 대상이었고 현미경 아래 또는 SEM안에서 움직이는 기계들의 특성을 측정할 기기가 마땅치 못한 점에도 기인한다. 셋째, 개최지를 대도시를 피해서 작은 휴양지를 택하며 Session이 이른 아침(8시)부터 시작되어 늦은 밤까지 계속 되어서 마치 합숙훈련을 하고 있다는 느낌을 주기도 한다. 과거에는 저녁식사후 7시부터 10시까지 Evening session이 열렸고 그후에 Poster session이 열린 적도 있었다. 제1-3회까지는 미국에서 열렸고, 제4회는 일본, 제5회는 독일에서 개최되었다. 제7회 1994년도 MEMS는 일본에서 개최하게 되었다. MEMS에 관한 Journal로는 IEEE MEMS Workshop의 논문을 모아놓은 IEEE Proceedings(Proceedings of IEEE Workshop on MEMS)가 있고, IEEE에

표 1. 국가별 논문 발표 현황

		U.S	Japan	Germany	Switzerland	Netherland	Korea	Total
Oral Session	Regular Presentation (25 min).	12	13			2	1	28
	Late News Paper (10 min)	2	1	2	2			7
Poster Session		10	5		1			16
Invited Talk (40 min.)			1	1				2
Total		24	20	3	3	2	1	53

서 1992년부터 발간하는 Journal of Microelectromechanical Systems가 있다. 또, Sensors and Actuators(A)와 Journal of Micromechanicals and Microengineering이라는 Journal이 있다.

2. MEMS '93

MEMS '93에는 53편의 논문이 발표되었고, 16 개국에서 255명의 연구자가 참가하였다. 발표된 논문수를 국가별로 분류해 보면 미국과 일본이 각각 40%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 논문을 발표한 연구기관을 First author를 중심으로 분류해 보면, 동경대학, M.I.T, Cornell Univ., 동북대학, G.I. T, N.T.T., U.C. at Berkeley, Univ. of Neuchatel, Univ. of Twente등이 주요한 연구기관이다. 또한 IBM도 동경대학과의 공동연구로 연구를 활발히 진행시키고 있다.

표4는 MEMS '93에 발표된 논문을 내용별로 분류해 놓은 것이다. 전체적인 흐름에 대해서 기술하면 마이크로 모터의 경우 실리콘을 재료로 하는 정전형 모터의 연구는 일단락 되어져가는 상태이고, 대신에 전자력을 구동력으로 하는 모터(그림1)[1,

2]가 연구되고 있으며, 그 밖의 구동력을 이용하는 초음파모터 및 유전체 유도모터[3, 4]도 연구되고 있다. 또한 정전력을 이용하지만 재료가 금속인 구리를 이용하는 모터[5]도 선보였다. 금속재료를 사용하는 경우 마모에 의한 손상이 적어서 5천만회의 회전후에도 동작에 이상을 발견할 수 없다고 보고되었다[2]. 이와 같이 재료와 제작방법에도 변화가 있어서 Poly silicon에서 Single silicon이나 Polyimide, 금속으로 재료가 바뀌고 있고, 금속을 재

표 2. 두편 이상의 논문을 발표한 연구기관

편수	연구 기관
6	U.of Tokyo (Japan)
4	M.I.T.(U.S), Cornell U.(U.S)
3	G.I.T.(U.S), N.T.T.(Japan), Tohoku U.(Japan) U.of Neuchatel(Switzerland)
2	Case Western Reserve U.(U.S), U.C. at Berkeley(U.S), Kyushu I.T.(Japan), U.of Twente(Netherlands)

표 3. 국가별 참가자 수

U.S	Japan	Germany	Switzerland	Netherland	Korea	Canada	U.K	Denmark	기타	Total
156	45	20	8	6	4	4	3	2	7	255

기타 : Spain, Italy, France, Israel, Australia, Belgium, China (각 1명)

표 4. 논문의 내역(Invited Talk인 2편 제외)

1. Motor :

- (1) Electromagnetically Driven Motor (제작 : Photo Lithography)
- (2) Electromagnetically Driven Motor (제작 : LIGA Process)
- (3) Hybrid Ultrasonic Motor
- (4) Dielectric Induction Motor
- (5) Electrostatic Motor (재료 : Cu)

2. Actuator :

- (1) Electrostatic Film Actuator (Slider에도 전극 구성)
- (2) Electrostatic Actuator (구조 : Parallel & Serial)
- (3) Electrostatic Force Array
- (4) Batch Fabricated Comb Electrostatic Actuator
- (5) Electrostatic Serial & Parallel Actuator (재료 : Si₃N₄ + W)
- (6) Step Motion Actuator
- (7) Electrothermal Active Cantilever & Membrane (구동 : RF)
- (8) Electrostatic Hollow Beam Resonator
- (9) Electrostatic Single Silicon Resonator
- (10) Micro Pump (제작 : LIGA Process)

3. Sensor :

- (1) Electrostatic Comb Gyroscope (재료 : Single Si, Poly Si, Ni)
- (2) Passive Strain Guage
- (3) Pressure Sensor
- (4) Flow Sensor

4. Application :

- (1) 3 Dimensional Electrostatic Dynamic Mirror
- (2) Electrostatic Micro Shutter and Mirror
- (3) Piezoelectrically Driven Micro Mirror (재료 : Quartz)
- (4) Electrostatic Optical Fiber Alignment
- (5) Electromagnetically Driven Micro Relays
- (6) Micro Mixer for Water and Dye
- (7) Micro Liquid-Dosing System (Pump+ Mixer+Flow Sensor)
- (8) Fluid Driven Micro Actuator with Fee-

dback Mechanism

5. Measurement :

- (1) PSG Etching in HF(Monitoring & Modeling)
- (2) Damping of Resonator (Measuring & Modeling)
- (3) Crack Growth in Silicon
- (4) Adhesive Forces of Liquids Measuring by AFM
- (5) Micro Motor Dynamics in Fluids

6. Micro Structure :

- (1) Beam (재료 : Single Si)
- (2) Comb (재료 : Single Si)
- (3) Electrode Array (제작 : Polyimide, Electroplating)
- (4) Transparent Flow Chamber
- (5) Beam for interferrometer
- (6) Corrugated Diaphragm (제작 : Boron Diffusion)

7. Fabrication Technique :

- (1) 3 Dimensional Forming (UV Hardened Resin)
- (2) 3 Dimensional Forming (Photo Hardened Resin)
- (3) Ion Milling (Single Mask Processing)
- (4) YAG Laser Assisted Etching
- (5) Magnetically Controlled RIE
- (6) Cryogenic Dry Etching (RIE)
- (7) Dry Release Method (Si, Polymer Column)
- (8) Dry Release Method (Cu, Photo Lithography and Electroplating)
- (9) Photo-Assisted Electrochemical Machining
- (10) Amorphous SiC Film(PECVD)

8. Energy Source & Transmission :

- (1) Micro Li Battery

9. CAD & CAE :

- (1) Electrical and Mechanical Design from Mask
- (2) Optimal Shape Design for SMA Structure

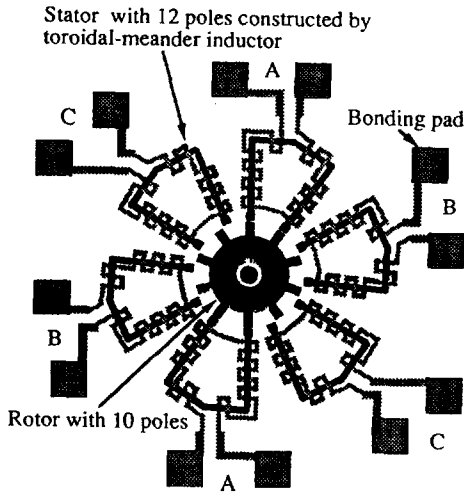
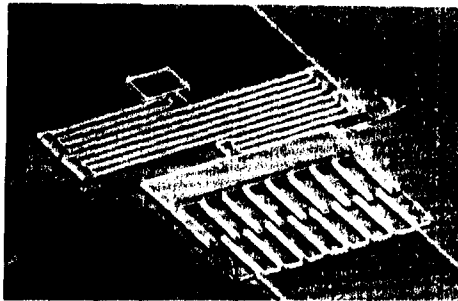
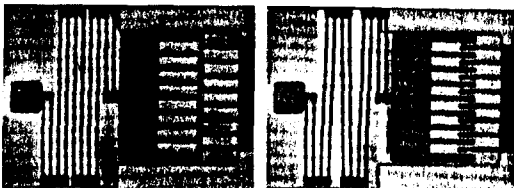


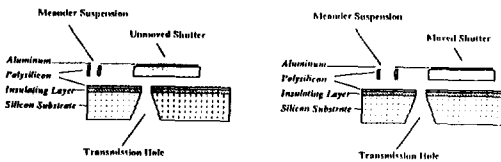
그림 1 평면 릴럭턴스형 마이크로 모터



(a) 위에서 본 사진

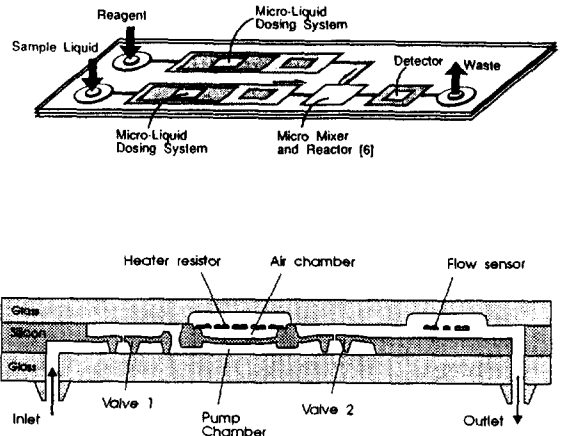


(b) 정지시와 동작시의 빛차단기

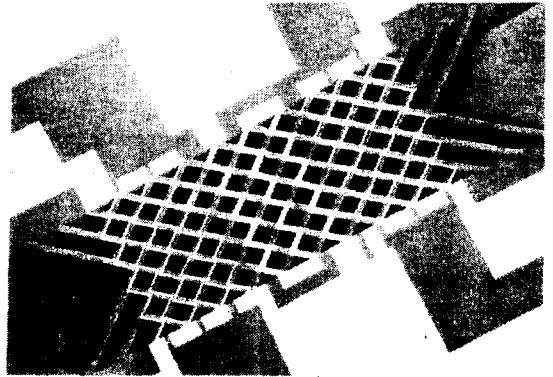


(c) 그 때의 단면도

그림 2 머리빗 모양의 정전액츄에이터를 이용한 빛 차단기



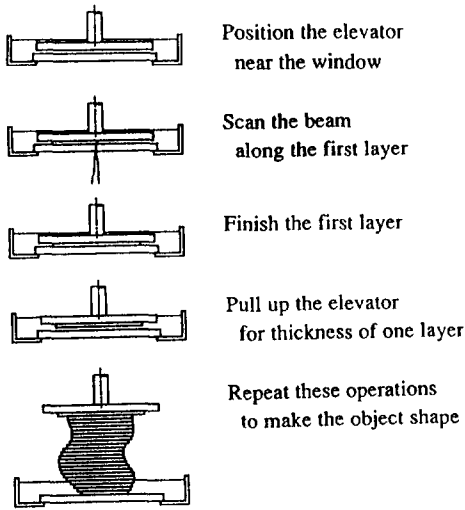
(b) 펌프의 단면도



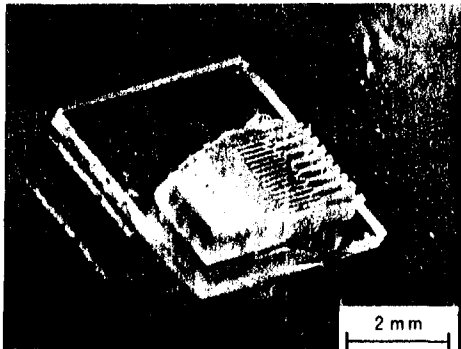
(c) 제작된 유량센서(통로의 폭 1mm)

그림 3 집적화된 마이크로 유체 시스템

료로 사용할 경우 Photo lithography, Polyimide의 Etching, Electroplating(전기도금)만으로도 구조물을 제작할 수 있게 되었다[1, 5-7]. 응용에 관한 논문으로는 광학에 관계되는 Micro mirror, Micro shutter(그림 2), Optical fiber alignment[8-11]등과, 유체에 관계되는 Micro mixer[12], Integrated micro liquid-dosing system(그림 3)[13]등이 있다. 측정에 관한 논문으로는 희생층인 PSG(Phosphosilicate-glass)가 에칭액인 HF에 의해서 녹는 정도를 측정하고 그것을 모델링한 논문[14]이 있으며, 점성유체안에서의 마이크로 모터의 동적특성을 측정한 논문[15]이 있



(a) 제작과정



(b) 제작된 머리빗

그림 4 빛이 닿으면 굳어지는 고분자를 이용한 3차원 구조물의 제작

다. 제작기술에 관한 논문으로는 자외선이나 레이저를 쬐이면 고체로 성형이 되는 고분자를 이용해서 3차원 구조물을 만드는 논문(그림 4)[16, 17], 자계로 RIE를 조절해서 형상비가 큰, 높은 구조물을 만드는 논문[18], 희생층을 녹여서 구조물을 기판으로 부터 분리할 때 Dry etching(Isotropic plasma etching)을 이용해서 가늘고 긴 구조물을 만드는 논문[7]등이 발표되었다. 한편 MEMS분야의 설계 및 제작시의 노력을 절약하기 위하여 Photo mask가 주어지면 이를 3차원으로 형상화

(PATRAN)시키고 기계적인 해석(ABAQUS)과 전기적인 해석(FASTCAP+)을 행하는 MEMS를 위한 Design tool[19]도 개발되었다.

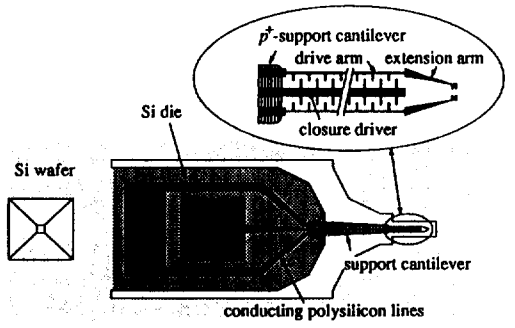
3. MEMS의 연구현황

3.1 마이크로 모터

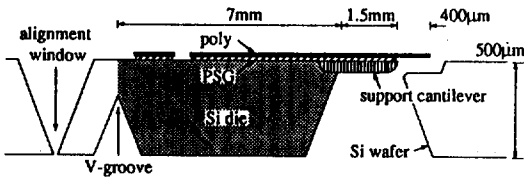
회전자의 직경이 $100\mu\text{m}$ 내외인 마이크로 모터는 초창기에는 정전형이 연구되었고, 최근에는 전자(電磁)형(그림 1)이 연구되고 있다. 정전형 모터의 경우 대부분이 재료가 Poly silicon인 데 반하여 [20], 전자형 모터는 재료가 금속(Ni, NiFe, Cu 등)이다[1, 2]. 이것은 Polyimide의 두꺼운 막($10\sim 40\mu\text{m}$)을 성형한 후, Photo lithography로 원하는 모양을 얻고 전기도금을 하는 방법으로 금속 구조물을 제작한다. 이 방법으로는 LIGA process와 같이 $100\sim 200\mu\text{m}$ 두께의 구조물은 얻을 수 없지만, 종래의 Photo lithography장치로 Poly silicon(두께 $2\sim 3\mu\text{m}$)보다는 두꺼운 구조물을 제작할 수 있다는 장점이 있다[1, 5, 7]. 또한 금속이므로 회전에 의한 마모도 크게 줄일 수 있다[2]. 마이크로 모터는 회전자의 질량이 극히 가벼우므로 10,000rpm 정도의 회전속도는 쉽사리 얻을 수 있다[2, 5, 7, 20].

3.2 머리빗 모양의 정전액츄에이터

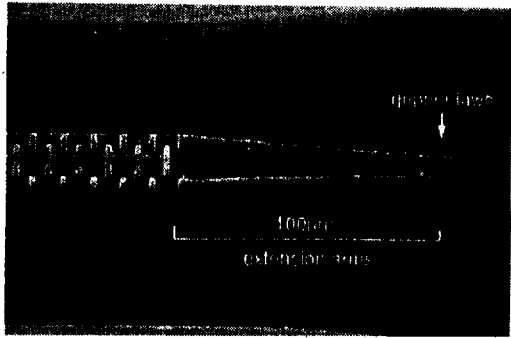
머리빗 모양의 정전액츄에이터는 1989년 MEMS Workshop에서 발표[21]된 이후 꾸준히 연구되어져왔다. 머리빗 모양의 정전액츄에이터가 꾸준히 연구되어져 온 이유는 동작부의 탄성변화에 의해서 변위가 일어나므로 마이크로 모터에서 문제가 되는 동작부와 고정부간의 마찰을 피할 수 있기 때문이다(마이크로 머신으로의 초대(I) 참조). 머리빗 모양의 정전액츄에이터의 연구로는, 구동전압을 낮추기 위해서 고정자와 진동자간의 간극을 $1\mu\text{m}$ 이하로 줄이는 제작방법[22], Bulk silicon으로 머리빗 모양의 정전액츄에이터를 제작한 연구[23], 정전진동자의 속을 비도록 제작해서 공진주파수를 크게 하는 연구[24], 진동자의 동작을 선형뿐만이 아니라 원호방향으로 동작시키거나 회전자를 회전시키는 연구[25, 26], 미소물체를 잡을 수 있도록 집계를 제작하여 머리빗 모양의 정전액츄에이터로 구동시



(a) 위에서 본 그림



(b) 단면도



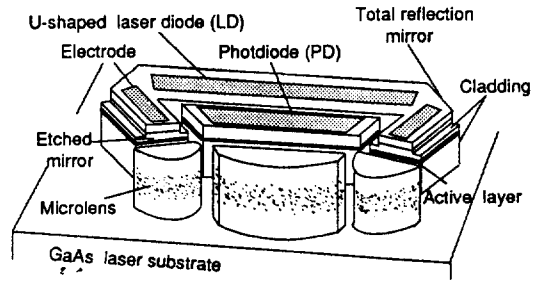
(c) 제작된 gripper

그림 5 머리빗 모양의 정전액츄에이터로 구동되는 Micro gripper

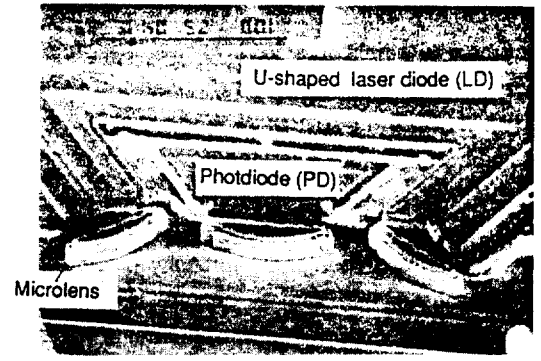
키는 Micro gripper[27](그림 5), 머리빗 모양의 정전진동자를 센서로 쓰는 연구[8, 29]등이 있다.

3.3 마이크로 광학기기

MEMS는 미세한 변위를 얻을 수 있으므로 광섬유의 위치를 조정하는 장치나 레이저등의 빛을 반사 또는 차단하는 장치에 응용되고 있다. 또, 레이저 다이오드와 광다이오드, 거울, 렌즈등을 집적화해서 제작하여 크기가 0.5x0.5mm인 Optical micro-encoder(그림 6)를 제작한 연구[30]가 있다. 광섬유의 위치를 조정하는 장치에 관한 연구로는, 정전력을 이용해서 광섬유를 이동시켜 스위칭



(a) 모식도



(b) 제작된 기구

그림 6 집적화된 Optical micro-encoder

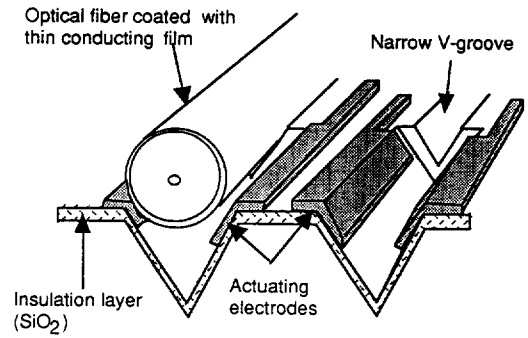


그림 7 광섬유의 위치를 조정하는 장치

을 하는 장치[31], 광섬유에 FeNi튜브를 씌운 후 자계를 인가해서 광섬유를 이동시켜 스위칭을 하는 장치[32], 정전력으로 광섬유를 접촉이 잘 되도록 이동시킨 후 자외선이 닿으면 굳어지는 접착제로 광섬유를 고정시키는 연구(그림 7)[11]등이 있다. 마이크로 거울이나 빛차단기에 관한 연구로는, 거울의 평면을 정전력으로 잡아당겨 변형을 일으켜 반사되는 빛이 촛점에 모이도록 하는 거울에 관한

연구[8], 머리빗 모양의 정전액츄에이터를 구동력으로 한 마이크로 빗차단기(그림 2)[9], 수정(Quartz)의 압전성을 이용해서 수정에 전계를 인가해서 거울이나 빗차단기를 움직이는 연구[10] 등이 있다.

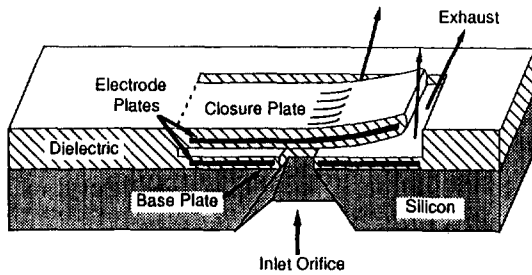
3.4 마이크로 유체시스템

유체에 관한 MEMS로는 유체의 흐름을 조작하는 밸브와 유체를 수송시키는 펌프, 이들을 집적화한 마이크로 시스템에 관한 것들이 있다. 정전력으로 25개의 밸브(5x5 array, 그림 8)를 개폐하여 유체의 흐름을 능동적으로 제어하는 밸브[33], 실리콘으로 진동부를 제작하고 압전소자로 구동시키는 펌프[34], 펌프실의 막을 탄성막으로 제작하고 이 막이 수축과 팽창을 반복하므로써 유체를 수송시키는 펌프(이 때 탄성막으로 펌프실과 저항선이 부착된 실이 분리되며 저항선에 의한 가열로 인해 탄성막이 팽창하여 펌프실의 압력을 높게 된다)[35] 등이 연구되었다. 그밖에도 압전소자의 표면탄성파를 이용하여 유체를 수송시키는 펌프[36], 펌프실을 일렬로 제작하고 각 펌프실의 탄성막을 순차적으로 레이저를 쬐여 열팽창시켜 유체를 수송시키는

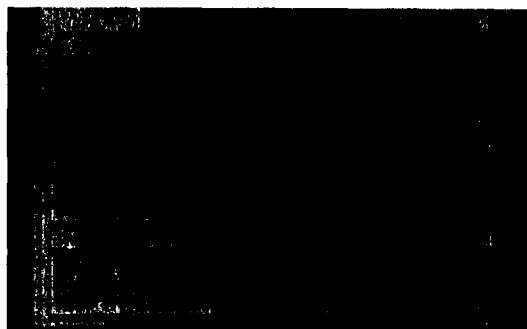


그림 9 LIGA process로 제작된 마이크로 터빈. 재료는 Ni이고 터빈의 직경은 150 μm , 높이는 130 μm , 축의 직경은 40 μm 이다.

펌프[37], 정전유체역학(EHD, Electrohydrodynamic)을 이용하여 밸브나 탄성막등의 동작부분이 없이 유체에 직접 힘을 가해 수송시키는 펌프[38-40]등에 관한 연구가 있다. 또, Cantilever를 움직여서 유체의 흐름을 바꾸는 장치[41], 적은 양의 두 유체를 짧은 시간에 골고루 섞는 마이크로 혼합기[12], 하나의 칩위에 두개의 펌프와 필터, 혼합기, 유량센서를 집적화한 마이크로 유체시스템에 관한 연구(그림 3)[13] 등이 있다.



(a) 밸브의 모식도

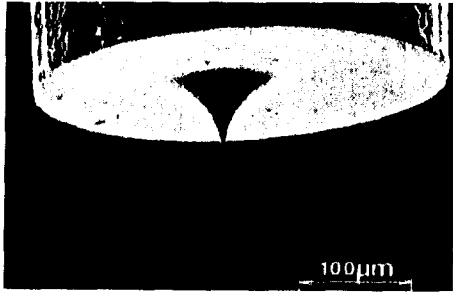
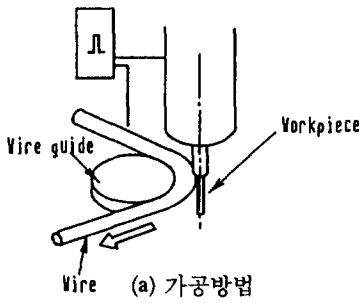


(b) 제작된 25개(5x5)의 밸브

그림 8 정전력으로 구동되는 능동밸브

3.5 마이크로 머시닝

MEMS를 제작하는 방법으로는 I부에서 기술했듯이 Silicon micro machining과 Non-silicon micro machining로 나뉘어지며, Silicon micro machining의 Bulk와 Surface micro machining에 대해서는 I부에서 기술했다. 여기서는 LIGA process와 Micro EDM(Electro-discharge machining)에 대해서 기술하기로 한다. LIGA라는 용어는 독일어의 Lithographie, Galvanoformung, Abformung의 머리글자이며, 사진식각(Photo lithography)을 하여 모양을 뜨고 전기도금(Galvanoformung, Electroplating)을 하여 금속구조물을 만들고, 이를 그대로 구조물로 사용하거나, 혹은 금형으로 사용하여 고분자물질의 형상을 떠서(Abformung, Moulding) 그것을 구조물로 사용하는 방법이다[42]. LIGA process로 제작된 구조물의 특징은 높이가 수백 μm 정도로 높고 폭이 좁은 구조물을 제작할 수 있다는 장점이 있으나(그림 9), 수백 μm 정도로 Photo resist를 감광시키자면 X-ray lithography가 필요하므로 장치에 의한 제



(b) 제작된 초소형 축. 직경이 4.3 μm 이고, 길이가 50 μm , 재료는 티탄카바이드이다.

그림 10 마이크로 방전가공

약이 있다. EDM이란 방전에 의한 가공법을 의미하며, 이 방법을 이용해서 마이크로 머신을 제작할 수도 있다[43]. 가공하려는 재료에 높은 전압을 인가해서 방전을 일으켜서 가공하는 방법으로 그림 10과 같은 초소형 축을 제작할 수 있다.

4. 맺음 말

마이크로 머신으로의 초대(I)[44]과 (II)에서 소개한 바와 같이, MEMS는 전기, 전자, 기계, 재료, 의공학등의 다분야의 지식과 기술을 요구하는 분야이다. 이들의 기술이 조화롭게 어우러질 때 비로소 창조적이고 응용성이 있는 공학적 연구가 될 것이다. MEMS의 연구가 과거의 기계를 단순히 소형화하려는 방향이라면 곧 현실의 벽에 직면하게 될 것이다. 즉, MEMS는 하나의 부품부품(예를 들면, 모터, 기어박스, 부하, 센서, 제어용 회로등)을 조립해서 구성하는 종래의 시스템처럼 하나의 부품을 개발했다고 곧바로 시스템의 구성요소로 쓰여지는 않는다. 하나의 부품을 개발하므로서 기술은 축적되겠지만 개발된 부품들로 시스템을 구성하는 것은 또다른 차원의 기술과 지식을 요구하기 때문이

다. 따라서, MEMS의 연구에서는 우선 최종적인 응용을 염두에 두고 그에 요구되는 요소기술을 개발하는 것이 필요하다. 이런 측면에서 MEMS가 아니면 할 수 없는 응용을 찾아내어 그러한 응용을 위한 마이크로 머신을 개발하는 것이 제작기술이 앞선 외국연구기관을 쫓아 가는 현명한 방법이라고 생각되며, 그러기 위해서는 여러 분야의 전문가가 공동으로 연구를 진행시키는 것이 바람직하다고 생각한다.

참 고 문 헌

- [1] Chong H.Ahn, Yong J.Kim and Mark Allen, "A planar variable reluctance magnetic micromotor with fully integrated stator and wrapped coils," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.1-6, 1993.
- [2] H.Guckel, T.R.Christenson, K.J.Skrobis, T.S.Jung, J.Klein, K.V.Hartojo and I. Widjaja, "A first functional current excited planar rotational magnetic micromotor," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.7-11, 1993.
- [3] B.Wagner, G.Fuhr, T.Muller, Th.Schnelle and W.Benecke, "Fluid-filled dielectric induction micromotor with Al-SiO₂ rotor," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 139-142, 1993.
- [4] G.A.Racine, R.Luthier and N.F.de Rooij, "Hybrid ultrasonic micromachined motors," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.128-132, 1993.
- [5] T.Furuhata, T.Hirano, L.H.Lane, R.E. fontana, L.S.Fan and H.Fujita, "Outer rotor surface-micromachined wobble micromotor," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.161-166, 1993.
- [6] A.Bruno Frazier, David P.O'Brien and Mark G. Allen, "Two dimensional metallic micro electrode arrays for extracellular stimulation and recording of neurons," Proc. IEEE MEMS Workshop,

- 195-200, 1993.
- [7] Toshiki Hirano, Tomotake Furuhashi and Hiroyuki Fujita, "Dry releasing of electroplated rotational and overlying structures," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.278-283, 1993.
- [8] Michio Hisanaga, Tsukasa Koumura and Tadashi Hattori, "Fabrication of 3-dimensionally shaped Si diaphragm dynamic focusing mirror," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.30-35, 1993.
- [9] V.P.Jaeklin, C.Linder, N.F. de Rooij, J.-M.Moret and R.Vuilleumier, "Optical microshutters and torsional micromirrors for light modulator arrays," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.124-127, 1993.
- [10] Hiroshi Toshiyoshi, Hiroyuki Fujita, Takachi Kawa and Toshitsugu Ueda, "Piezoelectrically operated actuators by Quartz micromachining for optical application," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.133-138, 1993.
- [11] Yukio Kikuya, Motohisa Hirano, Kunio Koyabu and Fumikazu Ohira, "Micro alignment machine for optical coupling," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.36-41, 1993.
- [12] Ryo Miyake, Theo S.J.Lammerink, Miko Elwenspoek and Jan H.J.Fluitman, "Micro mixer with fast diffusion," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.248-253, 1993.
- [13] Theo S.J.Lammerink, Miko Elwenspoek and Jan H.J.Fluitman, "Integrated micro-liquid dosing system," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.254-259, 1993.
- [14] Jianqiang Liu and Yu-Chong Tai, "In Situ monitoring and universal modelling of sacrificial PSG etching using hydrofluoric acid," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.71-76, 1993.
- [15] Keren Deng, Vijay R.Dhuler and Mehran Mehregany, "Measurement of micromotor dynamic in lubricating fluids," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.260-264, 1993.
- [16] Koji Ikuta and Ken Hirowatari, "Real three dimensional micro fabrication using stereo lithography and metal molding," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.42-47, 1993.
- [17] Tarou Takagi and Naomasa Nakajima, "Photoforming applied to fine machining," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.173-178, 1993.
- [18] Akinori Furuya, Fusao Shimokawa Tohru Matsuura and Renshi Sawada, "Micro-grid fabrication of fluorinated polyimide by using magnetically controlled reactive ion etching (MC-RIE)," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.59-64, 1993.
- [19] J.R.Gilbert, P.M.Osterberg, R.M.Harris, D.O.Ouma, X.Cai, A.Pfajfer, J.White and S.D.Senturia, "Implementation of a MEMCAD system for electrostatic and mechanical analysis of complex structures from mask descriptions," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.207-212, 1993.
- [20] Mehran Mehregany, Pradnya Nagarkar, Stephan D.Senturia and Jeffrey H.Lang, "Operation of microfabricated harmonic and ordinary side-drive motors," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.1-8, 1990
- [21] William C.Tang, Tu-Cuong H.Nguyen and Roger T.Howe, "Laterally driven polysilicon resonant microstructures," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.53-59, 1989.
- [22] Toshiki Hirano, Tomotake Furuhashi, Kaigham J.Gabriel and Hiroyuki Fujita, "Design, fabrication, and operation of sub-micron gap comb-drive microactuators," J. of Microelectromechanical Systems, Vol.1, No.1, 52-59, 1992.
- [23] Yogesh B.Gianchandani and Khalil Najafi, "A bulk dissolved wafer process for microelectromechanical devices," J. of Mic-

- roelectromechanical Systems, Vol.1, No.2, 77–85, 1992.
- [24] Michael W.Judy and Roger T.Howe, "Polysilicon hollow beam lateral resonators," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.265–271, 1993.
- [25] Reid A.Brennen, Albert P.Pisano and William C.Tang, "Multiple mode micromechanical resonators," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.9–14, 1990.
- [26] Abraham P.Lee and Albert P.Pisano, "Polysilicon angular microvibromotors," J. of Microelectromechanical Systems, Vol. 1, No.2, 70–76, 1992.
- [27] C.-J.Kim, A.P.Pisano and R.S.Muller, "Silicon-processed overhanging microgripper." J. of Microelectromechanical Systems, Vol.1, No.1, 31–36, 1992.
- [28] Liwei Lin, Clark T.-C.Nguyen Roger T. Howe and Albert P.Pisano, "Micro electromechanical filters for signal processing," Proc. IEEE MEMS' Workshop, pp.266–231, 1993.
- [29] J.Bernstein, S.Cho, A.T.King, A.Kourepenis, P.Maciel and M.Weinberg, "A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.143–148, 1993.
- [30] R.Sawada, H.Tanaka, O.Ohguchi, J.Shimada and S.Hara, "Fabrication of active integrated optical micro-encoder," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.233–238, 1991.
- [31] R.Jebens, W.Trimmer and J.Walker, "Micro actuators for aligning optical fibers," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 35–39, 1989.
- [32] Shinji Nagaoka, "Micro-magnetic alloy tubes for switching and splicing single-mode fibers," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.86–91, 1991.
- [33] T.Ohnstein, T.Fukiura, J.Ridley and U. Bonne, "Micromachined silicon microvalve," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.95–98, 1990.
- [34] Masayoshi Esashi, Shuichi Shoji and Akira Nakano, "Normally closed microvalve and micropump fabricated on a silicon wafer," Sensors and Actuators, Vol.20, Nos. 1/2, 163–169, 1989.
- [35] F.C.C.Van De Pol, H.T.G. Van Lintel, M.Elwenspoek and J.H.J.Fluitman, "A thermopneumatic micropump based on micro-engineering techniques," Sensors and Actuators, A21–A23, 198–202, 1990.
- [36] Shun-ichi Miyazawa, Takashi Kawai and Muneki Araragi, "A Piezo-electric pump driven by a flexural progressive wave," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 283–288, 1991.
- [37] Hideo Mizoguchi, Mitsuhiro Ando and Tomokimi Mizuno, "Design and fabrication of light driven micropump," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 31–36, 1992.
- [38] Axel Richter and Hermann Sandmaier, "An electrohydrodynamic micropump," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 99–104, 1990.
- [39] A.Richter, A.Plettner, K.A.Hofmann and H.Sandmaier, "Electrohydrodynamic pumping and flow measurement," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.271–276, 1991.
- [40] Gunter Fuhr, Rolf Hagedorn, Torsten Muller, Wolfgang Benecke and Bernd wagner, "Microfabricated electrohydrodynamic(EHD) pumps for liquids of higher conductivity," J. of Microelectromechanical Systems, Vol.1, No.3, 141–146, 1992.
- [41] C.Doring, T.Grauer, J.Marek, M.S.Mettner, H.-P.Trah and M.William, "Micromachined thermoelectrically driven cantilever structures for fluid jet deflection," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.12–18,

1992.

- [42] 예를 들면, W.Menz, W.Bracher, M.Har-
mening and A.Michel, "The LIGA tech-
nique- a novel concept for mic-
rostructures and the combinatinon with
Si-technologies by injection molding,"
Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.69-73,
1991.
- [43] Takeshi Masaki, Koichi Kawata and Tak-
ahisa Masuzawa, "Micro electro-dis-
charge machining and its applications,"
Proc. IEEE MEMS Workshop, pp.21-26,
1990.
- [44] 김 용권, "마이크로 머신으로의 초대(I)" 대
한전기학회지 기술해설, Vol.41, No.11,
8-15, 1992.



김용권(金容權)

1960년 10월 23일생, 1983년 서울대
공대 전기공학과 졸업. 1985년 동대
학원 전기공학과 졸업(석사). 1990
년 동경대학교 대학원 전기공학과
졸업(박사). 1990-1992년 히타치제작소 중앙연구
소(동경) 근무. 현재 서울대학교 공과대학 전기공
학과 조교수로 재직. 관심분야: 전기기계중에서
MEMS와 초전도, 압전재료등의 소재를 이용한 소
형 액츄에이터