

Micromachining기법으로 제작된 정전형 마이크로모터의 기술동향

홍순관*, 박선우**, 김철주***

(*서울시립대 전자공학과 박사과정,

**서울시립대 제어계측공학과 조교수,

***서울시립대 전자공학과 교수)

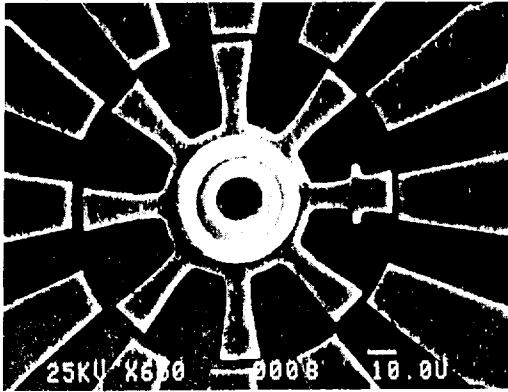
1. 서 론

반도체 공정기술의 급격한 발전과 미세화의 추세에 따라 초미세 가공기술을 이용하여 마이크로 크기의 기계구조체를 제작하고, 이를 미세화한 센서 및 전자회로와 결합시켜 보다 효율적이고 smart한 시스템을 구현하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구의 일환으로 시스템에서 기계동력원 등으로의 활용이 기대되는 마이크로모터가 다수 발표되고 있다. 일반적으로 모터의 구동에너지원으로 전자력(電磁力)과 정전력(靜電力)을 사용하고 있다. 전자력은 소자의 크기가 1/10로 감소할 때 약 1/10,000로 감소하는 반면에 정전력은 약 1/100로 감소하므로 마이크로모터의 경우에는 정전력을 이용하는 것이 에너지 효율면에서 매우 유리하다. 현재까지 발표된 마이크로모터는 100 μ m내외에서 수백 μ m정도의 직경을 갖고 있으며, 회전속도는 수십에서 수천 rpm까지 다양하게 발표되어 있다. 문제는 마모와 마찰의 문제로 인하여 장시간의 동작이 불가능하고 사용전압이 100V내외로 너무 높다는 점이다. 따라서 실용화의 수준에는 아직 이르지 못한 실정이며, 설계기법, 제작공정, 동작특성 등을 중심으로 활발한 연구가 이루어지고 있다. 본고에서는 현재까지 연구되고 있는 정전형 마이크로모터의 구동원리와 제작공정, 구조상의 특징, 동작특성 등을 간략히 소개하고자 한다.

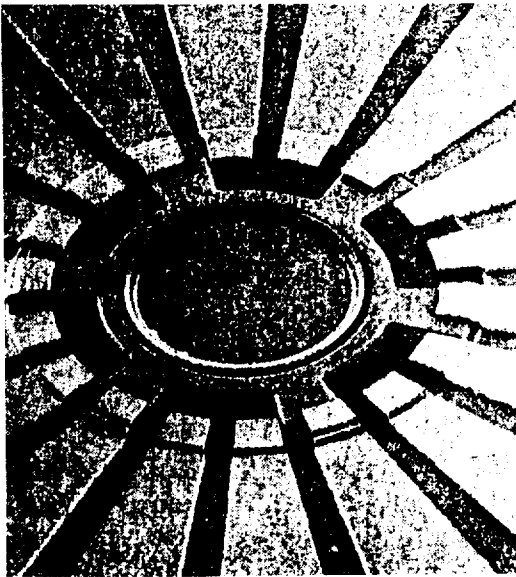
2. 정전형 마이크로모터의 종류

정전형 마이크로모터에 있어서 구동토크(driving torque)는 정전자(stator)와 회전자(rotor)사이에 생성되는 수평방향의 힘(tangential force)에 비례하는데 이 힘은 전극의 넓이가 매우 좁기 때문에 전극간의 거리에 크게 의존한다. 또한, 정전용량의 관계식으로 부터 이 힘과 전극간 거리에는 반비례 관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 정전자와 회전자간의 간극(일반적으로 air-gap이라는 용어를 사용함)을 줄일 수 있는 공정 및 설계상의 엄정성이 중요하다. 근간의 활발한 연구를 통하여 여러가지 새로운 유형의 마이크로모터가 제안, 발표되고 있으나 구동토크가 발생하는 회전자와 정전자간의 air-gap의 형태를 중심으로 첫째, side-drive형, 둘째, top-drive형, 셋째, wobble(또는 harmonic side drive)형으로 대별할 수 있다. 이들의 SEM사진을 그림 1에 보였다.

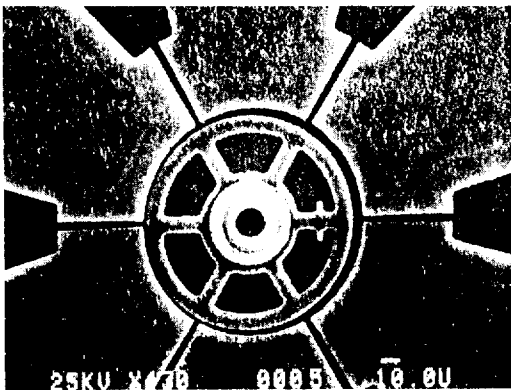
그림 1의 (a)는 정전자의 pole이 12개이고, 회전자의 pole이 8개인 side drive형의 마이크로모터를 보인 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 이 경우에는 정전자와 회전자가 마주하고 있으며, 여기에서 정전력이 발생하게 된다. 반면에 그림 1의 (b)에 보인 top-drive형은 정전자가 회전자상부에서 air gap을 사이에 두고 overlap되어 있는 점이 특징이다. 또한, 그림 1의 (c)에 보인 wobble형 마이크로모터는 회전자 pole이 없는 것이 그 특징이며, 회전



(a) Side-Drive형



(b) Top-Drive형



(C) Wobble형

그림 1. 각종 정전형 마이크로모터의 SEM사진

자의 상부에 $1\mu\text{m}$ 정도 overlap된 정전자 pole에 의하여 위치가 정의된다. 그림 2에 side-drive형 마이크로모터의 air-gap부분만을 확대한 사진을 보였다. 그림 2의 (a)와 (b)는 같은 배율로 확대한 사진으로 정전자와 구동자사이의 간격, 구조 및 크기 등을 고려하여 공정이나 회전력을 높이기 위한 여러가지 방안이 모색되고 있음을 알 수 있다. 한편, 현재까지 제작된 마이크로모터들은 공정상의 어려



그림 2. Side-Drive형 마이크로모터의 회전자와 정전자의 SEM사진

움과 공기의 절연한계 및 불안정 동작에 의한 정전자와 회전자의 단락을 고려하여 대개 $2\mu\text{m}$ 이상의 air-gap를 갖도록 설계되고 있다.

3. 마이크로모터의 구조와 제작공정

그림 3에 기본적인 side-drive형 마이크로모터의 제작공정을 보였다. 대표적인 마이크로모터의 구조재료(structural material)로는 LPCVD 폴리실리콘이 사용되고 있으나, 금속재료를 사용하기도 한다. 그림을 중심으로 제작공정과 마이크로모터의 각 부분을 설명한다. 우선, Si기판상에 수백 V이상의 전압에 견딜 수 있고, 공정의 마지막 단계에서 수행되는 HF-release공정에서 에칭되지 않는 재료, 예를 들어 실리콘질화막을 이용하여 절연층을 형성한다. 이어서 HF에 의해 제거되면서 구조재료인 폴리실리콘을 자유롭게 움직일 수 있는 상태로 만들어 주는 희생층(sacrificial layer)으로 사용되는 $2\mu\text{m}$ 두께의 첫번째 LTO(Low Temperature Oxide)를 증착하고 마스크를 이용하여 회전자와 정전자가 될 부분을 정의하는 한편, time-etch법으로 부싱(bushing)이 될 부분을 $1.5\mu\text{m}$ 정도 에칭한다[그림(a)]. 여기에서 부싱은 회전자 밑면의 돌

출부분이 되는 것으로서 회전시 마찰력을 감소시키는 효과와 함께 접지전위로 설정된 실리콘질화막의 절연막에 접촉하여 회전자를 접지전위로 설정한다. 다음은 첫번째 LPCVD 폴리실리콘을 약 $2.5\mu\text{m}$ 두께로 증착하고, 인등을 도평하여 도전성을 갖도록 한 후, 회전자와 정전자를 패터닝한다. 이 공정에서 회전자와 정전자간의 air gap이 정의된다[그림(b)]. 두번째의 LTO를 약 $1\mu\text{m}$ 의 두께로 증착한 후 베어링 anchor를 정의한다[그림(c)]. 다음으로, 두번째의 LPCVD 폴리실리콘을 약 $1\mu\text{m}$ 두께로 증착한 후 베어링을 정의한다[그림(d)]. 마지막으로, HF를 이용하여 첫번째와 두번째의 LTO를 제거하면 공정이 완료된다. Top-drive형이나 wobble형의 경우에도 큰 차이는 없으며 위에서 보인 공정을 약간만 변형하면 실현할 수 있다.

이러한 공정을 통하여 마이크로모터를 제작함에 있어서 특히 고려해야 할 공정상의 parameter로는 air-gap크기와, 베어링 clearance를 들 수 있다. 특히 $2\mu\text{m}$ 정도의 air-gap을 실현한 경우에 베어링 clearance 등에 기인한 동작상의 흔들림으로 인하여 정전자와 회전자가 short되는 등의 문제가 발생될 수 있기 때문이다. 한편, 마지막의 release 공정을 거쳐 회전자와 정전자가 자유로운 상태로 되면, 재료의 응력(stress)상태에 따라 길이가 감소하거나 늘어나게 되며, 이로 인해 air-gap을 당초의 설계 의도대로 유지하기 어렵게 된다. 따라서 응력의 영향을 적게 받는 설계기법 및 구조재료의 개발이 요구되는 실정이다.

4. 정전형 마이크로모터의 구동원리

그림 4와 같이 콘덴서의 2전극을 각각 회전자와 정전자로 생각할 수 있다. 전극이 완전히 overlap되는 경우 용량 C는 $\epsilon WL/d$ [F]로 표시할 수 있다. 또한, 2전극간의 전위차를 V라고 하면 정전에너지 U는 $1/2 CV^2=1/2 \epsilon WL V^2/d$ [J]로 된다. 따라서, 그림 4과 같이 overlap되는 경우의 정전에너지 U는 $1/2 \epsilon XLV^2/d$ [J]로 된다. +X 방향의 힘(즉, 평판콘덴서가 align하려는 힘)은 $aU/aX=1/2 \epsilon LV^2/d$ [N]으로 되며, 이 힘이 마이크로모터의 회전력이 된다.

마이크로모터의 동작은 정전자 pole을 몇개의 그

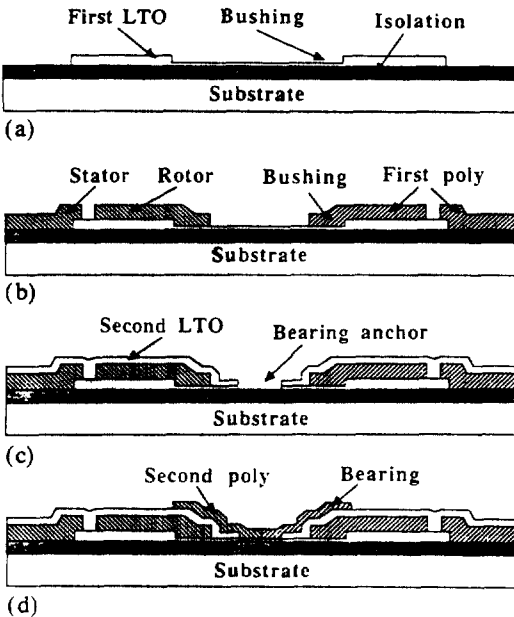


그림 3. Side-Drive형 마이크로모터의 제작공정에

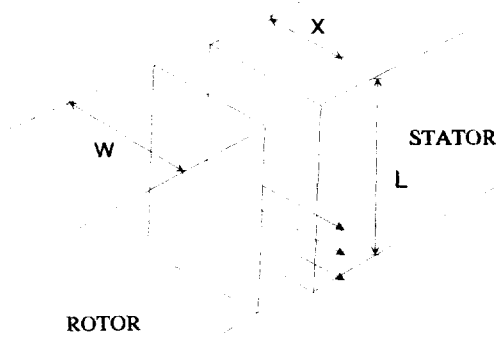


그림 4. 정전자와 구동자사이에서 발생하는 정전력

를으로 묶어서 공동으로 집속하고 여기에 위상이 다른 교류신호를 교번적으로 인가함으로써 이루어 지는데, 정전력의 크기는 매우 작은 반면에 마찰력은 크기 때문에 이를 극복하고 회전에 필요한 구동토크를 얻기 위해 높은 구동전압이 필요하다. 초기에는 수백V 정도의 높은 구동전압을 사용하였으나 현재에는 구조개선 및 그에 따른 마찰력의 감소로 100V내외로 감소되었다. 실제로 마이크로모터를 제작함에 있어서 가장 큰 어려움은 이러한 마찰력을 극복하는 문제이다. 마찰을 극복하기 위해 공기를 회전자 밑으로 불어넣어 부양시키는 임시적인 방법이 사용되기도 한다. 최근에는 전기적으로 회전자를 부양시키는 방법도 발표되어 있다.

회전자와 정전자간에 전압 V가 인가된 경우 구동토크(T)를 회전자의 회전각도(θ : 회전위치)로 표시하면,

$$T(\theta) = \frac{V^2}{2} \frac{\partial C(\theta)}{\partial \theta}$$

로 된다. 이 구동토크가 마찰력 이상이 되어야 회전이 가능하다. 마찰력을 고려할때 회전자의 운동은 다음과 같이 표시된다.

$$Iz \theta'' = T_{drive}(\theta) + \text{sgn}(\theta') \times T_{fric}(\theta) = 0$$

여기에서 Iz는 회전자의 회전관성, θ'' 은 각가속도 (angular acceleration), $T(\theta)$ 는 정전구동토크, $\text{sgn}(\theta')$ 은 각회전속도 (angular rotation velocity)의 부호로서 $\text{sgn}(\theta' > 0) = 1$, $\text{sgn}(\theta' < 0) = -1$ 로 된다. 또한, 마찰토크인 $T_{fric}(\theta)$ 는 베어링축이나 회전자표면의 포획진하에 기인하는 상수마찰토크 T_0 와 여기된 정전자에 의한 위치종속형 마찰토크

인 $Tz(\theta)$ 의 2성분을 가지고 있다.

여기에서 회전위치(θ)만을 고려하였지만, 실제 그림 1과 같은 마이크로모터의 구조를 생각하면 회전자의 수직위치, 회전자의 회전에 따른 air gap의 변화도 고려하여야 한다.

마이크로모터의 회전동작은 연속적인 stepwise 동작이므로 구동토크를 최대로 하기 위해서는 회전자와 정전자를 설계함에 있어 이들간의 align관계에 유의하여야 한다. 일반적으로 정전자는 2~3위 상으로 여기되는데, 예컨대 3위상의 경우 정전자와 회전자의 관계는 첫째, 완전일치, 둘째, 일부일치, 셋째, 불일치로 3분할 수 있다. 회전동작은 일부일치상태의 정전자에 여기전압을 인가하여 일치하려는 정전력을 발생시킴으로써 시작된다. 정전자의 수를 n_s , 회전자의 수를 n_r 이라 하면, 회전자의 회전 step의 radian크기 Θ 는

$$\Theta = 2\pi \left(\frac{1}{n_s} - \frac{1}{n_r} \right)$$

로 표시된다. 예를 들어 정전자 pole이 6개이고 회전자 pole이 8개라면 분해능은 15° (24 step)가 됨을 알 수 있다.

5. 결 론

마이크로모터는 미소기계장치(마이크로 로봇등)에서 중요한 actuator가 될 수 있음은 물론 자체로도 여러가지 응용을 생각할 수 있다. 예컨대 밀폐시킨 캡슐내에 마이크로모터를 제작하고 그 회전수를 조절함으로써 통로를 지나는 기체나 액체등의 유량을 조절하는 미세유량조절기를 제작할 수 있을 것이다. 또한, ink 분사장치등으로 응용하면 ink의 표면장력으로 인한 한계를 갖는 극미세젯이나 ink jet 프린터등의 ink 분사장치에 적용할 수 있을 것이다.

이상에서 현재 발표되어 있는 정전형 마이크로모터의 기술동향과 동작원리등을 간략히 살펴보았다. 아직은 실제적인 응용을 위해 넘어야 할 연구의 벽이 많이 존재하고 있지만 가까운 장래에 여러가지 응용분야에서 사용될 수 있을 것이다. 또한, 선발연구의 진척도가 적으므로 지금이라도 이 분야에 대한 연구투자를 시작한다면 좋은 성과를 거둘 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Mohd P. Omar, et. al., "Electric and Fluid Field Analysis of Side-Drive Micromotors" J. of Micro Electro Mechanical Systems, Vol. 1, No. 3, pp. 130-139, 1992.
- [2] NIKKEI ELECTRONICS "動くシリコンへ, Siマイクロマシーニング 技術" No. 480, pp. 125-155, 1989.
- [3] M. Mehregany, et. al., "A Study of Three Microfabricated Variable-Capacitance Motors", Transducers '89, The 5th Inter. conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 173-179, 1989.
- [4] Lee S. Tavrow, et. al., "A LOCOS Process for an Electrostatic Microfabricated Motor," Transducers '89, The 5th Inter. conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 893-898, 1989.
- [5] Keren Deng, et. al., "A Simple Fabrication Process for Side-Drive Micromotors," Transducers '93, The 7th Inter. conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 756-759, 1993.
- [6] S. F. Bart, et. al., "Electric Micromotor Dynamics," IEEE Trans. on. Electron Dev., Vol. 39, No. 3, pp. 566-575, 1992.
- [7] R. S. Muller, "Microdynamic Structures on Silicon", Proc. of the IFIP 10/wg 10. 5 International conf. on VLSI(VLSI'89), pp. 487-492, 1989.
- [8] W. S. N. Trimimer, et. al., "Silicon Electrostatic Motors", Transducers '87 The 4th Inter. conf. on Solid-State Sensors and Actuators. pp. 857-860, 1987.
- [9] Yu-Chang Tai and R. S. Muller, "Frictional Study of IC-Processed Micromotors", Transducers '89, The 5th Inter. conf. on Solid-state Sensors and Actuators, pp. 180-183, 1989.
- [10] S. Knmar and Dan Cho, "Electric Levitation Bearing for Micromotors", Transducers '91, The 6th Inter. conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp. 882-886, 1991.
- [11] M. Mehregany, et. al., "Micromotor Fabrication", IEEE Trans. on Electron Dev. Vol. 39, No. 9, pp. 2060-2068, 1992.
- [12] Xi-Qing Sum, et. al., "Some Structure Improvements in Silicon-Based Micro Electro-Static Motors", pp. 760-762, 1993.
- [13] V. R. Dhuler, et. al., "A Comparative Study of Bearing Design and Operational Environments for Harmonic Side-Drive Micromotors", Proceeding of IEEE Micro Electro Mechanical Systems '92, pp. 171-176, 1992.



홍순관(洪淳寬)

1963년 7월 1일생. 1987년 서울시립대 전자공학과 졸업. 현재 서울시립대 대학원 전자공학과 박사과정. 관심분야: 반도체 재료의 기계적 물성, Micro 소자제작공정, 특성평가



박선우(朴善宇)

1952년 9월 15일생. 1980년 광운대 공대 전자통신과 졸업. 1988년 일본 상지대학 졸업(공학). 1988~89년 현대전자 반도체연구소 제품개발실. 현재 서울시립대 제어계측공학과 조교수. 관심분야: Micromachining, SEM 및 FIB 장비개발, 반도체응용 및 공정



김철주(金鐵柱)

1947년 2월 3일생. 1973년 한양대 졸업. 1984년 일본 Tokai대학 대학원 석·박사과정 수료(공학). 현재 서울시립대 전자공학과 교수. 관심분야: 반도체재료 및 소자, SOI, TFT, Micromachining, 3차원 집적회로 개발.