

정전형 마이크로 액츄에이터의 정밀위치제어 Precise Position Control of Electrostatic Microactuator

김승한, 성우경 (고등기술연구원 전자재료연구실)

이효정 (고등기술연구원 전자재료연구실 및 아주대 시스템공학과)

S. H. Kim, W. K. Seong (Electronic Materials Research Lab, IAE)

H. J. Lee (Electronic Materials Research Lab, IAE and Dept. of Systems Engineering, Ajou Univ.)

ABSTRACT

This paper presents a precise position control of an electrostatic microactuator. For the generation of sufficient electrostatic force, a dense comb-type electrostatic microactuator is designed and manufactured via MEMS (micro-electro-mechanical systems) process. The nonlinear plant and the linear plant of the microactuator are established through the comparison of experimental results and simulation results. A feedforward controller is designed via MATLAB simulation using the inverse function of the nonlinear plant. The experiment for the precise position tracking control is undertaken to show the control efficiency of the proposed controller.

Key Words : MEMS(micro-electro-mechanical systems, 미소기전집적 시스템), inverse function(역함수) electrostatic microactuator(정전형 마이크로 액츄에이터), feedforward controller(피드포워드 제어기)

1. 서론

사람의 혈관을 통해서 인체에 들어가 바이러스를 공격하고 암세포를 제거하는 마이크로 잠수함같이 공상영화의 소재로 생각되었던 것도 멀지 않은 장래에 실현이 기대되는 등, 향후 MEMS 기술은 거의 모든 기술과 산업뿐만 아니라 인간의 일상생활과 건강에도 중요한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

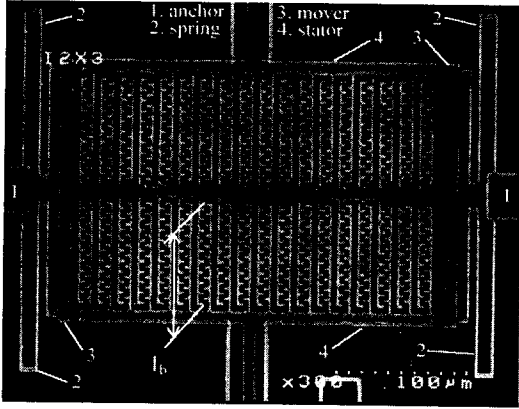
예를 들어 2000년대 초기에 실현화 될 것으로 예상되는 기록밀도 10Gb/in² 이상의 초고밀도 하드 디스크 드라이브(hard disk drive)에서는 기존의 VCM (voice coil motor)만으로는 헤드(head)의 정밀위치제어가 어렵게 되고, 또한 서보 시스템(servo system)의 고속화가 한계에 다다를 것으로 예상된다. 따라서 현재 세계 여러 연구기관에서 VCM과 함께 dual servo system을 구축하는 데 응용할 수 있는 마이크로 액츄에이터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^(1,2).

본 논문은 MEMS 공정을 통하여 제작된 정전형 마이크로 액츄에이터의 정밀위치제어에 대한 것으로서, 마이크로 액츄에이터에 대한 비선형 플랜트 및 선형 플랜트의 모델링, 비선형 플랜트의 역함수를 이용한 피드포워드 제어기의 설계, 그리고 설계된 제어기의 성능을 확인하기 위한 제어시험을 수행하였다.

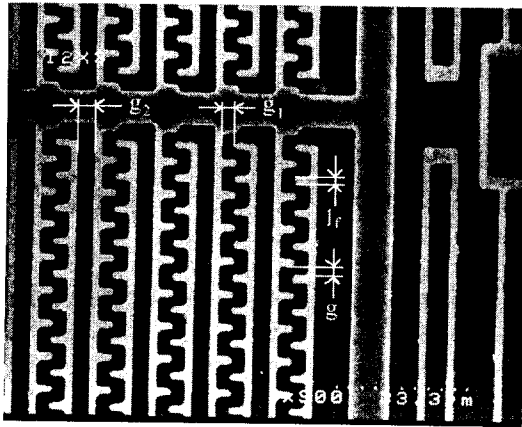
2. 정전형 마이크로 액츄에이터 제작 및 구동 원리

Fig.1은 본 논문에서 제안된 조밀한 빗살형 구조의 정전형 마이크로 액츄에이터를 SEM(scanning electron microscope)을 이용하여 촬영한 것이다. 마이크로 액츄에이터는 일반적인 실리콘 마이크로머시닝 공정을 사용하여 제작되었다. 제작된 마이크로 액츄에이터는 몸체를 형성하는 구조층과, 이동자의 에어 갭을 제공하는 회생층, 이동자와 기관 사이에 정전력이 발생하지 않도록 하는 기저전극층, 끝으로 실리콘 기관과의 전기적 절연을 위한 전기절연층으로 구성되어 있다. 이러한 마이크로 액츄에이터의 제조공정을 간략하게 살펴보면, 우선 실리콘 기관 위에 전기절연층인 실리콘 나이트라이드(silicon nitride)를 LPCVD(low pressure chemical vapor deposition) 공정으로 증착한 후, 기저전극층인 폴리실리콘(polysilicon)을 LPCVD 공정을 이용하여 포스퍼러스(phosphorus)를 도핑하면서 증착하였다. 증착된 폴리실리콘 기저전극층을 UV 리소그라피를 이용하여 패터닝하였다. 전기절연층과 기저전극층의 두께는 각각 1500Å과 3000Å이었다. 그리고 회생층인 PSG(phosphorous silicate glass)를 LPCVD로 증착한 후에 패터닝하여 이동자와 고정자를 기관에 고정시키는 지지부를 형성하였다. 이 회생층위에 구조층인 폴리실리콘을 증착하고 에칭 마스크로서 PSG를 증착한 후에

구조층 도핑을 위해서 1000°C, 1시간, N₂ 분위기 조건에서 열처리하였다. 도핑된 구조층을 패터닝하여 구조물을 형성하고 희생층을 불산으로 습식식각하여 릴리스(release)하였다. 여기서 사용된 희생층과 구조층의 두께는 각각 2μm와 3μm이었다.



(a) 제작된 마이크로 액츄에이터



(b) 마이크로 액츄에이터의 부분 확대

Fig. 1 Photograph of Microactuator

제작된 마이크로 액츄에이터의 구조 및 동작원리를 살펴보면, 좌우 양단에 위치하여 바닥에 고정된 앵커(anchor)가 있고, 이에 연결된 좌우의 스프링구조가 H형의 등뼈(backbone) 구조를 사이에 두고 연결되어 있고 등뼈구조의 상하방향으로 빗살구조가 설치되어 있다. 이와 같은 H형의 등뼈구조와 상하방향의 빗살구조를 합쳐 이동자(mover)라 하며, 바닥으로부터 분리되어 있다. 한편 이동자에 포함된 빗살구조와 대응된, 또 다른, 빗살구조와 이와 연결된 상하의 (L, T)구조를 합하여 고정자(stator)라 하며, 상하의 (L, T)구조가 바닥에 고정되어 있다. 앵

커와 (L, T)구조를 통하여 전압(V)을 공급하면 이동자와 고정자간에 전압이 인가되고, 상호간에 인력방향의 정전력(F_{es})이 발생하여 이동자가 고정자에 접근하여 변위(y)가 발생되며, 이들의 관계는 아래와 같은 전형적인 비선형성 관계식으로 표현된다.

$$F_{es} = \frac{1}{2} n_1 \epsilon_0 V^2 \frac{t}{g} + \frac{1}{2} n_2 \epsilon_0 V^2 \frac{t \cdot l_f}{(g_1 - y)^2} - \frac{1}{2} n_3 \epsilon_0 V^2 \frac{t \cdot l_b}{(g_2 + y)^2} \quad (1)$$

여기서 n₁(=21×18×2)과 n₂(=20×18×2), 그리고 n₃(=17×2)는 해당 finger 갯수, ε₀는 공기의 유전상수(=8.854×10⁻¹²), t(=3μm)는 finger 두께, g(=2.35μm)는 finger gap, l_f(=1.65μm)는 finger 폭, g₁(=3.16μm)은 transverse gap, l_b(=77.3μm)는 finger bar 중첩 길이, g₂(=4.35μm)는 mover bar와 stator bar와의 gap이며, 실측은 SEM 사진과 scale의 비례적인 산출을 통하여 수행되었다.

3. 마이크로 액츄에이터 특성 및 제어 시험

Fig.2는 본 연구에서 구성한 시험장치의 개략도이다.

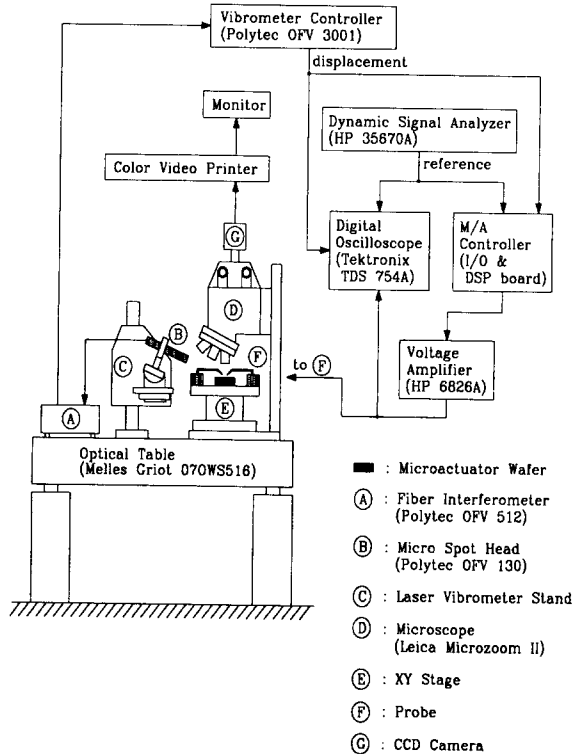


Fig. 2 Experimental Apparatus

마이크로 액츄에이터에 전압을 인가하기 위하여 probe를 사용하고, 변위를 측정하기 위한 센서로는 laser vibrometer를 사용하며, M/A(microactuator) controller는 DSP board(MDC44S3, LSI)와 I/O board(AM/D16SA, LSI)로 구성된다.

Fig.3은 입력전압에 대한 정전력(스프링강성(k=2.31 N/m)×발생변위(y))의 비선형성에 대한 식(1), FEM(전장 해석), 그리고 실험 결과를 비교한 것이다.

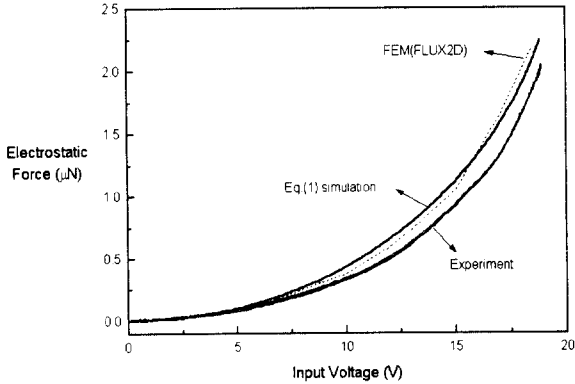


Fig. 3 Voltage-Force Nonlinearity

위의 결과에서 세가지 경우에 대하여 상당한 유사성을 볼 수 있으나, 비선형성에 대한 역함수로 구현되는 제어기의 성능을 향상시키기 위하여, 식(1)과 실험결과와의 차이를 줄이기 위한 조절요소(cf_1 , cf_2 , cf_3)를 식(1)에 고려하고, 첫째항과 둘째항은 비선형곡선의 전체적인 크기에 영향을 미치고, 셋째항은 비선형곡선의 기울기에 연관된다는 3개 항의 개별적인 영향에 대한 비교분석을 통하여, 각 조절요소를 $cf_1=1.1145$, $cf_2=1.1145$, $cf_3=1.9$ 로 지정함으로써 비선형성의 실험결과에 가장 근접한 마이크로 액츄에이터의 비선형 플랜트를 아래와 같이 설정하였다.

$$F_{es} = \frac{1}{2} cf_1 n_1 \epsilon_0 V^2 \frac{t}{g} + \frac{1}{2} cf_2 n_2 \epsilon_0 V^2 \frac{t \cdot l_f}{(g_1 - y)^2} - \frac{1}{2} cf_3 n_3 \epsilon_0 V^2 \frac{t \cdot l_b}{(g_2 + y)^2} \quad (2)$$

식(2)로부터 피드포워드 제어기를 설계하기 위해서는 정전력이 기준변위(r)에 스프링강성(k)을 곱한 스프링력과 평형을 이루도록 한다는 점에서 착안해야 한다. 따라서 식(2)를 전압(V)에 대하여 정리하고, 변위(y)를 기준변위(r)로 대체하고, 정전력을 전압증폭기(voltage amplifier)의 DC gain(=-10)을 고려한 $k/10^2 \times r$ 로 대체하면 식(3)과 같은 피드포워드 제어기(V_{FF})가 설계되며, 식(3)의 의미는 기준변위와 이에 해당하는 정전력을 발생시키기 위한 역

비선형 전압을 도출하는 것으로 정리할 수 있다.

$$V_{FF} = -\sqrt{\frac{\frac{k}{10^2} \times r}{D_1 + D_2 - D_3}} \quad (3)$$

$$D_1 = \frac{1}{2} cf_1 n_1 \epsilon_0 \frac{t}{g}$$

$$D_2 = \frac{1}{2} cf_2 n_2 \epsilon_0 \frac{t \cdot l_f}{(g_1 - r)^2}$$

$$D_3 = \frac{1}{2} cf_3 n_3 \epsilon_0 \frac{t \cdot l_b}{(g_2 + r)^2}$$

마이크로 액츄에이터의 선형 플랜트는 전달함수와 스텝응답에 대한 실험결과를 근거로 하여 식(4)와 같이 설정되었으며, fig.4는 전달함수에 대한 실험 결과 및 모델링 시뮬레이션 결과를 함께 나타낸 것이고, 여기서 $DCgain=1/k$, 감쇠계수 $\zeta=0.0405$, $\omega_r=23.7 \times 10^3 \times 2\pi$ [rad/s], $\omega_n=\omega_r/(1-2\zeta^2)^{1/2}$, $a=1$, $b=2\zeta\omega_n$, $c=\omega_n^2$, $d=DCgain \times \omega_n^2$ 이다.

$$\frac{y}{F_{es}} = \frac{d}{as^2 + bs + c} \quad (4)$$

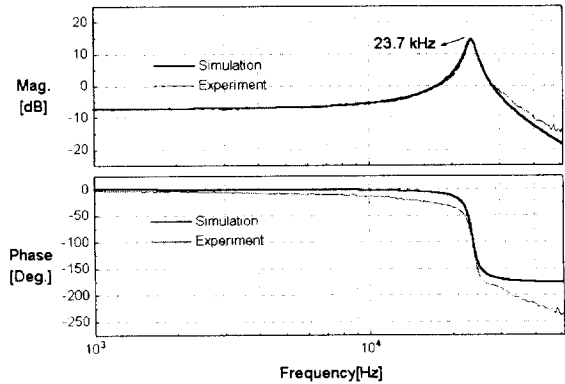


Fig. 4 Transfer Function

마이크로 액츄에이터의 비선형 플랜트와 선형 플랜트, 그리고 본 논문에서 제안한 피드포워드 제어기를 블록 다이어그램으로 표현하면 fig.5와 같다.

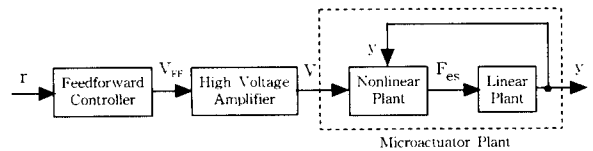


Fig. 5 Block Diagram

제어를 수행하기 위해서는 fig.5에 나타난 바와 같이, 기준변위(r)를 이용하여 피드포워드 제어기를 계산하고,

전압증폭기를 통하여 증폭한 후, 마이크로 액츄에이터에 전달시킨다. 마이크로 액츄에이터는 앞서 설명한 바와 같이 비선형 플랜트와 선형 플랜트를 연결한 형태로 표현되며, 전달된 전압은 비선형 플랜트를 통하여 정진력으로 출력되고, 정진력은 선형플랜트의 입력으로 전달되어 마이크로 액츄에이터의 변위를 출력시킨다.

Fig.6은 본 논문에서 제안된 피드포워드 제어기를 적용하지 않고, 단순한 sine파형의 전압을 마이크로 액츄에이터에 인가하였을 경우이고, fig.7은 제안된 피드포워드 제어기를 적용하였을 경우이며, 여기서 추종해야 할 기준 변위(r)는 0~0.67 μm 변위와 1kHz의 주파수를 갖는 sine파로 설정되었다.

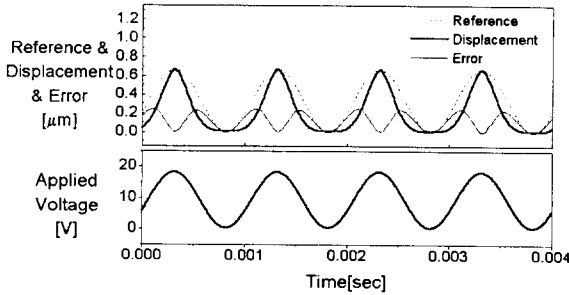


Fig. 6 Time Response without Proposed Controller

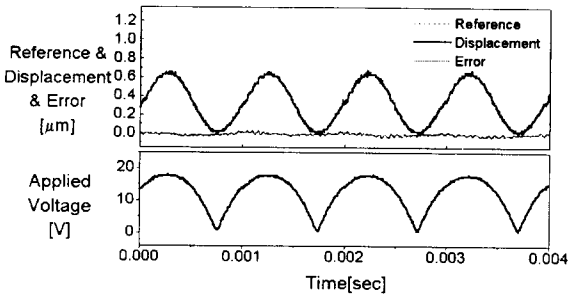


Fig. 7 Time Response with Proposed Controller

위의 결과에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 설계한 피드포워드 제어기를 사용하지 않은 경우, 비선형성으로 인하여 약 0.25 μm 크기의 오차가 발생하였으며, 이러한 오차를 제거하기 위하여 설계된 피드포워드 제어기를 적용한 경우, 약 0.035 μm 크기의 오차만이 발생되어, 비선형성으로 인하여 발생하는 오차의 대부분을 제거시킬 수 있었다.

4. 결론

200×300 μm 크기의 정전형 마이크로 액츄에이터를 제작하기 위한 MEMS 공정을 수행한 결과, 공진주파수가

23.7kHz이며, 19V의 전압입력시 2.08 μN 의 정진력(변위 0.9 μm)을 발생시키는 마이크로 액츄에이터가 제작되었다. 제작된 마이크로 액츄에이터에 대하여 전압/변위와 정진력의 비선형성 및 정진력과 변위의 선형성에 대한 특성시험을 수행한 결과, 비선형성에 대한 이론식과 실험결과에서 상당한 유사성을 볼 수 있었으며, 마이크로 액츄에이터의 선형 플랜트는 2차 시스템으로 정의할 수 있었다. 비선형성에 대한 역함수를 정의하여 피드포워드 제어기를 설계하였으며, 제안된 피드포워드 제어기의 성능을 확인하기 위한 기준변위 추종제어시험을 수행하였다. 그 결과, 본 논문에서 제안한 피드포워드 제어기를 적용하지 않은 경우, 비선형성으로 인한 오차가 발생하여 정밀위치 추종성능을 발휘할 수 없음을 알 수 있었으며, 반면, 피드포워드 제어기를 적용한 경우, 비선형성으로 인한 오차의 대부분을 제거함으로써 정밀위치 추종성능을 발휘할 수 있음을 알 수 있었다.

따라서, 정밀위치 추종성능을 갖는 정전형 마이크로 액츄에이터를 구현하기 위해서는, 본 논문에서 제안한 피드포워드 제어기와 같은 비선형 보상을 사용하여 정진력의 근본적인 비선형성을 제거하는 것이 필수적이라 할 수 있으며, 또한, 본 논문에서 설정한 바와 같은 비선형성의 역함수를 이용한 피드포워드 제어기의 설계가 매우 유용하다고 할 수 있다.

향후, 더욱 개선된 제어효과와 외란(disturbance)에 대한 강건성을 보유하기 위해서는 본 논문에서 제안한 피드포워드 제어기와 더불어 페루프 제어기가 동시에 적용되는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Takahiro Imamura, Takao Koshikawa and Masaki Katayama, "Transverse Mode Electrostatic Microactuator For MEMS-based HDD slider," Proc. IEEE MEMS Workshop, pp. 216-221, 1996.
2. Long-Sheng Fan, Hal H. Ottesen, Timothy C. Reiley and Roger W. Wood, "Magnetic Recording Head Positioning at Very High Track Densities Using a Microactuator-based, Two-stage Servo System," IEEE Transactions in Industrial Electronics, Vol.42, No.3, pp. 222-233, 1995.