

고해상도의 Foxtail 형 정전력 마이크로구동기에 대한 연구

김만근*, 김영윤, 조경우, 이종현
광주과학기술원 기전공학과 MEMS & NanoPhotonics Lab

A Study on a Foxtail Electrostatic Microactuator with a High Resolution

Man Geun Kim, Young Yun Kim, Kyoungwoo Jo, Jong Hyun Lee
Dept. of Mechatronics, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

ABSTRACT

A new foxtail actuator driven by V-shape beam deflection using electrostatic force has been designed, fabricated and characterized for nano-resolution manipulators. The proposed foxtail mechanism was implemented using a pair of electrostatic actuators and a pair of holding actuators, which was analyzed based on the electromechanically coupled motion of voltage - displacement relation. The proposed actuator was fabricated onto Silicon-on-Insulator (SOI) wafer and its stepping characteristics were measured by micro optical interferometer consisting of integrated micromirror and optical fiber. The fabricated foxtail microactuator was successfully operated from 1nm to 76nm, and the magnitude of step displacement was controllable up from 26nm/cycles to 53 nm/cycle by changing the voltage.

Key Words : Nano-resolution(나노해상도), foxtail (강아지풀), Electrostatic(정전력), Microactuator(미세구동기), Interferometer(간섭계)

1. 서론

최근 나노기술의 발전과 더불어, 미소한 물체들을 나노미터 해상도로 이송하면서 분석, 조작하기 위한 나노 구동기에 대한 필요성이 대두되고 있다. 종래에는 압전 구동기가 많이 사용되었지만, 근래에는 나노 구동기의 소형화, 적용분야의 확대, 그리고 더욱 미세한 위치 조작을 위해 MEMS 형 나노 구동기가 연구되고 있다. 한 예로 1993 년에 T. Akiyama 등이 MEMS 기술을 이용하여 해상도 25nm 의 SDA (Scratch Drive Actuator)를 개발하였으나, 높은 전압과 함께 out-of-plane 의 움직임이 있다는 단점이 있다 [1]. 한편, 2002 년에 R. Yeh 등이 개발한 인치웜 정전력 구동기는 in-plane 으로 구동이 가능하지만, 해상도가 수백 nm 에 이른다 [2]. 최근 H. N. Kwon 등이 열탄성 구동기를 이용하여 높은 강성의 인치웜 구동을 가능하게 하였으나 나노미터급의 해상도를 보여주지 못하였다 [3].

본 연구에서는 종래 구동기의 단점을 보완하여, 질량체 (shuttle mass)를 나노미터 수준의 해상도로 이송하면서 미소한 물체의 분석, 조작에 필요한

foxtail 정전력 구동기를 제안하였다. 본 구동기는 SOI (Silicon On Insulator)로 제작되었으며, 광섬유를 이용한 간섭계를 이용해서 변위구동에 대한 특성을 평가하였다.

2. Foxtail 정전력 마이크로 구동기 설계

2.1 동작원리

그림 1 에 본 연구에서 제안한 foxtail 정전력 구동기의 구조를 보였으며 또한 foxtail 구동기의 작동 순서를 보여준다. 여기서 holding 구동기에 전압을 가하면 구동기는 좌우방향으로 움직여 질량체를 고정하고 (그림 1a), 그 상태에서 전진을 위한 첫 단계로 driving 구동기에 V_1 전압을 가하여 wing 을 잡는다 (그림 1b). 전진을 위한 두 번째 단계로 holding 구동기의 전압을 off 하여 원위치로 release 한 후 (그림 1c), driving 구동기에 V_2 전압을 인가하여 wing 에 변형을 발생시킴으로써 질량체의 미소변위를 얻는다 (그림 1d). 이어서 holding 구동기에 전압을 가하여 질량체의 전진상태를 유지하고 (그림 1e), 다음 전진을 위하여 driving 구동기에 V_1 전압을 가한다 (그림 1f). 그림 2 는

각각의 단계에 필요한 전압의 그래프를 나타낸다. 이와 같이 그림 1(c)에서 1(f)과정을 반복함으로써 나노미터 정밀도의 이송 해상도로 장거리 이동이 가능하며, 이송 후 정지된 상태에서 외란에 대하여 높은 강성을 유지하도록 holding 구동기의 스프링을 tether 형태로 설계하였다. Driving 용 구동기는 빗살형 정전구동기를 사용하였으며, holding 용 구동기는 평행판 정전구동기를 사용하였다. 이때 질량체의 holding 을 위해서는 충분히 큰 마찰력이 필요하며, 이를 위하여 평행판 구동기가 불안정 상태 (pull-in condition)에서 작동하도록 하였다.

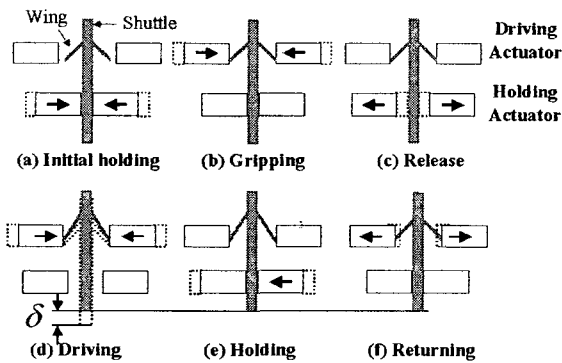


Fig. 1 Operation sequence of the proposed foxtail actuator.

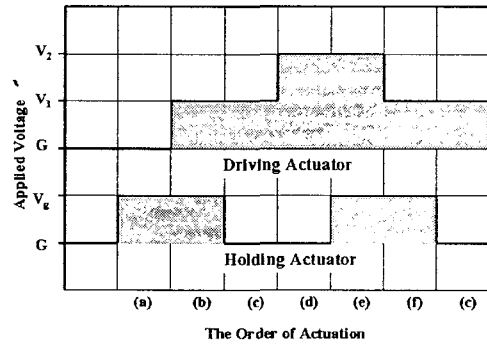


Fig. 2 Time plot of driving actuator and holding actuator with respect to each step.

2.2 이론적 해석

그림 1에서 살펴본 바와 같이, 전진구동기에는 질량체의 양쪽에 wing을 V형태로 설치하고, wing의 양쪽에 가해진 힘 F 에 의해 발생된 wing의 변형에 따라 질량체가 움직인다. 그림 3(a)는 질량체, wing 그리고 질량체를 지지하고 있는 스프링을 포함한 전체 전진구동기의 자유물체도를 도시한 것이며, 그림 3(b)는 한쪽 wing에 대한 외력과 내력을 표시한 반(half) 자유물체도를 나타낸 것이다. 전진구동기에서 발생하는 힘에 의해 전진구동기와 wing이 접촉한 후, wing이 변형됨에 따라 질량체의 변위이동이 나타나는데, wing의 처짐은 질량체에 연결된 스프링과 연관된다. 즉 힘 F 에 의한 전단력

V 가 발생하며 이에 따라 질량체에 연결된 스프링(K_{eq})의 변위가 곧 질량체의 변위가 된다.

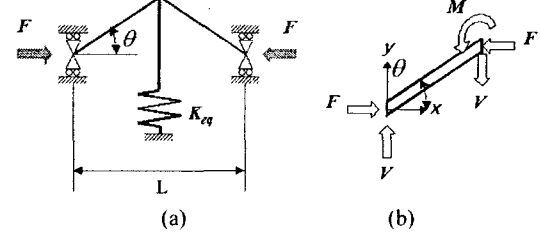


Fig. 3 The free body diagram employed in the foxtail microactuator; (a) full model, (b) half model with internal force and external force.

힘 F 에 의한 wing의 변형은 빔 해석이론으로 구할 수 있다. 그림 3(a)의 모델에 대한 지배 방정식은 식 (1)과 같이 표현되며, 구속조건은 식(2)에 나타내었다.

$$EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = M = Vx - Fy \quad (1)$$

$$y|_{x=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial y}{\partial x} \right|_{x=L/2} = \tan(\theta) \quad (2)$$

여기서 E 는 실리콘의 탄성계수값으로 169GPa를 사용하였고, $I (=tw^3/12)$ 는 면적관성 모멘트이며, 그 밖의 기호들은 그림 (3)에 나타내었다. 힘 F 가 압축력으로 가해질 때, 이 식의 해는 식 (3)와 같이 나타내어진다.

$$\tan \theta = \frac{V}{F} \quad (3)$$

$$y = \frac{F}{k \cos \frac{\theta}{2}} \sin kx + \frac{V}{F} x$$

$$\text{where } k = \sqrt{\frac{F}{EI}}; \quad y|_{x=L/2} = \frac{\tan \theta - \frac{V}{F}}{k} \tan kx + \frac{V L}{F 2}$$

$x=L/2$ 인 위치에서 wing의 변위와 스프링의 변위가 같다는 조건으로부터 V 를 식 (4)와 같이 구할 수 있다. 식 (4)로부터 힘 F 에 의한 $x=L/2$ 에서의 질량체 변위를 식 (5)와 같이 구해진다.

$$\frac{\tan \theta \tan \frac{kL}{2} - \frac{L \tan \theta}{2}}{k} = \frac{V L}{2F} \quad (4)$$

$$V = \frac{\tan \frac{kL}{2} - \frac{L}{2F} - \frac{1}{K_{eq}}}{k}$$

$$\delta|_{x=L/2} = \frac{2V}{K_{eq}} \quad (5)$$

다음은 평행판구동기의 구조를 가진 holding 구동기의 설계를 위한 해석결과를 보여준다. 평행판구동기는 그림 (4)와 같이 설계하였으며, 여기서 N 은 각각의 전진/고정구동기에 대한 평행판구동기의 수를 나타낸다. 그림 (4)에서 이동전극이 받는 정전력은 식 (6)과 같으며, 해석을

통해서 36V에서 평행판구동기에 불안정상태가 나타나는 것을 알 수 있다.

$$F_x = N \frac{\epsilon t y_0 V_1^2}{2} \left(\frac{1}{(g_1 - x)^2} - \frac{1}{(g_2 + x)^2} \right) \quad (6)$$

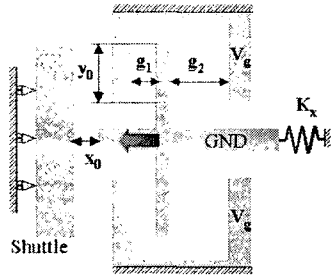


Fig. 4 Unit element model of the electrostatic actuator to derive the electrostatic force for gripping.

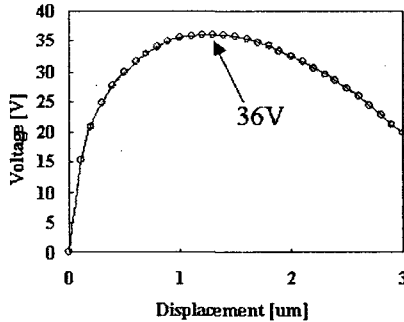


Fig. 5 The required voltage with respect to the displacement of the holding actuator.

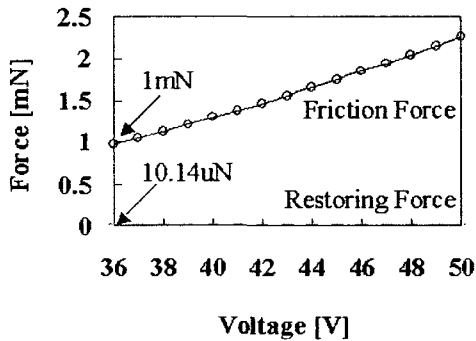


Fig. 6 Simulated frictional force and restoring force for holding with respect to the holding voltage.

$$F_{xrip} = N \frac{\epsilon t y_0 V_1^2}{2} \left(\frac{1}{(g_1 - x_0)^2} - \frac{1}{(g_2 + x_0)^2} \right) - K_x x_0 \quad (7)$$

식 (7)은 질량체와 전진구동기가 접촉했을 때 접촉면에서의 수직응력을 나타내며, 여기서 x_0 는 질량체와 접촉하기 전까지 holding 구동기의 변위이동량을 나타낸다. holding 구동기가 질량체와 접촉하였을 때 접촉면에서의 마찰계수를 0.38로

가정하여 [4]. 그림 (6)과 같은 결과를 얻었다. 그림과 같이 구동전압이 36 V 이상일 때 최소 1 mN의 마찰력을 얻었으며, 이것은 질량체에 3 μ m의 변위이동이 나타났을 때 질량체에 연결된 길이 L 의 단순 범 스프링에 나타나는 복원력보다 충분히 큰 값이라는 확인할 수 있다.

3. 소자 제작

지금까지의 해석결과를 바탕으로 80 μ m의 구조층을 가지는 SOI 웨이퍼를 이용해서 구동기를 제작하였으며, 한 장의 포토마스크를 이용하여 에칭마스크 (SiO_2)를 패터닝 한 후, DRIE 공정과 GPE를 이용한 릴리스 (release) 공정이 이용되었다. 제작된 구동기의 사진을 그림 8에 보였으며, 셔틀의 변위량을 측정하기 위한 광섬유는 그림의 우측에 함께 도시하였다.

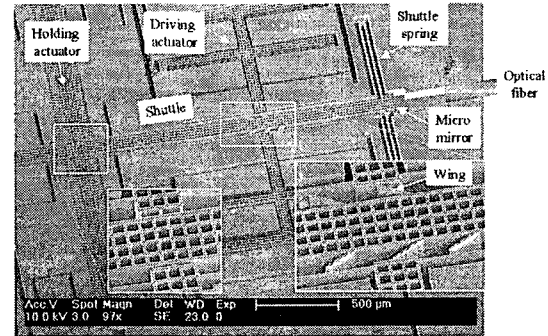


Fig. 7 SEM image of the fabricated foxtail inchworm motor.

4. 구동기의 실험적 특성 평가

본 구동기의 구동특성을 평가하기 위해서 전압에 따른 변위 측정실험을 수행하였다. 구동기의 변위량은 나노미터 수준이기 때문에 직접 변위량을 측정하는 데에 어려움이 있으며, 본 연구에서는 빛의 간섭원리를 이용한 광학시스템을 통해서 구동기의 변위량을 측정하였다. 측정시스템은 그림 8(a)와 같이 BLS (Broad Band Source)와 Circulator, 그리고 OSA (Optical Spectrum Analyzer)로 이루어져 있으며, 구동기의 미러면과 광섬유 끝단은 Fabry-Perot 공진기를 형성한다. 구동 전/후에 OSA에서 측정되는 빛의 강도는 그림 8(b)와 같이 측정되며, 이때 나타나는 파장 천이량인 $\Delta\lambda$ 를 측정하고, 식 (8)을 통해서 구동기의 변위량을 환산할 수 있다.

$$\Delta d = -\frac{d}{\lambda_c} \Delta\lambda \quad (8)$$

여기서 d 는 미러면과 광섬유 끝단 사이의 초기 간격이고, λ_c 는 그림 9(b)의 사용된 빛의 중심파장을 나타낸다.

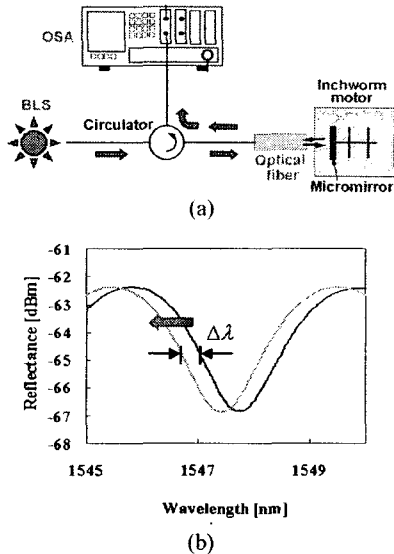


Fig. 8 Schematic of optical interferometer consisting of optical fiber and measured data; (a) schematic of nano measurement system, (b) the reflected optical power measured by OSA showing the shift of spectrum according to the movement of the shuttle.

제안된 구동기는 전압 V_2 에 따라 구동 변위의 제어 가능하였으며, 또한 그림 1(c)에서 1(f) 과정을 8 번 반복했을 때의 구동 특성을 그림 (9)에 보였다. 단위스텝에서 V_2 전압을 조절함으로써 최소 1nm 최대 76nm 를 제어할 수 있었다.

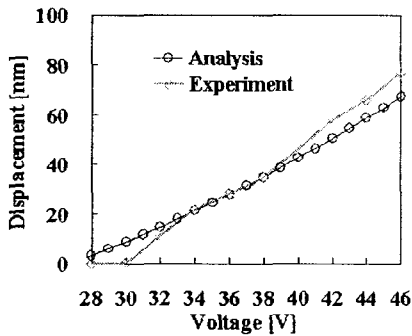


Fig. 9 Displacement curves with respect to the V_2 at the driving state, which are compared with the results from analytical solution.

마지막으로 구동기가 여러 차례에 걸쳐서 구동을 할 때에 질량체에 나타나는 누적 변위량을 측정하였다. 패턴의 가공오차로 인하여 holding 과정에서 미소한 비대칭 구동이 발생하였으며, 이의 특성 분석을 위하여 그림 (10)과 같이 V_2 전압에 대하여 동일한 값 및 다른 값으로 변화시키면서 구동거리를 측정하였다. 다중스텝에서는 최소 26nm, 최대 53nm 의 스텝변위를 누적시켜 총 269nm 를 구동하였다. 구동기의 해상도를 개선하기 위해서는 holding 충격을 더 줄여야 할 것으로 판단되며, 또한 수직면 및

패턴 형상의 가공오차를 최소화함으로써 더욱 안정된 구동 특성을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

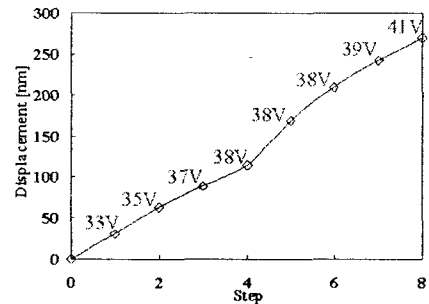


Fig. 10 Experimental displacement for cyclic operation of foxtail electrostatic microactuator.

5. 결론

본 논문에서 제안된 소자는 foxtail 정전력 마이크로 구동기로서, driving 구동기에 인가한 전압에 의해 wing 에 변형이 발생하며, holding 구동기에 의해서 질량체의 위치를 고정되는 원리를 이용하였다. 제작된 구동기의 특성평가 실험에 있어서, 단위스텝에서는 V_2 전압을 조절함으로써 최소 1nm 최대 76nm 를 제어할 수 있었으며, 다중스텝에서는 최소 26nm, 최대 53nm 의 스텝변위를 누적시켜 총 269nm 를 구동할 수 있었다. 제안된 구동기의 해상도를 개선하기 위해서는, holding 시의 충격을 감소시켜야 하며, 또한 수직면 및 패턴의 가공오차를 줄이면 보다 안정적인 구동 특성을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 BK21 사업의 재정지원으로 수행되었으며, 이에 과학기술부 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. T. Akiyama and K. Shono, "Controlled Stepwise motion in polysilicon microstructures," *J. MEMS*, vol. 2, no. 3, pp. 106-110, 1993.
2. R. Yeh, S. Hollar and K. S. J. Pister, "Single mask, large force, and large displacement electrostatic linear inchworm motors," *J. MEMS*, vol. 11, no. 4, pp. 330-336, 2002.
3. H. N. Kwon, S. H. Jeong, S. K. Lee, and J. H. Lee, "Design and characterization of a micromachined inchworm motor with thermoelastic linkage actuators," *Sensors and Actuators A*, vol. 103, pp.143-149, 2003.
4. K. Noguchi, H. Fujita, M. Suzuki, and N. Yoshimura, "The Measurements of Friction on Micromechatronics Elements," *Proc. IEEE MEMS*, pp. 148-153, 1991.