

SEA(Skewed Electrode Actuator)를 이용한 회전형 마이크로 액츄에이터의 설계 및 제작

최석문*, 황은수*, 조동우**, 김용준***, 이상조***
 연세대학교 대학원 기계공학과*, 포항공대 기계공학과**, 연세대학교 기계전자 공학부***

Design and Fabrication of Rotary Microactuator Using SEA(Skewed Electrode Actuator)

Seok-Moon Choi*, Eun-Su Hwang*, Dong-Woo Cho**, Young-Jun Kim***, Sang-Jo Lee***
 Mechanical Eng. Dept. Yonsei Univ.*, Mechanical Eng. Dept. POSTECH**, Yonsei. Univ.***

Abstract - 본 연구에서는 코움 드라이브에 비해 구동력은 크고 평행 판 구동 방식에 비해서는 선형 특성이 우수하며 안정된 구동거리가 증가하는 특성을 갖는 새로운 정전력(electrostatic force) 구동 방식을 제안한다. 운동 전극과 고정 전극을 기울어지게 배치하여 전극 면에 평행한 정전력 F_x 와 전극 면에 수직인 정전력 F_y 의 합력 F_e 방향으로 전극을 운동시킴으로써 정전력의 방향과 전극의 운동 방향을 일치시킨다. 제안된 구동방식의 정전력 모델을 이용한 해석 결과 코움 드라이브에 비해서는 구동력이 50 % 이상 크며 평행 판 구동에 비해서는 안정된 구동 거리가 10 - 30 % 이상 증가하는 구동 특성을 얻을 수 있었다. 제안된 구동방식을 이용하여 HDD의 트랙 방향 저장 밀도를 증가시키기 위한 듀얼 스테이지 서보(dual-stage servo)에 사용될 마이크로 액츄에이터(microactuator)를 설계하고 SoG(Silicon on Glass) 공정을 이용하여 제작하였다.

1. 서론

정전력(electrostatic force)을 이용한 구동방식은 전극의 형상과 배치에 따라 코움 드라이브(Comb-drive) 방식과 평행 판(parallel plate) 방식으로 나눌 수 있다. 코움 드라이브의 경우 겹쳐진 전극의 길이가 구동거리에 비해 큰 경우 일정한 구동력을 확보할 수 있으나 구동력이 작은 단점이 있다. 평행 판 구동형의 경우 구동력은 크나 안정된 구동거리가 초기 전극 사이 간격의 1/3 정도로 제한되며[1] 선형 구동 특성이 코움 드라이브에 비해 좋지 않은 단점이 있다. 본 연구에서는 앞에서 살펴본 두 가지 구동방식의 장단점을 보완하여 코움 드라이브에 비해 구동력은 크고 평행 판 구동 방식에 비해서는 선형 특성이 우수하며 더 큰 안정된 구동거리 확보가 가능한 특성을 갖는 회전형(rotary) 마이크로 액츄에이터에 적합한 새로운 전극 배치 및 정전력 구동 방식을 제안한다. 제안된 구동방식을 이용하여 고밀도 HDD의 트랙방향 저장밀도를 증가시키기 위해 사용되는 듀얼 스테이지 서보(dual-stage servo)용 마이크로 액츄에이터를 설계하였으며 SoG(Silicon on Glass) 공정을 이용하여 제작하였다.

2. 본론

2.1 SEA의 구동 방식

그림 2.1에서는 본 연구에서 제안하는 구동 방식의 전극 배치를 보여준다. 전극 면에 평행한 정전력 F_x 와 전극 면에 수직인 정전력 F_y 의 합력 F_e 방향으로 전극을 구동하게 되는데 정전력의 합력과 전극의 운동 방향을 일치시킴으로써 구동력을 효율적으로 사용할 수 있으며 고정전극과 운동전극의 겹치는 길이를 변화시킴으로써 구동 특성을 조절할 수 있다. 두 전극사이에 작용하는 정전력은 식 (2-1)과 같다.

$$F_e = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$\phi = \tan^{-1}(F_x/F_y) \tag{2-1}$$

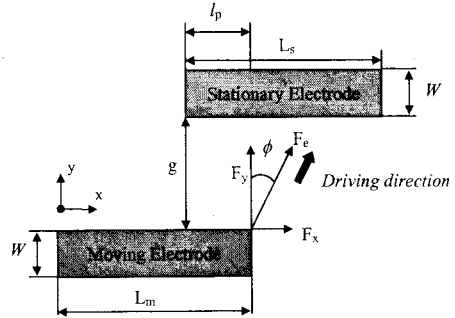


Fig. 2.1 Analysis model of SEA

2.1.1 정전력 해석 모델

본 논문에서 제안하는 구동방식은 $0.1 < l_p/L < 0.5$ 의 조건에서 구동되며 전극 간격이 변하는 방향으로 구동되기 때문에 프린지(fringe) 효과를 무시할 수 없다. 프린지 효과가 x, y 각 방향의 정전력에 미치는 영향을 알아 보기 위해 그림 2.1의 해석 모델을 아래의 그림 2.2에서와 같이 겹치는 전극 길이에 해당하는 부분과 프린지 효과에 의한 부분으로 나누어 생각할 수 있다.

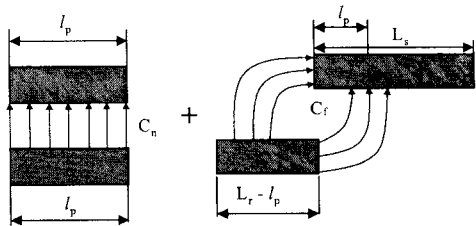


Fig. 2.2 Capacitance decomposition of SEA

프린지 효과에 의한 영향이 x, y 각 방향의 정전력에 미치는 영향을 알아 보기 위해 FEM 해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 정전기장 해석(electrostatic field analysis)을 실시하였다. 그림 2.3에서는 겹쳐진 전극 길이(overlap length: l_p)의 변화에 따른 x 방향의 정전력의 변화를 보여준다. 위쪽 실선은 프린지 효과를 무시했을 경우의 정전력을 나타내는데 전극의 단면 높이(height) 당 정전력 F_x 는 전극 길이가 전극 간격의 3 배 이상인 경우 다음 식(2-2)와 같이 나타낼 수 있다.

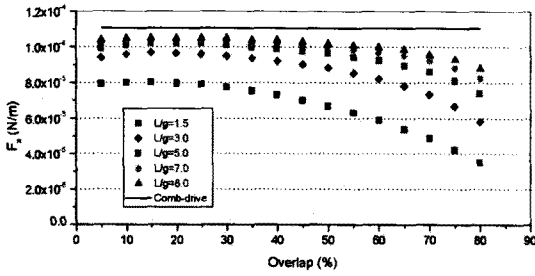


Fig. 2.3 F_x according to overlap

$$F_x = \alpha \times \left(\frac{1}{2} \frac{\epsilon_a}{g} V^2 \right) \quad (2-2)$$

where, $\alpha = \alpha(L, g, W, l_p)$

여기서, ϵ_a 는 공기의 유전율(permittivity)이고 α 는 프린지 효과를 고려하기 위한 보정 계수(correction factor)로서 전극 간격(gap), 전극 길이(L), 전극 폭(W), 겹치는 전극 길이(l_p)에 의해 결정된다. 그림 2.4에서는 전극 사이의 간격을 변화 시키가면서 계산한 각각의 전극 길이에서의 α 값의 변화를 보여준다. α 는 전극 간격에 따라 선형적으로 변화하며 전극 길이에 따라 변화율이 결정되고 프린지(fringe) 효과를 무시할 경우 1이 됨을 알 수 있다. 따라서 α 는 다음 식 (2-3)과 같이 전극 간격에 대한 1차 식으로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = A \times g + 1 \quad (2-3)$$

여기서, g 는 전극사이의 간격을 나타내며 A 는 전극

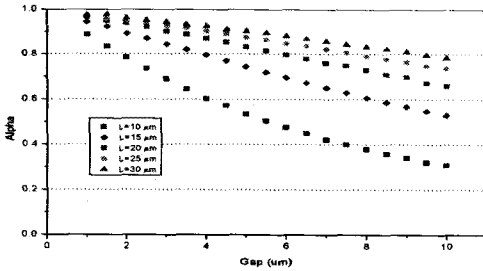


Fig. 2.4 F_x correction factor according to gap

길이(L)의 함수로서 다음과 같이 3차의 다항식으로 표시할 수 있다.

$$A = c_1 \times L^3 + c_2 \times L^2 + c_3 \times L + c_4 \quad (2-4)$$

그림 2.5에서는 겹치는 전극 길이(l_p)의 변화에 따른 y 방향의 정전력을 보여준다. 프린지 효과가 고려된 FEM 결과가 평행판 모델이 비해 항상 큰 값을 갖게 되며 그 차이는 겹치는 전극길이에 관계없이 일정함을 알 수 있다. 따라서, y 방향의 전극 단위 높이 당 정전력의 경우 프린지 효과를 무시한 평행 판 모델에 비해서 일정한 크기만큼 평행 이동하여 표현할 수 있으므로 다음 식과 같이 보정 계수 β 를 사용하여 나타낼 수 있다.

$$F_y = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_a l_p}{g^2} V^2 + \beta V^2 \quad (2-5)$$

where, $\beta = \beta(L, g, W, l_p)$

여기서 β 는 전극의 길이(L), 전극의 폭(W), 전극사이의 간격(g), 겹친 전극의 길이(l_p) 등에 의해 결정된

다. (l_p/L)이 0.1에서 0.5 사이인 경우 β 는 전극 사이의 간격(gap)의 함수로만 표시할 수 있으며 구동 거리가 초기 전극 간격에 비해 크지 않은 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

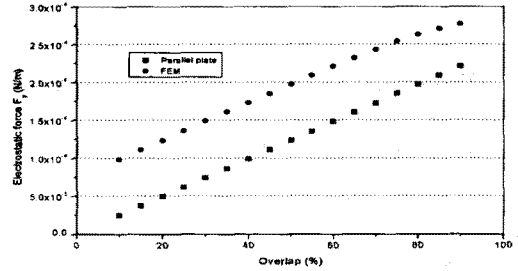


Fig. 2.5 F_y according to overlap

$$\beta = \frac{B}{g}, \quad g > 0 \quad (2-6)$$

여기서, B 는 전극의 초기 간격과 구동 거리를 고려하여 결정하는 상수이다.

2.1.2 SEA의 구동특성

그림 2.6에서는 회전 구동을 위한 전극 배치를 보여준다. 앞 절의 정전력 해석 모델을 이용하여 $L_s = 20 \mu\text{m}$, $W_s = 20 \mu\text{m}$, $L_r = 20 \mu\text{m}$, $W_s = 6 \mu\text{m}$, $g = 6 \mu\text{m}$ 인 경우 F_x , F_y 를 구하면 다음과 같다.

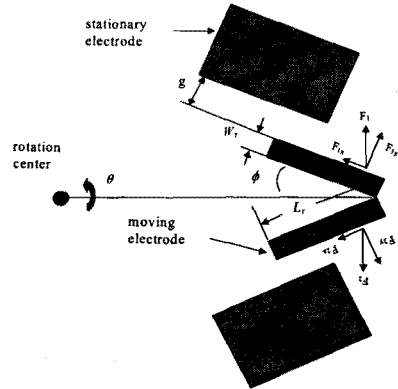


Fig. 2.6 Arrangement of the unit cell

$$F_x = \alpha \times \left[\frac{1}{2} \frac{\epsilon_a}{(g - l\theta)} V^2 \right] \quad (2-7)$$

$$\alpha = A \times g + 1$$

$$A = 1.2 \times 10^{-6} L_s^3 - 1.4 \times 10^{-4} L_s^2 + 6.2 \times 10^{-3} L_s - 1.1 \times 10^{-1}$$

$$F_y = \left[\frac{1}{2} \frac{\epsilon_a l_p}{(g - l\theta)^2} + \beta \right] V^2 \quad (2-8)$$

where, $\beta = B/g$, $B = 4.21 \times 10^{-12}$

상하 고정전극에 각각 $V_b + V_c$, $V_b - V_c$ 를 인가한 후 Taylor 급수를 이용하여 식을 전개하면 다음과 같은 선형 관계식을 구할 수 있다.

$$F_{e, \text{uni}} = F_1 - F_2 = K_{e, \text{uni}} \theta + K_{v, \text{uni}} V_c \quad (2-9)$$

where,

$$K_{e,unit} = 1V_b^2 \left[2 \cos \phi \left\{ \frac{\epsilon_a l_p}{g^3} + \frac{B}{g^2} \right\} + \sin \phi \left\{ \frac{\epsilon_a}{g^2} \right\} \right]$$

$$K_{v,unit} = 2V_b \left[\cos \phi \left\{ \frac{\epsilon_a l_p}{g^2} + \frac{2B}{g} \right\} + \sin \phi \left\{ \epsilon_a A + \frac{\epsilon_a}{g} \right\} \right]$$

2.2 회전형 마이크로 액츄에이터 설계

SEA를 이용하여 HDD의 듀얼 스테이지 서보에 사용될 회전형 마이크로 액츄에이터를 설계 하였다. 앞 절에서 계산된 전극 쌍을 한 개의 구동 단위 셀(unit cell)로 구성하여 회전중심을 기준으로 반경 1mm 안에 전극을 배치한다. 각각의 브랜치에서 구동단위 셀 들간의 간격은 인접한 전극간의 간격을 고려하여 배치하게 되는데 앞절의 전극 사양인 경우 28 μm 으로 결정할 수 있다. 본 연구에서 설계된 전극 배치의 경우 메인 브랜치(main branch)와 서브 브랜치의 개수가 각각 32개와 28개, 각 브랜치에 연결된 구동 단위 셀 들의 개수는 각각 21개와 6개이다. 회전 구동 토크(driving torque)는 각 단위 셀 들의 구동 토크의 합으로 계산할 수 있으므로 다음과 같이 된다.

$$T(\theta, V_b, V_c) = \sum_{i=1}^n T_{unit} = \sum_{i=1}^n l_i F_{e,unit} = K_e \theta + K_v V_c \quad (2-10)$$

where, n = number of driving unit cell

마이크로 액츄에이터의 회전 방향 운동만을 고려할 경우 슬라이더를 장착한 전체 시스템의 운동 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + (K_m - K_e)\theta = K_v V_c \quad (2-11)$$

여기서, J 는 마이크로 액츄에이터와 슬라이더의 회전 관성 모멘트, c 는 감쇠계수, K_m 은 회전 스프링 상수, T 는 구동 토크이다. 식 (2-11)에서 알 수 있듯이 설계된 마이크로 액츄에이터는 $K_m > K_e$ 인 경우에 안정적(stable) 인데 앞 절에서 설계된 액츄에이터의 경우 2.27 μm 으로 평행 판 구동 방식에 비해 10% 이상 안정된 구동거리 확보가 가능함을 알 수 있다.

감쇠 효과를 무시할 경우 마이크로 액츄에이터의 회전 구동 방향 고유 진동수는 $V_b = 12V$, $V_c = 6V$ 구동시

$$K_e = 1.73 \times 10^{-5} \text{ Nm/rad.}$$

$$K_m = 6.68 \times 10^{-5} \text{ Nm/rad.}$$

$$J_{slider} = 3.61 \times 10^{-13} \text{ Kg m}^2,$$

$J_{act} = 2.13 \times 10^{-13} \text{ Kg m}^2$ 이므로, 슬라이더를 장착했을 경우 1.491 Hz 슬라이더를 장착하지 않은 상태에서는 2.481 Hz 가 되며 초기 구동 토크는 $3.21 \times 10^{-8} \text{ Nm}$ 로서 코음 드라이브 구동에 비해 50 % 이상 큰 값을 얻을 수 있다.

2.3 제작 및 결과

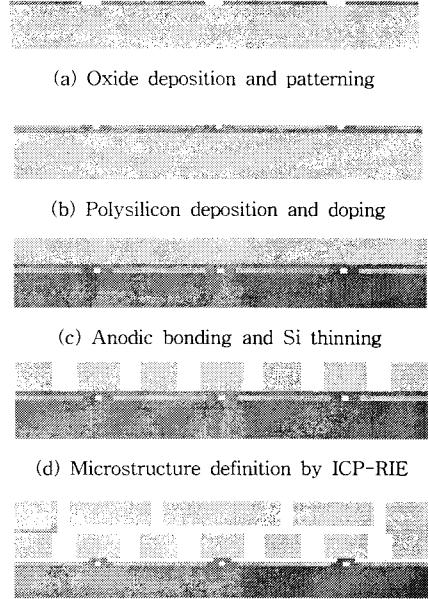
2.3.1 제작 공정

실리콘 웨이퍼에 산화 막을 적층 한 후 RIE 장비를 이용하여 산화 막을 식각(etching) 한다(a). 폴리 실리콘(poly-silicon)을 적층 한 후 도핑(doping)하여 전기적 연결선을 완성한다(b). Pyrex 7740 유리 웨이퍼와 어노딕 본딩(anodic bonding) 한 후 실리콘을 미세 구조물 두께인 100 μm 로 가공한다(c). ICP-RIE 장비를 이용하여 실리콘을 식각한 후(d) 미세 구조물과 플랫폼을 결합하고 희생층(sacrificial layer)으로 사용된 산화막을 불산(HF)으로 식각하여 운동부를 릴리즈

(release) 한다(e).

2.3.2 결과

그림 2.8 에서는 고정 전극과 운동 전극 그리고 운동 전극을 연결하는 내 외곽 링(ring)과 회전 스프링(flexural spring) 및 앵커(anchor)로 이루어진 미세 구조물을 보여준다. 전극들은 직경 2 mm 의 동심원 안에 배치되어 있으며 미세 구조물의 최소 폭은 6 μm , 높이는 100 μm 이다.



(e) Platform assemble and release
Fig. 2.7 Fabrication process

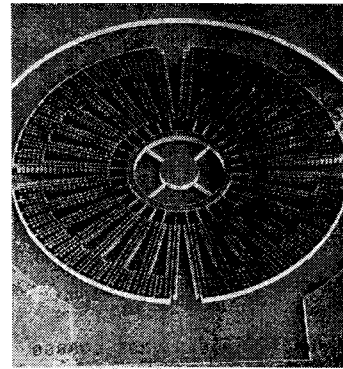


Fig. 2.8 SEM photograph

3. 결 론

본 연구에서는 코음 드라이브에 비해 구동력은 크고 평행 판 구동 방식에 비해서는 선형 특성이 우수하며 안정된 구동거리가 증가하는 특성을 갖는 새로운 정전력 구동 방식(SEA)을 제안하였다. SEA의 정전력 모델을 이용한 해석 결과 코음 드라이브에 비해서는 구동력이 50 % 이상 크며 평행 판 구동에 비해서는 안정된 구동거리가 10-30 % 이상 증가하는 구동 특성을 얻을 수 있었다. SEA 이용하여 HDD의 트랙방향 저장밀도를 증가시키기 위한 듀얼스테이지서보(dual-stage servo)

에 사용될 마이크로 액츄에이터를 설계하고 SoG(Silicon on Glass) 공정을 이용하여 제작하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Joseph I. Seeger and Selden B. Cray, "Stabilization of Electrostatically Actuated Mechanical Devices", TRANSDUCERS '97, Chicago, 1997
- [2] D. W. Cho, J. Y. KIM, S. J. Lee, S. M. Choi, "A Microactuator for High-Density Hard Disk Drive", ASME 2000, MEMS-Vol.2, pp.307-312, 2000