

대면적 플랫폼을 갖는 Probe-based Storage Device(PSD)용 정전형 2축 MEMS 스테이지의 설계

정일진*, 전종업⁺

(논문접수일 2006. 1. 19, 심사완료일 2006. 3. 22)

Design of an Electrostatic 2-axis MEMS Stage having Large Area Platform for Probe-based Storage Devices

Iljin Chung*, Jong Up Jeon⁺

Abstract

Recently the electrostatic 2-axis MEMS stages have been fabricated for the purpose of an application to PSD (Probe-based Storage Device). However, all of the components(platform, comb electrodes, springs, anchors, etc.) in those stages are placed in-plane so that they have low areal efficiencies, which is undesirable as data storage devices. In this paper, we present a novel structure of an electrostatic 2-axis MEMS stage that is characterized by having large area platform. For obtaining large area efficiency, the actuator part consisting of mainly comb electrodes and springs is placed right below the platform. The structure and operational principle of the MEMS stage are described, followed by a design procedure, structural and modal analyses using FEM(Finite Element Method). The areal efficiency of the MEMS stage was designed to be about 25%, which is very large compared with the conventional ones having a few percentage.

Key Words : MEMS stage(MEMS 스테이지), Probe-based Storage Device(PSD), Electrostatic actuator(정전형 액추에이터), Electrostatic force(정전기력)

1. 서론

나노미터 크기의 주사 탐침(scanning probe)이 기록매체

의 표면에 근접하여 정보를 기록/재생하는 PSD(Probe-based Storage Device)는 정보 저장기기의 대용량화, 소형화, 그리고 저가격화를 충족시킬 수 있는 신개념의 저장기기

* 울산대대학원 기계자동차공학과
+ 교신저자, 울산대학교 기계자동차공학부 (jujeon@ulsan.ac.kr)
주소: 680-749 울산광역시 남구 무거2동 산29번지

로, 90년대 이 후 선진 연구기관에서 활발히 연구되고 있다. Fig. 1은 PSD의 개념도를 나타낸 것이다⁽¹⁾. PSD는 정보의 기록 및 재생기능을 수행하는 다중 탐침 모듈, 기록매체를 구동하는 MEMS 다축 스테이지, 기록 및 재생신호를 처리하기 위한 신호처리 모듈로 구성되는데^(1,2), 이 중 기록매체를 구동하기 위한 MEMS 스테이지는 크게 전자력형^(3,4)과 정전형^(1,5)으로 나뉘어 연구가 진행되고 있다. 정전형은 전자력형에 비해 그 구조가 간단하고 소비전력이 작으며 발열문제가 없고 제작이 비교적 용이하며 구동용 전극을 그대로 변위 감지용 센서전극으로 활용할 수 있는 장점 등을 가지고 있다. 일반적으로 정전형은 전자력형에 비해 구동력이 매우 작은 것으로 인식되고 있으나, 구동전압을 100V 내외까지 증가시킴으로써 실용적으로 충분히 사용 가능한 구동력을 얻을 수 있다.

정전형 MEMS 스테이지는 현재 Carley 등⁽⁵⁾과 Kim 등⁽¹⁾에 의해 연구 개발이 진행되고 있다. 그러나, 이 스테이지들은 모두 기록매체가 장착되는 플랫폼(platform)과 이를 구동하기 위해 구동력을 발생하는 콤 전극부(comb electrodes), 이 들을 지지하기 위한 스프링부가 동일 평면상에 위치하는 구조를 하고 있어 플랫폼의 면적율(areal efficiency, 스테이지 전체 크기에 대한 플랫폼 크기의 비)이 수 %로 매우 작은 문제점을 가지고 있다. 플랫폼의 면적율은 기록밀도와 더불어 정보 저장기기에 있어서 디바이스 전체 크기 대비 저장용량을 결정짓는 중요한 파라미터 중의 하나로 가능한 한 크게 하는 것이 바람직하다. 기존의 스테이지는 면적율이 작다는

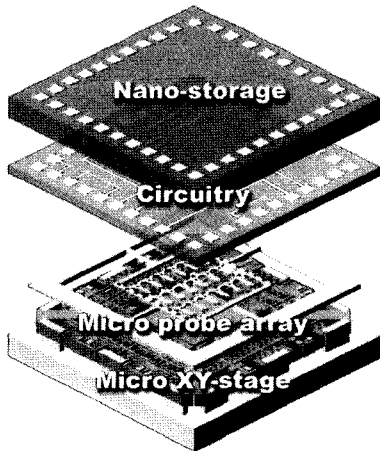


Fig. 1 Conceptual drawing of PSD(Probe-based Storage Device)⁽¹⁾

단점 뿐만 아니라, 스테이지의 구동축(x, y 축) 간의 기계적 커플링으로 인해 제어계의 구성이 복잡해지는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는, 플랫폼의 면적율이 높고 기계적 커플링이 없는 새로운 구조의 MEMS 스테이지에 대해 설명하고, 플랫폼의 면적을 뿐만 아니라 구동범위, 고유진동수, 플랫폼의 z 방향 처짐 등과 같은 스테이지의 대표적인 성능사양을 만족하면서 전체 크기가 최소인 스테이지를 설계하는 일련의 설계절차에 대하여 기술한다. 그리고, 스테이지의 설계 결과를 검증하기 위해 유한요소 해석 툴을 이용하여 수행한 스테이지의 구조 및 모드 해석 결과에 대하여 논한다.

2. 스테이지의 구조 및 구동원리

2.1 스테이지의 구조

Fig. 2는 본 논문에서 고안해 낸 대면적 플랫폼을 가지는 새로운 형태의 2축 정전형 MEMS 스테이지의 구조도이다. 스테이지는 크게 데이터가 기록되는 플랫폼, 구동력을 발생시키기 위한 콤 전극부, 그리고 이들을 지지하기 위한 스프링부, 구동전압을 공급하기 위한 패드부로 구성되며, y 축 액추에이터(y 축 구동용 콤 전극과 y 축 이동자용 및 고정자용 리브(rib for mover and stator), 내부접힘스프링(inner folded spring))를 x 축 액추에이터가 감싸는 형태를 취하고 있다. 플랫폼은 y 축 콤 전극부의 바로 위에 위치하며 플랫폼과 y 축 이동자 간의 부착을 위해 y 축 이동자용 리브 부분은 다른 부분보다 5~10 μm 만큼 높은 단차를 가진다. 내/외부 스프링의 구조로 다중 접힘 구조를 채택함으로써 스프링이 차지하는 공간을 최소화하여 플랫폼 면적율의 향상을 도모하였으며, deep RIE(Reactive Ion Etching)공정시 로딩효과/loading effect)에 의한 풋팅(footing)현상으로 인해 스프링의 강성이 설계값보다 작아지는 현상을 방지하기 위하여 각각 두 개의 접힘 스프링이 한 조의 스프링을 구성하도록 설계하였다. 또한 Fig. 2 (d)에서 보는 바와 같이 H-빔 형태의 구조물⁽⁶⁾ 스프링의 양 측면에 형성시켜 놓았다. 한편, 구조물 전체의 z 방향 처짐을 보상하기 위하여 y 축 방향 상하단에 지지 스프링(support spring)을 배치하였다. 제작에 있어서의 공정의 용이성 및 스테이지 이동부의 질량 감소를 도모하기 위해, y 축 액추에이터 및 x 축 이동자에 있어서 구조물의 폭이 넓은 부분에는 사각형상의 다수의 에칭 홀(etching hole)을 형성하였다.

본 연구의 스테이지는 콤 전극부의 바로 위에 플랫폼을 배치함으로써 기존 스테이지에 있어서 그 구조적 한계로 인

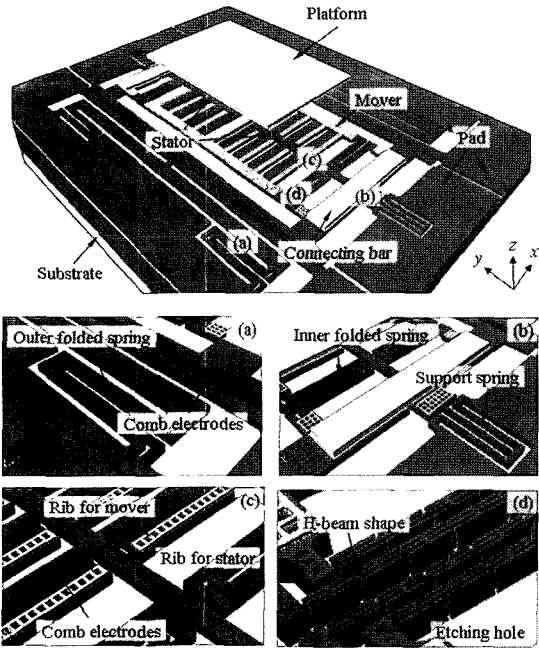


Fig. 2 The overall structure of stage

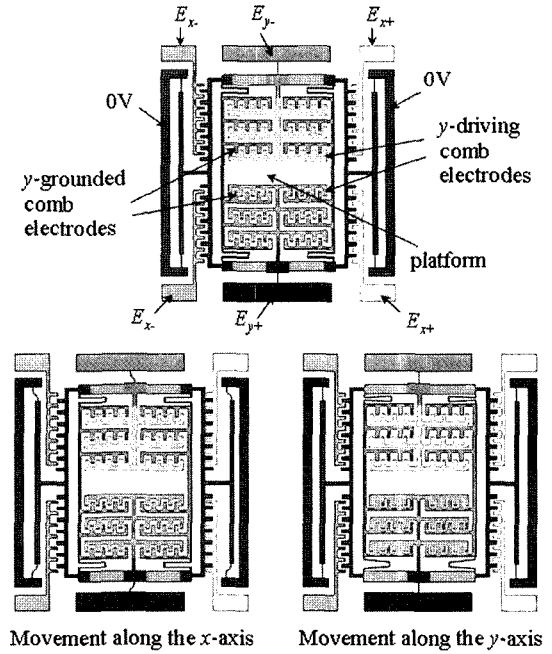


Fig. 3 Driving principle

해 플랫폼의 면적율이 작아지는 문제점을 극복하고자 하였다. 또한, 기존 스테이지와는 달리 x 축과 y 축 구동이 서로 독립적으로 이루어지는 구조로써 플랫폼 하단에 배치된 구동전극부는 플랫폼의 y 축 구동에 관계되고, 플랫폼 좌우에 배치된 구동전극부는 플랫폼과 플랫폼 하단에 배치된 y 축 구동전극부의 x 축 구동에 관계한다. 이러한 독립적인 구동은 구동축 간의 기계적 커플링을 배제시킬 수 있어 커플링에 의한 오차를 보상하기 위한 추가적인 제어모듈을 필요로 하지 않으므로 제어계의 구성이 매우 간단해지는 장점을 가진다.

2.2 구동원리 및 구동력

Fig. 3은 스테이지의 구동원리를 나타낸다. 플랫폼을 $+x$ 방향으로 이동시키려면 고정자 전극 E_{x+} 에 전압을 인가하여 $+x$ 방향의 구동력을 발생시키고, $-x$ 방향으로 이동시키려면 전극 E_{x-} 에 전압을 인가한다. 마찬가지로, 플랫폼을 $+y(-y)$ 방향으로 이동시키려면 전극 $E_{y+}(E_{y-})$ 에 전압을 인가하면 된다. Fig. 2에 있어서 y 축 구동용 콤 전극(y -driving comb electrodes)과 플랫폼이 얹어지는 y 축 접지용 콤 전극(y -grounded comb electrodes)은 서로 기계적으로 연결되어 있으나 구동용 콤 전극(전극 E_{y+} 와 E_{y-})에는 구동전압이 인가되고 접지용 콤 전극에는 제로 볼트가 인가되어야 하므로 이들은 전기적

로는 서로 분리되어 있다.

실제 스테이지를 구동함에 있어서는 전압과 구동력 간의 선형적인 관계를 유지하기 위해 차동 구동방식(differential driving method)이 많이 사용된다. 이 구동방식에 있어서는 플랫폼 중앙을 중심으로 좌우에 배치된(이는 x 축 구동의 경우이고 y 축 구동의 경우에는 상하) 고정자 전극 E_{x+} , E_{x-} 에 동일 크기의 바이어스전압을 각각 인가하고, 여기에 제어전압을 반대방향으로 차분적으로 각각 더하여 인가함으로써 구동력을 발생시킨다. 이 때, 플랫폼 하부에 연결된 이동자 전극인 y 축 접지용 콤 전극과 x 축 접지용 콤 전극에는 0V를 인가한다.

차동 구동방식에 있어서 구동력은 다음과 같다. x 축 구동력을 예로 들면, 플랫폼의 우측과 좌측 전극에 축적된 전기장 에너지 $U_{x\pm}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_{x\pm} = \frac{1}{2} C_{x\pm} (V_{0x} \pm v_x)^2 \quad (1)$$

단, $C_{x\pm}$, V_{0x} , v_x 는 각각 우/좌측 콤 전극 간의 정전용량, x 축 바이어스전압, x 축 제어전압이다. 여기서, 정전용량 $C_{x\pm}$ 는

$$C_{x\pm} = \frac{2\epsilon N_x t (x_0 \pm x)}{g} \quad (2)$$

와 같다. 단, ε , N_x , t , g , x_0 , x 는 각각 유전율, 우 또는 좌측 콤 전극의 개수(일반적으로 동일하게 설계함), 콤 전극의 깊이, 콤 전극 간의 간격, 구동용 콤 전극과 접지용 콤 전극이 초기에 서로 겹쳐져 있는 길이, 구동변위이다. 구동력 $F_{comb,x\pm}$ 은 가상일의 원리(virtual work theory)에 따라, x 축 변위에 대한 전기장 에너지의 변화율로

$$F_{comb,x\pm} = \frac{\partial U_{x\pm}}{\partial x} \quad (3)$$

와 같이 표현되므로, 식 (1), (2), (3)으로부터 $x\pm$ 에 대한 구동력 $F_{comb,x\pm}$ 를 구하면,

$$F_{comb,x\pm} = \pm \frac{\varepsilon N_x t}{g} (V_{0x} \pm v_x)^2 \quad (4)$$

와 같고 이로부터 x 축 방향 총 구동력 F_x 를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} F_x &= F_{comb,x} \\ &= F_{comb,x+} + F_{comb,x-} = \frac{4\varepsilon N_x t}{g} V_{0x} v_x \end{aligned} \quad (5)$$

상기 식으로부터 구동력이 제어전압에 선형적임을 알 수 있다.

구동력이 작은 경우, 목표하는 구동범위를 얻기 위해서는 스프링의 강성을 작게 설계하여야 한다. 그러나 스프링의 강성이 작아지면 스테이지는 충격에 약하고 외란에 대하여 매우 쉽게 불안정해지며, 낮은 고유진동수로 인하여 구동 주파수를 높이지 못하는 등 스테이지의 성능사양을 향상시키는 데 바람직하지 못한 결과를 초래한다. 따라서, 일반적으로 구동력은 클 수록 바람직하다. 식 (5)로부터 구동력을 크게 하기 위해서는 콤 구조물의 종횡비(aspect ratio: 깊이/간격)를 가능한 한 크게(콤 전극의 깊이 t 를 가능한 한 크게 하고, 콤 전극 간의 간격 g 를 가능한 한 작게) 하는 것이 바람직함을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 달성할 수 있는 종횡비의 크기는 공정 기술 및 장비에 의해 결정되므로 그 값을 크게 하는 데에는 한계가 있다. 일반적으로 어려움 없이 달성할 수 있는 최대 종횡비의 크기는 약 10~15 정도이다. 한편, 콤 전극의 개수를 증가시킴으로써 구동력의 향상을 가져올 수 있다. 그러나 콤 개수가 늘어나면 스테이지의 전체 크기가 커지게 되고, 이는 소형화를 지향하는 PSD(Probe-based Storage Devices)용 스테이지의 설계방향에 반하는 것이므로 콤의 개수를 늘리는 데에도 한계가 있다. 콤 전극 간의

간격을 작게 하면 스테이지의 크기를 늘리지 않고 주어진 공간 내에 더 많은 개수의 콤 전극을 배치할 수 있으나 공정 기술 및 장비의 한계로 인해 콤 전극 간의 간격을 줄이는 데에도 한계가 있다. 일반적으로 콤 전극 간의 간격은 3~5 μ m 정도이다. 식 (5)로부터 구동력은 상기한 종횡비와 콤 전극의 개수 i 외에도 구동전압(바이어스전압과 제어전압)에 관계함을 알 수 있다. 구동전압을 크게 함으로써 구동력을 증가시킬 수 있다. 따라서 본 논문에서는 구동력 증가에 제한을 가함으로써 스테이지의 성능사양 달성에 제한을 가하는 인자들의 영향을 극복하기 위하여 구동전압을 최대 110V(바이어스 전압 55V, 구동 전압 55V)로 충분히 크게 설정하였다.

Fig. 2와 3에서 알 수 있듯이, x 축용 콤 전극들은 플랫폼 좌우에 각각 일렬로 배치되어 있는 반면, y 축용 콤 전극들은 다수의 열을 이루어 배치되어 있다. 따라서 y 축 이동자에는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 y 축용 콤 전극 간에 발생하는 정전기력 $F_{comb,y}$ 이외에도 y 축 이동자용 리브와 고정자용 리브 간에 발생하는 정전기력 $F_{rib,y}$ 가 작용한다. 전술한 가상일의 원리를 이용하여 이 힘 $F_{rib,y}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$F_{rib,y} = \frac{\varepsilon L t (V_{0y} + v_y)^2}{2g_r^2} \quad (6)$$

단, L , V_{0y} , v_y , g_r 는 각각 이동자용 리브와 고정자용 리브 간의 중첩된 부분의 길이, y 축 바이어스전압, 제어전압, 이동자용 리브와 고정자용 리브 간의 간격이다. 식 (6)에 나타난 바와 같이 힘 $F_{rib,y}$ 는 이동자가 변위함(g_r 이 변화함)에 따라 그 크기가 변화한다. 또한 이 힘은 이동자의 변위(리브 간 간격)의 제곱에 반비례하므로 이동자의 불안정성을 높이는

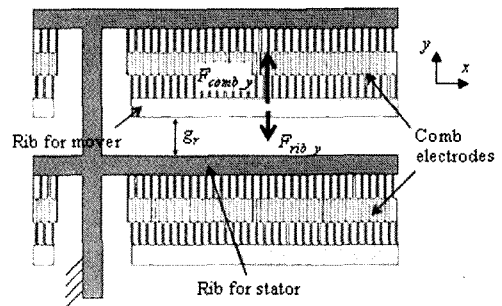


Fig. 4 Electrostatic forces produced by comb electrodes and ribs of stator and mover

힘으로 작용한다. 따라서, 이 힘이 구동력에 관여하는 정도는 가능한 한 억제하는 것이 바람직하며 본 연구에서는 그 크기가 구동방향 힘 $F_{comb,y}$ 의 최대 0.01배를 넘지 않도록 설계하였다. 구동력 $F_{comb,y}$ 뿐만 아니라 리브에 의한 힘 $F_{rib,y}$ 도 고려하면 y 축 방향 총 구동력은

$$F_y = F_{comb,y} - F_{rib,y}$$

$$= \frac{4\varepsilon N_y t}{g} V_{0y} v_y - \frac{\varepsilon L t (V_{0y} + v_y)^2}{2g_r^2} \quad (7)$$

와 같다.

3. 스테이지의 설계

3.1 설계 목표 및 사양

스테이지의 설계에 있어서 설계 목표는 대면적 플랫폼을 가질 뿐만 아니라, 구동범위, 고유진동수, 플랫폼의 z 방향 처짐 등과 같은 스테이지의 대표적인 성능사양을 만족하면서 최소의 전체 크기를 가지는 스테이지를 설계하는 것이다. Table 1에 나타난 대표적인 성능사양은 정보저장장치로써 PSD가 갖추어야 할 성능사양을 고려하여 결정하였다.

1) 플랫폼 면적율

Fig. 5는 플랫폼의 면적율을 정의하기 위한 변수들을 나타내며, 각 변수들은 플랫폼(p_x, p_y), 플랫폼의 x 축 구동을 위한 콤팩트 전극부(c_x), y 축 고정자와 이동자의 연결부(b_y), 스프링부(o_x, o_{y1}, o_{y2}), x 축 이동자용 리브(s_x)의 배치공간을 나타낸다. 이 변수들을 사용하여 플랫폼의 면적율 η 를 나타내면

$$\eta(\%) = \frac{p_x \times p_y}{(p_x + 2o_x + 2c_x + 2s_x)(p_y + 2o_{y1} + 2o_{y2} + 2b_y)}$$

$$\eta(\%) \geq 20\% \quad (8)$$

Table 1 Target specifications

Specifications	Value
Areal efficiency	$\geq 20\%$
Driving range	$\geq \pm 50\mu\text{m}$ @110V
Natural frequency	$\geq 250\text{Hz}$
Deflection along z -axis	$\leq 300\text{nm}$
Total size	Minimize

와 같다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 스프링 배치공간 o_x, o_{y2} 의 일부분에 패드부가 배치되어 있으므로 실제 제품으로 사용될 스테이지 제작 시에는 패드부를 이 부분에 국한하여 배치함으로써 패드부가 차지하는 공간을 최소화할 수 있다. 따라서, 상기 식 (8)의 플랫폼 면적을 계산식에 패드부가 차지하는 공간은 별도로 고려하지 않았다. 한편, Fig. 5를 보면 플랫폼의 주위에 많은 빈 공간이 형성되어 있음을 알 수 있다. 제품용 스테이지 설계 시에는 이 빈 공간의 크기를 최소화함으로써 플랫폼의 면적율을 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

2) 구동범위

플랫폼의 y 축 구동범위 Δy 는 식 (7)의 구동력 F_y 와 내부 접힘스프링의 y 축 스프링 상수 $k_{i,y}$ 에 의해 결정되고, x 축 구동범위 Δx 는 식 (5)의 구동력 F_x 와 외부접힘 스프링의 x 축 스프링 상수 $k_{o,x}$, 지지스프링의 x 축 스프링 상수 $k_{s,x}$ 에 의해 결정되며,

$$\Delta y = \frac{F_y}{k_{i,y}}, \Delta y \geq 50\mu\text{m} \quad (9)$$

$$\Delta x = \frac{F_x}{k_{o,x} + k_{s,x}}, \Delta x \geq 50\mu\text{m} \quad (10)$$

와 같다. 여기서, 스프링 상수 $k_{i,y}, k_{o,x}, k_{s,x}$ 는 각각 다음과 같다.

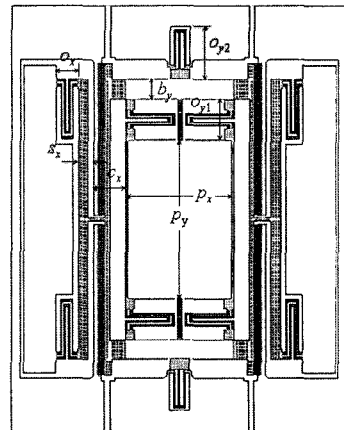


Fig. 5 Definition of symbols for calculating an areal efficiency

$$k_{i-y} = \frac{Et_i w_i^3}{l_i^3} \times \frac{N_i}{n_i} \quad (11)$$

$$k_{o-x} = \frac{E t_o w_o^3}{l_o^3} \times \frac{N_o}{n_o} \quad (12)$$

$$k_{s-x} = \frac{2N_s E t_{s1} t_{s2} w_{s1}^3 w_{s2}^3}{l_{s1}^3 l_{s2}^3} \left(\frac{2E t_{s1} w_{s1}^3}{l_{s1}^3} + \frac{E t_{s2} w_{s2}^3}{l_{s2}^3} \right) \quad (13)$$

단, E 는 스프링 재료의 영계수이고 N_i 와 n_i , N_o 와 n_o 는 각각 내부접힘스프링과 외부접힘스프링에 대하여 스프링의 개수와 접힘수(folded number)를 나타낸다. t , w , l 은 각각 스프링의 길이와 폭, 길이를 나타내며 첨자 i , o , $s1$, $s2$ 는 각각 내부접힘스프링, 외부접힘스프링, 두 개의 지지스프링을 표시한다.

3) 고유진동수

스테이지의 y 축 고유진동수 f_y 는 플랫폼 및 플랫폼 하단의 y 축 이동자의 질량과 내부접힘스프링의 스프링 상수에 의해 결정되고, x 축 고유진동수 f_x 는 플랫폼 및 y 축 이동자와 고정자의 질량, x 축 이동자의 질량, 외부접힘스프링과 지지스프링의 스프링상수에 의해 결정되며,

$$f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{i-y}}{m_{eff-y}}}, \Delta f_y \geq 250\text{Hz} \quad (14)$$

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{o-x} + k_{s-x}}{m_{eff-x} + m_{eff-y}}}, \Delta f_x \geq 250\text{Hz} \quad (15)$$

와 같다. 단 m_{eff-x} , m_{eff-y} 는 각각 플랫폼의 x 축 및 y 축 구동시 이동하는 부분의 유효질량이다.

4) z방향 처짐

스테이지 이동부의 자중에 의한 플랫폼의 z 방향 처짐은, 플랫폼과 y 축 이동자의 자중 및 내부접힘스프링의 z 방향 강성에 의해 결정되는 1차적인 처짐과, 전체 이동부의 자중과 외부접힘스프링, 지지스프링의 z 방향 강성에 의해 결정되는 2차적인 처짐의 합으로 계산된다. 1차적인 처짐과 플랫폼의 총 처짐의 크기 Δz_y , Δz_{total} 는 각각

$$\Delta z_y = m_{eff-y} g / \left(\frac{E w_i t_i^3 N_i}{l_i^3 n_i} \right), \Delta z_y \leq 300\text{nm} \quad (16)$$

$$\Delta z_{total} = \Delta z_y + m_{eff-x} g / \left(\frac{E w_o t_o^3 N_o}{l_o^3 n_o} + \frac{E w_{s1} t_{s1}^3 N_{s1}}{9(l_{s1} + l_{s2})^3} \right),$$

$$\Delta z_{total} \leq 300\text{nm} \quad (17)$$

와 같다. 단, g 는 중력가속도이다.

3.2 설계 절차 및 결과

스테이지의 설계절차를 Fig. 6에 도시하였다. 먼저, 면적율 η 에 최소값 $\eta_{min}(=20\%)$ 을 대입하고, 면적율과 관련된 변수 o_x , o_{y1} , o_{y2} , s_x , c_x , b_y 에 각각 초기값을 대입하면 식 (8)로

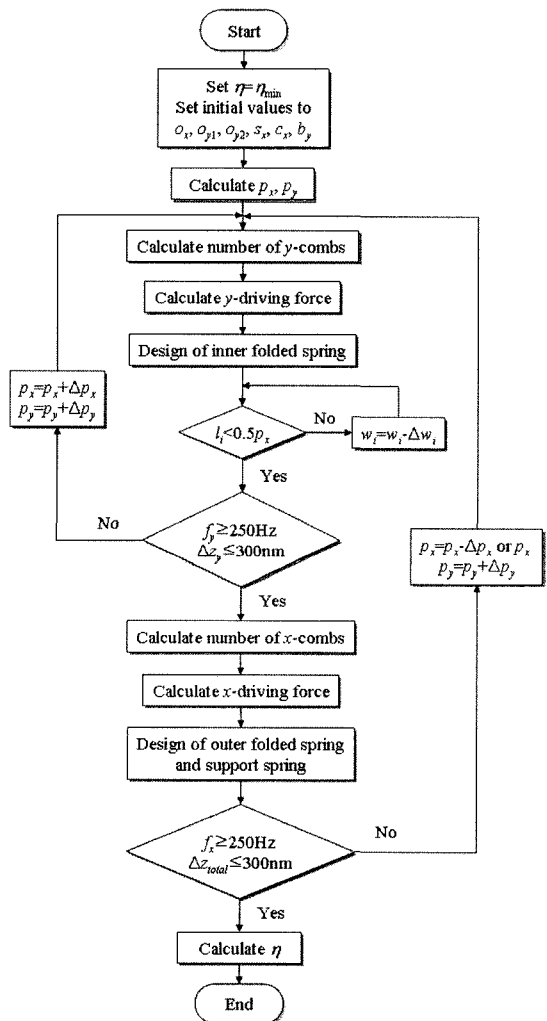


Fig. 6 Design procedure

부터 p_x, p_y 가 산출되고, 산출된 p_x, p_y 로부터 y 축 콤 전극의 개수가 계산된다. 즉, y 축 콤 전극부는 플랫폼 바로 아래에 배치되므로, 산출된 p_x, p_y 와 콤 전극의 폭과 길이, 콤 간 간극, 콤이 고정되는 리브의 폭, 고정자용 리브 간 간격 등으로부터 y 축 콤 전극의 개수가 결정된다. 이와 같이 구해진 콤 전극의 개수는 식 (7)의 y 축 구동력 계산에 이용되며, 이 구동력을 구동범위로 나누어 내부접힘스프링의 스프링 상수를 결정한다. 이 때, 계산된 스프링 상수와 초기 스프링 배치면적의 크기로부터 내부접힘스프링은 적절한 길이 l_1 와 폭 w_1 를 가지도록 설계된다. 여기서, 설계된 내부접힘스프링의 길이 l_1 는 $p_x/2$ 보다 작아야 초기 설정한 스프링의 배치면적 내에서 내부접힘스프링의 배치가 가능하며, 이 보다 큰 경우에는 스프링의 폭 w_1 를 조절한다. 내부접힘스프링의 설계 후, 식 (14)와 (16)을 이용하여 계산한 스테이지의 y 축 고유진동수 및 z 방향 처짐량이 목표로 하는 성능사양(각각 최소 250Hz, 최대 300nm)을 만족하지 못하면, p_x, p_y 의 크기를 좀 더 크게 하여 구동력을 증가시키고 내부 접힘 스프링의 설계를 다시 수행한다. 이상에서 기술한 절차를 거쳐 y 축 설계를 완료한 후 계속해서 x 축을 설계를 수행한다.

x 축 콤 전극의 수는 길이 p_y 에 비례하며, 길이 p_y 로부터 구해진 콤 전극의 개수를 이용하여 식 (5)의 x 축 구동력을 계산한다. 이 x 축 구동력을 x 축 구동범위로 나누어 외부접힘스프링 및 지지스프링의 x 축 스프링 상수를 계산한다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 외부접힘스프링과 지지스프링 각각의 배치공간 o_x, o_{y2} 의 일부분에는 패드부가 배치되어 있다. 패드부의 크기는 와이어 본딩을 위한 최소 크기로 그 크기는 매우 작으므로(일반적으로 $(100\sim300)\times(100\sim300)\mu\text{m}^2$), 배치공간 o_x, o_{y2} 에는 외부접힘스프링과 지지스프링을 배치하기에 충분한 여유공간이 존재한다. 따라서, 외부접힘스프링과 지지스프링의 경우 내부접힘스프링과는 달리 스프링의 길이를 조절하는 것이 비교적 자유로우므로, 스프링의 폭 w_x 와 w_y 는 고정하고 길이 l_0 와 l_1 를 조절함으로써 위에서 계산된 x 축 스프링 상수에 부합시킨다. 외부접힘스프링 및 지지스프링의 설계 후, 식 (15)와 (17)을 이용하여 계산한 스테이지의 x 축 고유진동수 및 z 방향 총 처짐량이 목표로 하는 성능사양(각각 최소 250Hz, 최대 300nm)을 만족하지 못하면, x 축 구동력을 증가시키기 위해 p_y 를 증가시킨다. 한편, 플랫폼 하단에 배치되는 y 축 콤 전극부의 열(row) 간 피치는 y 축 고정자용 리브의 피치에 의해 결정되므로, p_y 를 리브의 피치보다 크게 증가시키지 않으면 p_y 를 증가시켰음에도 불구하고 y 축 콤의 개수는 증가하지 않는다. p_y 를 증가시킬 경우 플랫폼 면적이 과도하게 커지는 것을 방지하거나 또는 일정

하게 유지하기 위해 이에 상응하는 만큼 p_x 를 감소시킬 수 있다. 그러나, p_y 의 증가분이 리브의 피치 보다 작은 경우에 p_x 를 감소시키면, 상기한 바와 같이 y 축 콤 전극의 개수는 증가하지 않고 오히려 p_x 의 감소로 인해 개수가 감소하므로 y 축 구동력이 작아지게 된다. 따라서, 이 경우에는 p_x 를 고정한다. p_x 또는 p_y 값이 변화하는 경우 이로 인해 플랫폼의 크기 및 y 축 콤 전극의 개수가 변화할 수 있으므로 y 축 설계부터 설계과정을 다시 반복한다. 이상에서 기술한 설계절차를 거쳐 구동범위, 고유진동수, z 방향 처짐 등의 목표 성능사양이 만족되면 최종적으로 식 (8)의 면적율을 재차 계산한 후 설계를 완료한다. Table 2는 이상의 절차를 거쳐 설계된 스테이지의 최종 성능사양 및 각 구성요소의 최종 설계 치수를 나타낸다.

4. 스테이지의 구조해석 및 모드해석

본 절에서는 앞 절에서 얻어진 스테이지의 성능사양 설계값을 검증하고 스테이지의 동적특성을 알아보기 위해 ANSYS를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 해석에 사용된 <100> 단결정 실리콘의 영계수, 포와송비, 밀도는 각각 130GPa, 0.279, 2,330kg/m³이다. 해석의 편이상 형상의 단순화를 위해 콤 전극과 에칭 홀은 모델링에서 제외하였고, 그로 인한 질량 변화분 만큼 스테이지의 일부 두께를 조절하였다. 콤 전극과 에칭 홀이 전체 이동부 질량에서 차지하는 비율은

Table 2 Final specifications and dimension of the designed stage

Parameter	Value
Moving axis	2-axis
Driving range(x/y)	$\pm 61/53\mu\text{m}$ @110V
Natural frequency(x/y)	256/378Hz
Deflection along z-axis	283nm
Platform size	$2660\times 3620\times 50\mu\text{m}^3$
Total size	$5880\times 6840\mu\text{m}^2$
Areal efficiency	25%
Comb electrodes	$5\times 70\times 50\mu\text{m}^3$
Gap between combs	$5\mu\text{m}$
Inner folded springs	$5\times 800\times 50\mu\text{m}^3$
Outer folded springs	$5\times 1020\times 50\mu\text{m}^3$
Support springs	$5\times 720/640\times 50\mu\text{m}^3$

각각 1.7%, 6.3%이다.

3.1절에서 오일러 빔 이론을 바탕으로 설계한 스테이지의 구동범위를 실제로 얻을 수 있는지 검증하기 위해, 2.2절에서 계산된 정전기력을 물리적 힘으로 변환하고 유한요소 모델에 적용하여 스테이지의 최대 변위를 해석하였다. 해석결과는 Fig. 7에 나타낸 바와 같다. 바이어스전압 및 구동전압이 각각 55V일 때, x 축 및 y 축에 대하여 각각 60.5, 53.2 μ m의 구동변위를 나타내었다. 3.1절에서 구한 구동변위 61, 53 μ m와 거의 일치함을 알 수 있다.

Fig. 8은 중력에 의한 스테이지의 z 방향 처짐량을 시뮬레이션한 결과이며, 256nm의 처짐이 발생하였다. 3.1절에서 구한 처짐량 283nm와 거의 유사한 결과를 보이고 있다. 자중에 의해 이동자 콤과 플랫폼은 고정자 콤에 대해 아래방향으로 처지게 되는데, 구동전압 인가시 이 처짐의 크기는 정전기력에 의해 어느 정도 보상될 수 있으므로(정전기력은 이동자 콤과 고정자 콤의 서로 교차하는 부분의 면적이 증가하는 방향으로 작용하므로 구동전압 인가시 이동자 콤에는 이를 위로 끌어 올리는 힘이 작용하게 된다) 구동시의 처짐량은 상기 값보다 작을 것으로 판단된다. 본 논문에서는 플랫폼의 두께를 50 μ m로 설계하였으며 그 자중은 전체 자중의

40% 이상을 차지한다. 이 플랫폼의 두께를 50 μ m 보다 더 줄인다면 z 방향 처짐량은 보다 감소시킬 수 있다.

모드 해석(modal analysis)은 액추에이터의 해석과정 중에 일반적으로 시행하는 해석방법 중의 하나로써, 이를 이용하여 3.1절에서 구한 구동축(x , y 축)에 대한 고유진동수값의 해석해를 검증할 수 있고, 능동적인 구동제어가 이루어지지 않는 스테이지 운동모드에 대한 고유진동수를 알아낼 수 있다. Fig. 9는 본 연구에서 설계한 스테이지의 모드해석을 수행한 결과이다. 1차 및 2차 진동모드는 각각 x 축 및 y 축 병진 운동으로 그 진동수의 크기는 각각 260.5Hz, 373Hz이었고, 3차 및 4차 진동모드는 각각 z 축에 대한 회전 및 병진운동으로 각각 1021Hz, 1065Hz로 나타났다. 2축 스테이지 운동에

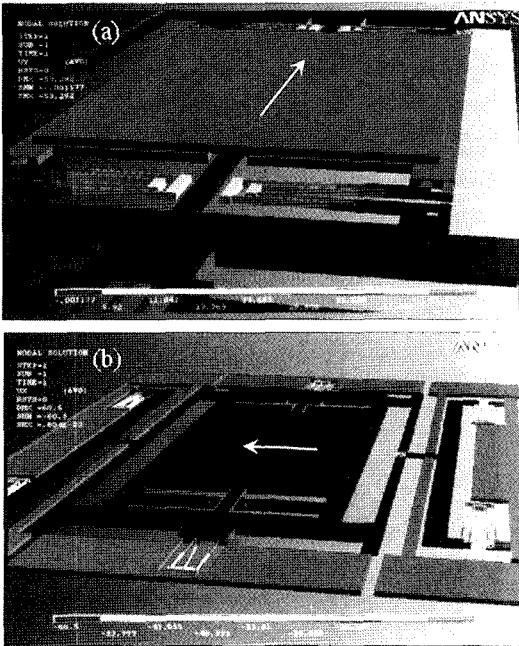


Fig. 7 Virtual displacement of the stage along the (a) y -axis and (b) x -axis at a driving voltage of 55V

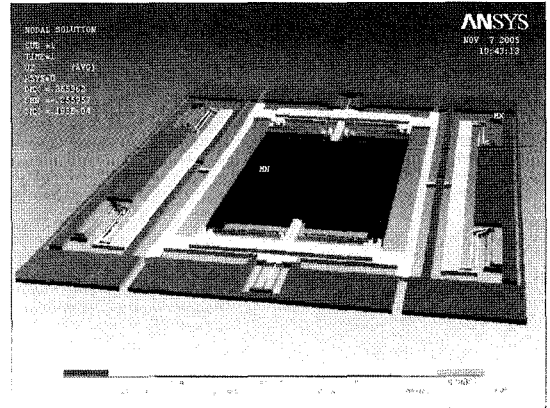


Fig. 8 Deflection of the stage by gravity

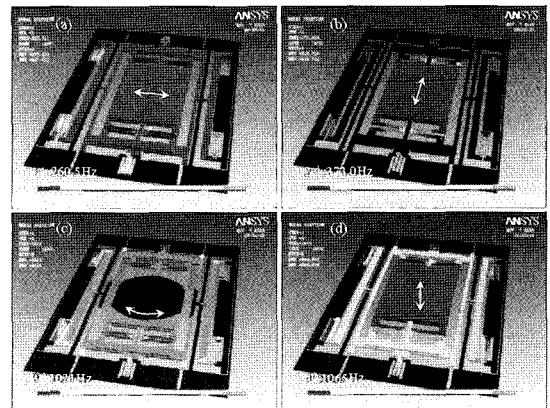


Fig. 9 Mode shape: (a) x -axis translation(1st mode), (b) y -axis translation(2nd mode), (c) z -axis rotation (3rd motion), (d) z -axis translation(4th mode)

있어서 요구되는 조건은 능동적인 구동제어가 이루어지지 않는 3차 이상의 진동모드는 일어나기 어려운 구조이어야 한다. 즉, 3차 이상 진동모드의 진동수는 가급적 1, 2차 진동수와 멀리 떨어져 있어야 한다. 본 스테이지의 경우 해석 결과에서 알 수 있듯이 3차 및 4차 모드의 고유진동수는 1, 2차 진동수의 2.7배 이상으로 상당히 큰 값을 나타내고 있어 만족할 만한 구조임을 알 수 있다. 한편, 1, 2차 고유진동수의 경우 3.1절에서 해석적인 방법에 의해 구한 378Hz, 256Hz와 거의 일치함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존 PSD용 정전형 MEMS 스테이지의 낮은 플랫폼 면적율을 증가시키기 위하여, 플랫폼부 아래에 콤팩트 전극부를 두는 새로운 구조의 대면적 정전형 2축 MEMS 스테이지를 고안하였으며, 이를 해석적으로 설계하고 유효 요소 해석을 통해 검증하였다.

본 스테이지는 기존 스테이지에 비해 플랫폼의 면적율이 높을 뿐만 아니라, 2축 액추에이터를 배치함에 있어서 x 축 액추에이터가 y 축 액추에이터 전체를 감싸는 형태를 취함으로써 기존 스테이지가 가지는 구동축 간의 기계적 커플링을 제거하였다.

스테이지는 플랫폼의 면적율 뿐만 아니라 구동범위, 고유진동수, 플랫폼의 z 방향 처짐 등과 같은 대표적인 성능사항을 만족하면서 전체 크기가 최소크기가 되도록 일련의 절차를 거쳐 설계되었다. 설계된 스테이지의 사양으로써 플랫폼의 면적율은 25%, 구동범위는 구동전압이 110V일 때 x, y 축 각각에 대하여 $\pm 61\mu\text{m}, \pm 53\mu\text{m}$, 고유진동수는 x, y 축 각각에 대하여 256Hz, 378Hz, z 방향 처짐은 283nm, 전체 크기는 약 $5.9 \times 6.8\text{mm}^2$ 이다.

본 연구를 통해 고안, 설계된 스테이지는 기록매체를 구동하기 위한 PSD용 MEMS 스테이지로써 뿐만 아니라 미소 광 얼라인먼트 장치, 샘플의 정밀 스캐닝 장치 등 다양한 장치의 정밀 스테이지로써 충분히 활용 가능할 것으로 기대된다.

후기

이 논문은 한국학술진흥재단 선도연구자지원사업의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2003-041-D20065).

참고 문헌

- (1) Kim, C. H., Jeong, H. M., Jeon, J. U. and Kim, Y. K., 2003, "Silicon Micro XY-Stage with a Large Area Shuttle and No-Etching Holes for SPM-Based Data Storage," *J. Microelectromechanical systems*, Vol. 12, No. 4, pp. 470~478.
- (2) Vettiger, P., Cross, G., Despont, M., Drechsler, U., Durig, U., Gotsmann, B., Haberle, W., Lantz, M. A., Rothuizen, H. E., Stutz, R. and Binnig, G. K., 2002, "The "Millipede"-Nanotechnology Entering Data Storage," *IEEE Trans. on Nanotechnology*, Vol. 1, No. 1, pp. 39~55.
- (3) Rothuizen, H., Despont, M., Drechsler, U., Genolet, G., Haberle, W., Lutwyche, M., Stutz, R. and Vettiger, P., 2002, "Compact Copper/epoxy-Based Electromagnetic Scanner for Scanning Probe Applications," *Proc. 15th IEEE Int. Conf. MEMS*, Las Vegas, USA, pp. 582~585.
- (4) Cho, J. W., Byun, M. H., Lee, K. I., Kim, S. H. and Choi, Y. J., 2004, "Development of a Low Voltage Type Electromagnetic Actuator for Probe-based Data Storage," *Proc. 6th Korean MEMS Conf.*, KAL Hotel, Korea, pp. 411~416.
- (5) Carley, L. R., Bain, J. A., Fedder, G. K., Greve, D. W., Guillou, D. F., Lu, M., Mukherjee, T. and Santhanam, S., 2000, "Single-chip Computers with Microelectromechanical Systems-based Magnetic Memory," *J. Applied Physics*, Vol. 87, No. 9, pp. 6680~6685.
- (6) Grade, J. D. and Jerman, H., 2000, "A Large-deflection Electrostatic Actuation for Optical Switching Applications," <http://www.iolon.com/images/01.pdf>.