

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

정일진*, 전종업#

Electrostatic 2-axis MEMS Stage with a Large Area Platform for Probe-based Storage Devices

Iljin Chung* and 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 such as a few percentage, 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 a large areal efficiency of about 25%. 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 and analysis, the fabrication and measurement results. Experimental results show that the driving ranges of the fabricated stage along the x and y axis were $27\mu\text{m}$, $38\mu\text{m}$ at the supplied voltages of 65V, 70V, respectively and the natural frequencies along x and y axis were 180Hz, 310Hz, respectively. The total size of the stage is about $5.9 \times 6.8\text{mm}^2$ and the platform size is about $2.7 \times 3.6\text{mm}^2$.

Key Words : Micro stage (마이크로 스테이지), Electrostatic actuator (정전형 액추에이터), Electrostatic force (정전기력), Probe-based storage device (프로브기반 정보저장기기)

1. 서론

나노미터 크기의 주사 탐침(scanning probe)이 기록매체의 표면에 근접하여 정보를 기록/재생하는 PSD(Probe-based Storage Device)는 정보 저장기기의 대용량화, 소형화, 그리고 저가격화를 충족시킬 수 있는 신개념의 저장기기로, 90년대 이후 선진 연

구기관에서 활발히 연구되고 있다. Fig. 1 은 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^{1,5,6}으로 나

☞ 접수일: 2006년 1월 31일, 게재승인일: 2006년 8월 1일

* 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail jujeon@ulsan.ac.kr Tel. (052) 259-2139

되어 연구가 진행되고 있다. 정전형은 전자력형에 비해 그 구조가 간단하고 소비전력이 작으며 발열 문제가 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.

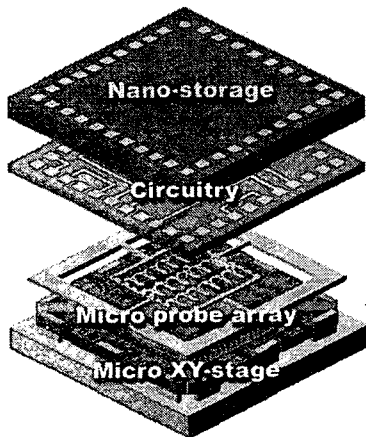


Fig. 1 Conceptual drawing of PSD(Probe-based Storage Device)¹

정전형 MEMS 스테이지는 현재 Kim 등¹, Carley 등⁵, Baeck 등⁶에 의해 연구 개발이 진행되고 있다. 그러나, 이 스테이지들은 모두 기록매체가 장착되는 플랫폼(platform)과 이를 구동하기 위해 구동력을 발생하는 콤 전극부(comb electrodes), 이들을 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 저장 기기에 있어서 디바이스 전체 크기 대비 저장용량을 결정짓는 중요한 파라미터 중의 하나로 가능한 한 크게 하는 것이 바람직하다. 기존의 스테이지는 면적율이 작다는 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

대하여 설명하고, 플랫폼의 면적을 뿐만 아니라 구동범위, 고유진동수, 플랫폼의 z 방향 처짐 등과 같은 스테이지의 대표적인 성능사항을 만족하면서 전체 크기가 최소인 스테이지를 설계하는 일련의 설계절차에 대하여 기술하고자 한다.⁷ 그리고 스테이지의 설계 결과를 검증하기 위해 유한요소 해석 툴을 이용하여 수행한 스테이지의 구조 및 모드 해석 결과에 대하여 논한다.⁷ 마지막으로 스테이지의 제작공정 순서 및 제작 결과, 제작된 스테이지의 구동특성 실험결과에 대하여 기술하고자 한다.

2. 스테이지의 구조 및 구동원리

2.1 스테이지의 구조

Fig. 2는 본 논문에서 고안해 낸 대면적 플랫폼을 가지는 새로운 형태의 2 축 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 축용 콤 전극과 y 축 이동자용 및 고정자용 리브(rib for mover and stator), 내부접힘 스프링(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 μ m 만큼 높은 단차를 가진다. 내/외부 스프링의 구조로 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 설계하였으며, 또한 Fig. 2(d)에서 보는 바와 같이 H-빔 형태의 구조물⁸을 스프링의 양 측면에 형성시켜 놓았다. 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 인해 플랫폼의 면적율이 작아지는 문제점을 극복하고자 하였다. 또한, 기존 스테

이지와는 달리 x 축과 y 축 구동이 서로 독립적으로 이루어지는 구조로써 플랫폼 하단에 배치된 구동 전극부는 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.

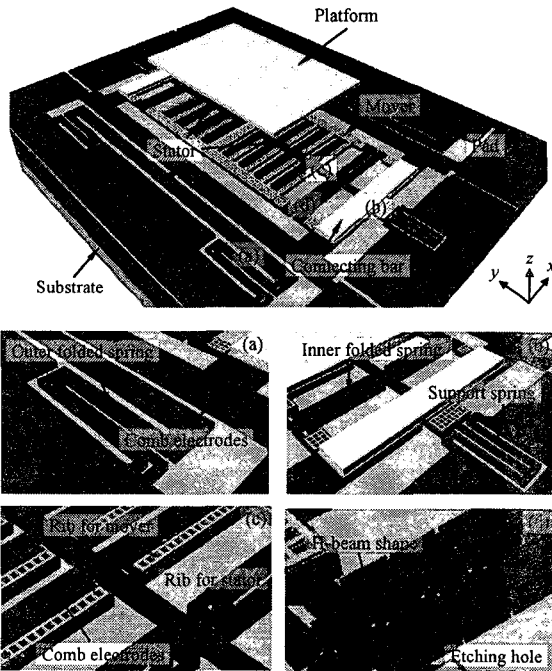


Fig. 2 The overall structure of stage

2.2 구동원리 및 구동력

Fig. 3 은 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. 실제 스테이지를 구동함에 있어서는 전압과 구동력 간의 선형적인 관계를 유지하기 위해 차동 구동 방식(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 제어 전압을 반대방향으로 차분적으로 각각 더하여 인가함으로써 구동력을 발생시킨다. 이 때, 플랫폼 하부에 연결된 이동자 전극인 y 축 접지용 콤 전극(y -grounded comb electrodes)과 x 축 접지용 콤 전극에는 0V 를 인가한다.

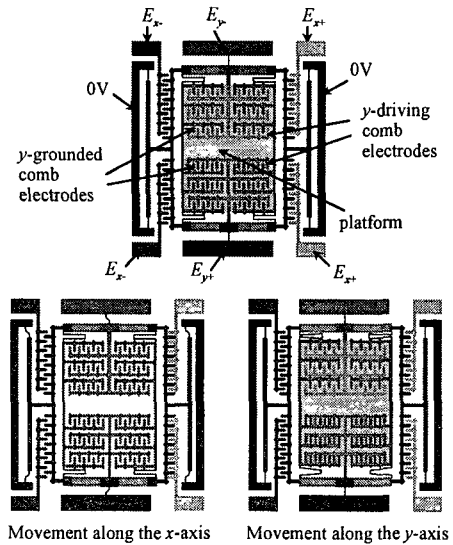


Fig. 3 Driving principle

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

$$U_{x\pm} = \frac{1}{2} \varepsilon \frac{2N_x t (x_0 \pm x)}{g} (V_{0x} \pm v_x)^2 \quad (1)$$

여기서, ε , N_x , t , g , x_0 , x , V_{0x} , v_x 는 각각 유전율, 우 또는 좌측 콤 전극의 개수(일반적으로 동일하게 설계함), 콤 전극의 깊이, 콤 전극 간의 간격, 구동용 콤 전극(driving comb electrodes)과 접지용 콤 전극이 초기에 서로 겹쳐져 있는 길이, 구동변위, x 축 바이어스전압, x 축 제어전압이다. 식 (1)의 전기장 에너지로부터 가상일의 원리(virtual work theory)를 이용하여 x ±에 대한 구동력 $F_{comb_x\pm}$ 을

구하면,

$$F_{comb_xt} = \frac{\partial U_{xt}}{\partial x} = \pm \frac{\epsilon N_x t}{g} (V_{0x} \pm v_x)^2 \quad (2)$$

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

$$F_x = F_{comb_x} = F_{comb_xt} + F_{comb_xt} = \frac{4\epsilon N_x t}{g} V_{0x} v_x \quad (3)$$

상기 식으로부터 구동력이 제어전압에 선형적임을 알 수 있다.

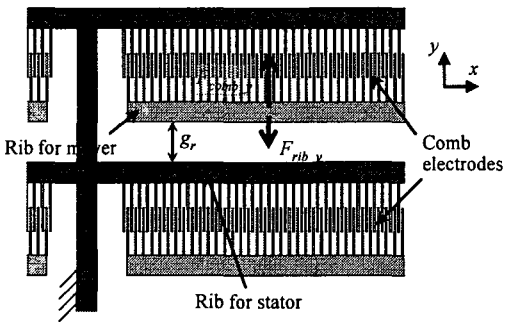


Fig. 4 Electrostatic forces produced by comb electrodes and ribs of stator and mover

Fig. 2 와 3 에서 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. 4 에 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. 가상의 원리를 이용하여 이 힘 F_{rib_y} 를 구하면 다음과 같다.

$$F_{rib_y} = \frac{\epsilon L t (V_{0y} + v_y)^2}{2g_r^2} \quad (4)$$

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 (4)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 힘으로 작용한다. 따라서, 이 힘이 구동력에 관여하는 정도는 가능한 한 억제하는 것이 바람직하며 본 연구에서는 그 크기가 구동방향 힘

F_{comb_y} 의 최대 0.01 배를 넘지 않도록 설계하였다. 구동력 F_{comb_y} 뿐만 아니라 리브에 의한 힘 F_{rib_y} 도 고려하면 y 축 방향 총 구동력 F_y 는

$$F_y = F_{comb_y} - F_{rib_y} = \frac{4\epsilon N_y t}{g} V_{0y} v_y - \frac{\epsilon L t (V_{0y} + v_y)^2}{2g_r^2} \quad (5)$$

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 1 에 나타난 대표적인 성능사양은 정보저장장치로서 PSD 가 갖추어야 할 성능사양을 고려하여 결정하였다.

Table 1 Target specifications

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

1) 플랫폼 면적율

Fig. 5 는 플랫폼의 면적율을 정의하기 위한 변수들을 나타내며, 각 변수들은 플랫폼(p_x, p_y), 플랫폼의 x 축 구동을 위한 콤 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

$$\eta = \frac{p_x \times p_y}{(p_x + 2o_x + 2c_x + 2s_x)(p_y + 2o_{y1} + 2o_{y2} + 2b_y)}, \quad \eta \geq 20\% \quad (6)$$

와 같다. Fig. 5 에 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 (6)의 플랫폼 면적을 계산식에 패드부가 차지하는 공간은 별도로 고려하지 않았다.

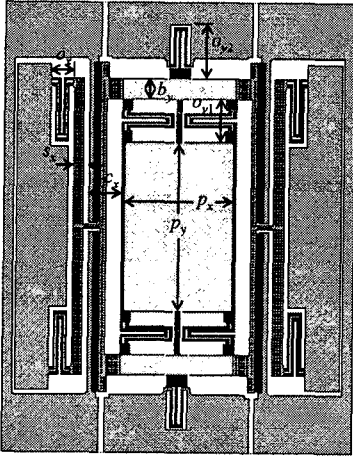


Fig. 5 Definition of symbols for calculating an areal efficiency

2) 구동범위

플랫폼의 y 축 구동범위 Δy 는 식 (5)의 구동력 F_y 와 내부접힘스프링의 y 축 스프링 상수 $k_{i,y}$ 에 의해 결정되고, x 축 구동범위 Δx 는 식 (3)의 구동력 F_x 와 외부접힘스프링의 x 축 스프링 상수 $k_{o,x}$ 지지스프링의 x 축 스프링 상수 $k_{s,x}$ 에 의해 결정되며,

$$\Delta y = \frac{F_y}{k_{i,y}}, \quad \Delta y \geq 50\mu\text{m} \quad (7)$$

$$\Delta x = \frac{F_x}{k_{o,x} + k_{s,x}}, \quad \Delta x \geq 50\mu\text{m} \quad (8)$$

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

$$k_{i,y} = \frac{Et_i w_i^3}{l_i^3} \times \frac{N_i}{n_i} \quad (9)$$

$$k_{o,x} = \frac{Et_o w_o^3}{l_o^3} \times \frac{N_o}{n_o} \quad (10)$$

$$k_{s,x} = \frac{2N_s Et_{s1} t_{s2} w_{s1}^3 w_{s2}^3}{l_{s1}^3 l_{s2}^3} \left(\frac{2Et_{s1} w_{s1}^3}{l_{s1}^3} + \frac{Et_{s2} w_{s2}^3}{l_{s2}^3} \right) \quad (11)$$

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 깊이와 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,

$$f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{i,y}}{m_{eff,y}}}, \quad \Delta f_y \geq 250\text{Hz} \quad (12)$$

$$f_x = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{o,x} + k_{s,x}}{m_{eff,x} + m_{eff,y}}}, \quad \Delta f_x \geq 250\text{Hz} \quad (13)$$

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

4) z 방향 처짐

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

$$\Delta z_y = m_{eff,y} g / \left(\frac{E w_i t^3 N_i}{l_i^3 n_i} \right), \quad \Delta z_y \leq 300\text{nm} \quad (14)$$

$$\Delta z_{total} = \Delta z_y + m_{eff,x} g / \left(\frac{E w_o t_o^3 N_o}{l_o^3 n_o} + \frac{E w_{s1} t_{s1}^3 N_{s1}}{9(l_{s1} + l_{s2})^3} \right), \quad \Delta z_{total} \leq 300\text{nm} \quad (15)$$

와 같다. 단, g 는 중력가속도이다.

3.2 설계 절차 및 결과

스테이지의 설계절차를 Fig. 6 에 도시하였다. 먼저, 면적을 η 에 최소값 $\eta_{min}(=20\%)$ 을 대입하고, 면적율과 관련된 변수 $o_x, a_{y1}, a_{y2}, s_x, c_x, b_y$ 에 각각 초기값을 대입하면 식 (6) 으로부터 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 (5)의 y 축 구동력 계산에 이용되며, 이 구동력을

구동범위로 나누어 내부접힘스프링의 스프링 상수를 결정한다. 이 때, 계산된 스프링 상수와 초기 스프링 배치 면적의 크기로부터 내부접힘스프링은 적절한 길이 l_i 와 폭 w_i 를 가지도록 설계된다. 여기서, 설계된 내부접힘스프링의 길이 l_i 는 $p_x/2$ 보다 작아야 초기 설정한 스프링의 배치면적 내에서 내부접힘스프링의 배치가 가능하며, 이 보다 큰 경우에는 스프링의 폭 w_i 를 조절한다. 내부접힘스프링의 설계 후, 식 (12)와 (14)를 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 내부접힘스프링의 설계를 다시 수행한다. 이상에서 기술한 절차를 거쳐 y 축 설계를 완료한 후 계속해서 x 축 설계를 수행한다.

x 축 콤 전극의 수는 길이 p_y 에 비례하며, 길이 p_y 로부터 구해진 콤 전극의 개수를 이용하여 식 (3)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_y 의 일부분에는 패드부가 배치되어 있다. 패드부의 크기는 와이어 본딩을 위한 최소 크기로 그 크기는 매우 작으므로(일반적으로 $(100\sim 300)\times(100\sim 300)\mu\text{m}^2$), 배치공간 o_x, o_y 에는 외부접힘스프링과 지지스프링을 배치하기에 충분한 여유공간이 존재한다. 따라서, 외부접힘스프링과 지지스프링의 경우 내부접힘스프링과는 달리 스프링의 길이를 조절하는 것이 비교적 자유로우므로, 스프링의 폭 w_o 와 w_s 는 고정하고 길이 l_o 와 l_s 를 조절함으로써 위에서 계산된 x 축 스프링 상수에 부합시킨다. 외부접힘스프링 및 지지스프링의 설계 후, 식 (13)과 (15)를 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 피치 보다 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 일정하게 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 (6)의 면적율을 재차 계산한 후 설계를 완료한다. Table 2는 이상의 절차를 거쳐 설계된 스테이지의 최종 성능사양 및 각 구성요소의 최종 설계 치수를 나타낸다.

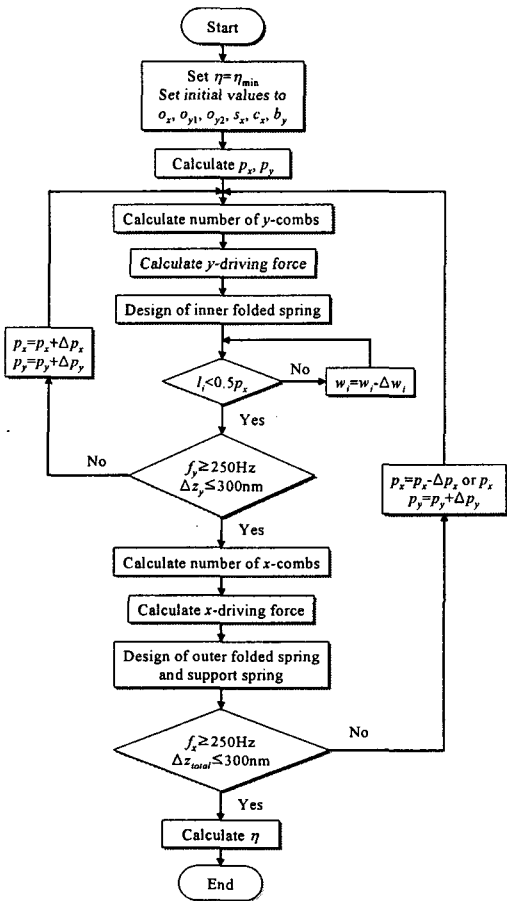


Fig. 6 Design procedure

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	$5 \times 720/640 \times 50\mu\text{m}^3$

4. 스테이지의 구조해석 및 모드해석

본 절에서는 앞 절에서 얻어진 스테이지의 성능 사양 설계값을 검증하고 스테이지의 동적특성을 알아보기 위해 ANSYS 를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 해석의 편의상 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 각각 1.7%, 6.3%이다.

3.1 절에서 오일러 빔 이론을 바탕으로 설계한 스테이지의 구동범위를 실제로 얻을 수 있는지 검증하기 위해, 2.2 절에서 계산된 정전기력을 물리적으로 변환하고 유한요소 모델에 적용하여 스테이지의 최대 변위를 해석하였다. 해석결과, x, y 축 각각에 대한 최대 구동변위는 바이어스전압 및 구동전압이 각각 55V 일 때, $60.5\mu\text{m}$, $53.2\mu\text{m}$ 로 나타났다. 3.1 절에서 구한 구동변위 $61\mu\text{m}$, $53\mu\text{m}$ 와 거의 일치함을 알 수 있다.

중력에 의한 스테이지의 z 방향 처짐량을 시뮬레이션하였으며, 그 결과 256nm 의 처짐이 발생하는 것으로 나타났다. 3.1 절에서 구한 처짐량 283nm 와 거의 유사한 결과를 보이고 있다. 본 논문에서는 플랫폼의 두께를 $50\mu\text{m}$ 로 설계하였으며 그 자중은 전체 자중의 40% 이상을 차지한다. 이 플랫폼

의 두께를 $50\mu\text{m}$ 보다 더 줄인다면 z 방향 처짐량은 보다 감소시킬 수 있다.

Fig. 7 은 본 연구에서 설계한 스테이지의 모드 해석을 수행한 결과이다. 1 차 및 2 차 진동모드는 각각 x 축 및 y 축 병진운동으로 그 진동수의 크기는 각각 260.5Hz, 373Hz 이었고, 3 차 및 4 차 진동모드는 각각 z 축에 대한 회전 및 병진운동으로 각각 1021Hz, 1065Hz 로 나타났다. 2 축 스테이지 운동에 있어서 요구되는 조건은 능동적인 구동제어가 이루어지지 않는 3 차 이상의 진동모드는 일어나기 어려운 구조이어야 한다. 즉, 3 차 이상 진동모드의 진동수는 가급적 1, 2 차 진동수와 멀리 떨어져 있어야 한다. 본 스테이지의 경우 해석 결과에서 알 수 있듯이 3 차 및 4 차 모드의 고유진동수는 1, 2 차 진동수의 2.7 배 이상으로 상당히 큰 값을 나타내고 있어 만족할 만한 구조임을 알 수 있다. 한편, 1, 2 차 고유진동수의 경우 3.2 절에서 해석적인 방법에 의해 구한 256Hz, 378Hz 와 거의 일치함을 알 수 있다.

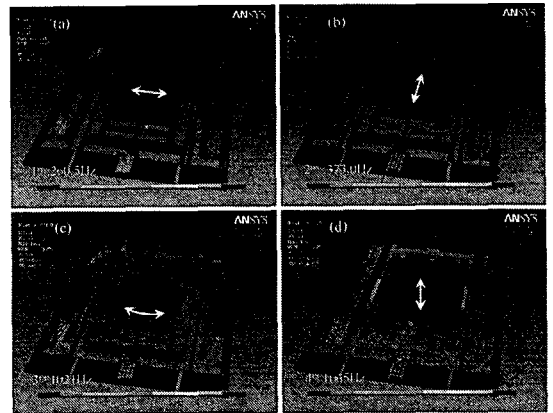


Fig. 7 Mode shape: (a) x-axis translation(1st mode), (b) y-axis translation(2nd mode), (c) z-axis rotation(3rd motion), (d) z-axis translation(4th mode)

5. 스테이지 제작

5.1 공정설계

Fig. 8 은 제작 공정도이다. 이하, 공정 순서에 대하여 기술한다.

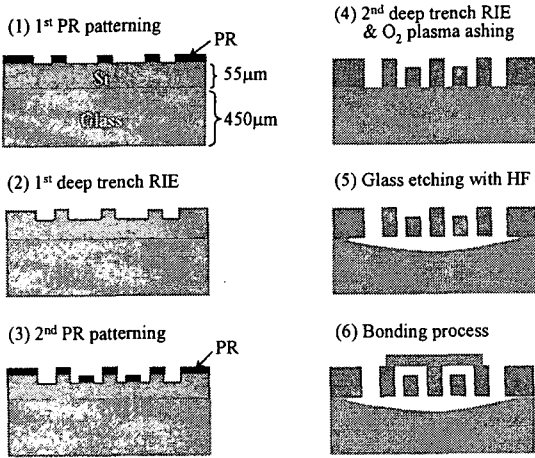


Fig. 8 Fabrication process

(1) 1st PR 패터닝(patterning)

본 공정은 SoG(Silicon on Glass) 웨이퍼 상에 PR(Photoresist)을 도포한 후, PR 을 추후 플랫폼이 부착될 y 축 이동자용 리브 부분의 형상대로 패터닝하는 공정이다. 웨이퍼를 3000rpm 으로 회전시켜 PR(AZ 7220)을 2µm 의 두께로 도포하고, 핫 플레이트(hot plate)를 이용하여 95℃에서 4 분 동안 소프트 베이킹(soft bake)한다. 이후, 14mW 의 자외선에 8 초 동안 노광한 뒤, CD30 을 이용하여 현상한다.

(2) 1st deep trench RIE

앞 공정에서 패터닝된 SoG 웨이퍼를 ICP-RIE(Inductively Coupled Plasma-Reactive Ion Etching) 장비를 이용하여 깊이 5µm 만큼 건식 식각한다. 본 공정을 통해 y 축 이동자용 리브 부분은 다른 부분보다 5µm 만큼 높은 단차를 가지게 된다.

(3) 2nd PR 패터닝

본 공정은 PR 을 플랫폼을 제외한 전체 구조물, 즉 콦 전극부, 스프링부, 앵커 등의 형상대로 패터닝하기 위한 공정이다. 5µm 의 단차가 있는 웨이퍼 상면에 재차 패터닝 작업을 수행하여야 하므로 웨이퍼를 1500rpm 으로 30 초간 회전시켜 PR 을 도포한 후 약 10 분간의 안정화 시간을 주어 PR 두께가 3µm 정도가 되도록 한다.

(4) 2nd deep trench RIE & O₂ 플라즈마 애싱

ICP-RIE 장비를 이용하여 유리면이 드러날 때까지 실리콘 웨이퍼를 건식 식각한 후, 마스크로 사용된 PR 을 완전히 제거한다. PR 은 추후의 부양 공정에서 잔류 폴리머에 의해 점착(stiction)현상이

발생하는 것을 방지하기 위해 O₂ 플라즈마 애셔(asher)를 사용하여 제거한다.

(5) 불산을 이용한 유리식각

불산(HF)을 이용하여 유리 기판을 습식 식각함으로써 구조물을 부양시킨다.

(6) 접합(bonding)

별도 제작한 플랫폼의 바닥면에 실리콘 절연 코팅제를 얇고 균일하게 도포하고, 적절한 점성에 이를 때까지 상온에서 약 30 분간 방치시킨 후, 정밀 마이크로스코프를 이용하여 플랫폼 바닥부를 y 축 이동자용 리브 부분에 정렬시킨 후, 부착한다.

5.2 제작 결과

스테이지는 상기 5.1 절의 공정설계에서 언급한 SoG 웨이퍼 뿐만 아니라 SOI(Silicon On Insulator) 웨이퍼를 사용하여 제작할 수 있다. 이때 제작방법은 SoG 웨이퍼를 이용한 경우와 거의 동일하다.

Deep trench RIE 공정시 스테이지의 바닥부분에 일반적으로 발생하는 풋팅(footing) 현상은 제작된 액추에이터의 치수를 설계 치수와 다르게 하므로 바람직하지 못한 현상이다. 무엇보다도 풋팅 현상에 의해 발생하는 가장 큰 문제점은 콦 깊이의 감소로 인해 구동력이 감소되고, 좌우(상하) 스프링 특성의 불균형(풋팅의 정도가 다른 경우)으로 인해 구동 중 이동자의 회전 현상이 쉽게 발생하여 목표하는 대변위를 만족시킬 수 없다는 점이다. SOI 웨이퍼로 스테이지를 제작할 경우의 장점은 deep trench RIE 공정에서 발생하는 이러한 풋팅 현상이 SoG 웨이퍼보다 훨씬 작게 발생한다는 점이다. 그러나, 불산을 이용한 부양 공정 후 구조물과 바닥면 간에 점착이 발생하였을 때, 절연층인 SiO₂ 의 두께가 일반적으로 1~3µm 에 불과하므로 구조물을 바닥면으로부터 떨어지게 하기 위한 스프링의 반력이 충분하지 않다는 단점이 있다. SOI 웨이퍼에 비해 SoG 웨이퍼는, 유리 기판면이 산화막층보다 이온 입자를 보다 잘 반사시키므로 풋팅 현상이 더 심하게 나타나는 단점이 있다. 반면에, SoG 웨이퍼는 바닥면이 유리이므로 불산 부양 공정에서 스테이지를 유리 기판으로부터 보다 높이 부양시킬 수 있고, 따라서 SOI 웨이퍼에 비해 점착 방지가 보다 용이한 장점이 있다. 단, 유리 기판의 과도한 식각은 점착 발생시 스프링의 과도한 변형을 유발시켜 스프링이 파손될 수 있으므로 지

나친 식각은 피해야 한다.

본 연구에서는 최초 SOI 웨이퍼를 이용하여 스테이지를 제작하였으나, 구조물과 바닥면 간에 발생하는 점착현상을 극복하지 못하였고, 이러한 점착문제를 해결하기 위해 SOI 웨이퍼 대신 SoG 웨이퍼를 이용하여 공정을 수행한 결과, 스테이지를 제작하는데 성공하였다. Fig. 9 는 제작한 스테이지의 전체 사진 및 콤 전극, 내부접힘스프링의 전자현미경 사진이다.

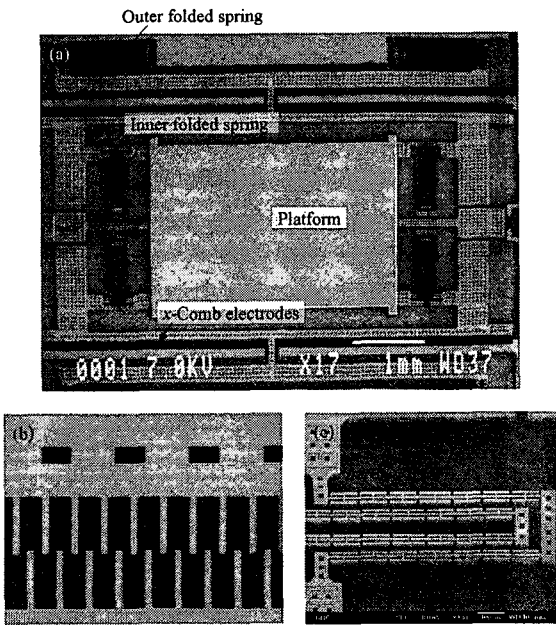


Fig. 9 Photograph showing an fabricated stage: (a) stage, (b) comb electrodes, (c) inner folded spring

6. 측정 및 고찰

제작한 스테이지의 구동변위, 과도응답, 그리고 주파수 응답 특성을 측정하였다. 플랫폼의 움직임을 측정하기 위해 플랫폼의 상면에 측정용 미러를 부착하였으며, 변위 센서로는 LDV(Laser Doppler Vibrometer) 를 사용하였다.

Fig. 10 은 구동전압에 따른 스테이지의 구동변위를 측정한 결과이다. 최대 구동변위는 x, y 축 각각에 대하여 65V, 70V 의 구동전압 인가시 27 μ m, 38 μ m 로 설계치 보다 작게 나왔는데, 이는 좌우(상하) 스프링 강성의 불균형 이외에 이동자 콤과 고

정자 콤 간의 간격이 비교적 큰 제작 오차를 가지고 제작되었기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 마스크 제작 비용을 고려하여 비교적 큰 공차(0.5 μ m)를 가지는 마스크를 사용하였고, 이로 인해 이동자 콤과 고정자 콤의 양 측면에 배치된 고정자 콤 간의 간격이 5 μ m 로 동일하지 않고 한 쪽은 넓고 한 쪽은 좁게 제작되었다. 이와 같이 콤 간 간격이 동일하지 않은 경우, 콤 전극에 전압 인가시 이동자는 구동방향 뿐만 아니라 구동방향에 수직한 방향(콤 간 간격이 좁은 방향)으로도 정전기력을 받게 되어, 플랫폼에 회전력이 발생하게 된다. 플랫폼을 변위시키기 위해 구동전압을 증가시키면 플랫폼이 변위함에 따라 전압 뿐만 아니라 콤 간의 교차면적이 증가하게 되므로 이 회전력은 급격히 증가하게 되고, 스프링의 회전 강성이 이 회전력을 견디기에 충분하지 못하면 플랫폼에 과도한 회전이 발생하여 이동자 콤과 고정자 콤이 서로 접촉하게 된다. 플랫폼의 회전을 최대한 억제하기 위해서는 마스크의 제작 오차를 줄이거나 스프링의 회전 강성을 증가시켜야 한다.

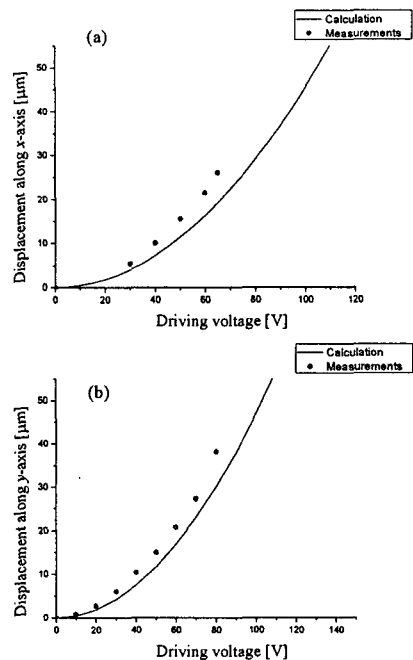


Fig. 10 Displacement versus driving voltage: (a) x-axis, (b) y-axis

시간 응답 특성을 측정하기 위해 x 축 구동용 콤팩트 전극에 30V, 1Hz 의 사각파(square wave) 구동전압을 인가하고, 스테이지의 x 축 움직임을 측정하였다. Fig. 11 은 측정 결과이다.

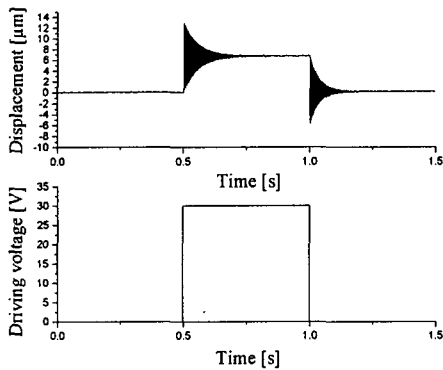


Fig. 11 Transient response

Fig. 12 는 스테이지의 x 축과 y 축 방향 운동의 주파수 응답 특성을 측정한 결과이다. x 축 및 y 축의 고유진동수는 각각 180Hz, 310Hz 로 측정되었으며, 이는 모드해석에 의한 고유진동수 값보다 약 60~80Hz 정도 작은 값이다. 이와 같이 실제 제작한 스테이지의 고유진동수가 설계치보다 작게 나오는 이유는 측정용 미러(전체 이동부 질량 대비 약 5% 가량의 질량)의 설치로 인한 이동부의 질량 증가 및 풋팅 현상과 제작오차 등에 의한 스프링의 강성 감소 때문인 것으로 판단된다

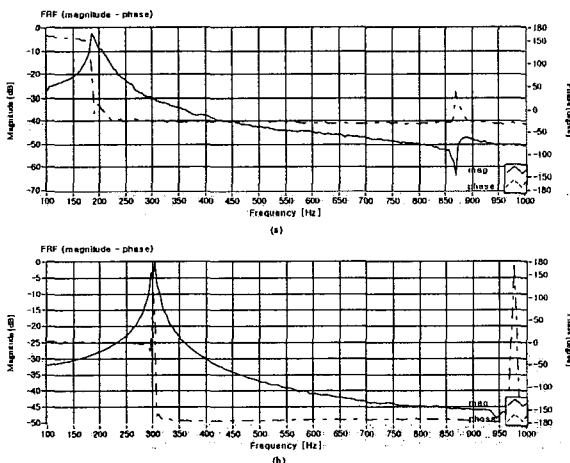


Fig. 12 Frequency response: (a) x -axis, (b) y -axis

본 스테이지의 경우, x 축이 y 축 전체를 감싸는 형태를 취하고 있어 전술한 측정 결과에서 알 수 있듯이 x 축 운동의 대역폭(Bandwidth)은 y 축 운동의 대역폭에 비해 작아진다. 가능한 한 빠른 DTR(Data Transfer Rate)이 요구되는 저장기기의 특성상, 이와 같이 대역폭이 작아지는 것은 바람직하지 못한 현상으로 생각되어 질 수 있다. 그러나, 본 스테이지를 이용한 데이터 기록/재생시 y 축을 하나의 데이터 열을 스캔하는 축으로 사용하고 x 축을 스캔이 완료된 하나의 데이터 열에서 다음 데이터 열로 이동하는 축으로 사용하면 DTR 은 x 축의 대역폭에 의해 대부분 결정되므로 y 축의 대역폭이 작아짐으로 인해 발생하는 DTR 손실은 그다지 크지 않을 것으로 판단된다.

본 스테이지의 x 축 액추에이터와 y 축 액추에이터 간의 직교오차는 대부분 마스크 패턴 상에서의 두 축 간 직교오차에 의존된다. 제작된 스테이지의 직교오차가 PSD 가 허용하는 오차 값보다 클 경우, 이를 해결하기 위해서는 허용 오차 이내의 직교오차를 갖는 마스크를 제작하여 사용하거나 되새김 제어기(feedback controller)를 사용하여 직교오차를 보정하여야 한다. 후자의 경우, 제어기의 구성이 복잡해지므로 본 스테이지가 갖는 장점 중의 하나인 제어기의 구성이 간단해지는 장점은 없어지게 된다.

7. 결론

본 논문에서는 기존 PSD 용 정전형 MEMS 스테이지의 낮은 플랫폼 면적을 증가시키기 위하여, 플랫폼 아래에 콤팩트 전극부를 두는 새로운 구조의 대면적 정전형 2 축 MEMS 스테이지를 고안하였으며, 이를 설계, 해석, 제작하고 구동특성을 측정하였다. 본 스테이지는 기존 스테이지가 가지는 구동축 간의 기계적 커플링을 제거하기 위해 x 축 액추에이터가 y 축 액추에이터 전체를 감싸는 형태를 취하고 있다. 스테이지는 플랫폼의 면적뿐만 아니라 구동범위, 고유진동수, 플랫폼의 z 방향 처짐 등과 같은 대표적인 성능사항을 만족하면서 전체 크기가 최소크기가 되도록 일련의 설계절차를 거쳐 설계되었으며, 유한요소 해석을 통해 설계 결과를 검증하였다. SoG 웨이퍼를 사용하여 스테이지를 제작하였으며, 제작된 스테이지의 플랫폼 면적율은 25%, 구동범위는 x, y 축 각각에 대

하여 인가전압 65V, 70V 에서 27 μ m, 38 μ m, 고유진동수는 x, y 축 각각에 대하여 180Hz, 310Hz, 전체 크기는 약 5.9 \times 6.8mm² 이었다. 본 연구를 통해 고안, 설계, 제작된 스테이지는 기록매체를 구동하기 위한 PSD 용 MEMS 스테이지로써 뿐만 아니라 미소 광 얼라인먼트 장치, 샘플의 정밀 스캐닝 장치 등 다양한 장치의 정밀 스테이지로써 충분히 활용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 한국학술진흥재단 선도연구자지원사업의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2004-041-D00091).

참고문헌

- Kim, C.-H., Jeong, H.-M., Jeon, J. U. and Kim, Y.-K., "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, 2003.
- 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., "The "Millipede"-Nanotechnology Entering Data Storage," IEEE Trans. on Nanotechnology, Vol. 1, No. 1, pp. 39-55, 2002.
- Rothuizen, H., Despont, M., Drechsler, U., Genolet, G., Haberle, W., Lutwyche, M., Stutz, R. and Vettiger, P., "Compact Copper/epoxy-Based Electromagnetic Scanner for Scanning Probe Applications," Proc. 15th IEEE Int. Conf. MEMS, Las Vegas, USA, pp. 582-585, 2002.
- Cho, J.-W., Byun, M.-H., Lee, K.-I., Kim, S.-H. and Choi, Y.-J., "Development of a Low Voltage Type Electromagnetic Actuator for Probe-based Data Storage," Proc. 6th Korean MEMS Conf., KAL Hotel, Korea, pp. 411-416, 2004.
- Carley, L. R., Bain, J. A., Fedder, G. K., Greve, D. W., Guillou, D. F., Lu, M., Mukherjee, T. and Santhanam, S., "Single-chip Computers with Microelectromechanical Systems-based Magnetic Memory," J. Applied Physics, Vol. 87, No. 9, pp. 6680-6685, 2000.
- Baeck, K.-L. and Jeon, J. U., "Electrostatic 2-axis MEMS Stage for an Application to Probe-based Storage Devices," J. Korean Soc. Precision Eng., Vol. 22, No. 11, pp. 173-181, 2005.
- Chung, I. and Jeon, J. U., "Design of an Electrostatic 2-axis MEMS Stage having Large Area Platform for Probe-based Storage Devices," Trans. Korean Soc. Machine Tool Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 82-90, 2006.
- Grade, J. D. and Jerman, H., "A Large-deflection Electrostatic Actuation for Optical Switching Applications," <http://www.iolon.com/images/01.pdf>, 2000.