

대면적 플랫폼을 갖는 정전형 2 축 MEMS 스테이지의 설계

정일진* (울산대 대학원 기계자동차공학과), 전종업, 백경득, 박규열 (울산대학교 기계자동차공학부)

Design of an electrostatic 2-axis MEMS stage with large area platform

I. Chung* (Graduate school, UOU)

J. U. Jeon, K. L. Baeck, K. Y. Park (School of Mecha. and Automotive Eng., UOU)

ABSTRACT

Recently the electrostatic 2-axis MEMS stages have been fabricated for the purpose of an application to PSD (Probe-based Storage Device). However, most of them have low area efficiency, which is undesirable as data storage devices, since all of the components (springs, comb electrodes, anchors, platform, etc.) are placed in-plane. In this paper, we present a novel structure of electrostatic 2-axis MEMS stage that is characterized by having large area platform. For large area efficiency, the actuator part consisting of mainly comb electrodes and springs is placed right below the platform. In this article, the structures and operational principle of the MEMS stages are described, followed by design procedure, structural and modal analysis using FEM(Finite Element Method). The area efficiency of the MEMS stage was designed to be about 55%, that is very large compared with conventional ones having a few percentage.

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

1. 서론

차세대 정보 저장기기로써 개발되어 온 PSD⁽¹⁾용 MEMS 스테이지는 크게 전자력형과 정전형으로 구분되며, 전자력형은 IBM⁽²⁾, KETI⁽³⁾에서, 정전형은 HP⁽⁴⁾, CMU⁽⁵⁾, 서울대⁽⁶⁾ 등에서 연구가 수행되고 있다. 정전형의 경우, 전자력형에 비해 비교적 제작이 용이하고, 구동용 전극을 플랫폼 변위 감지용 센서로 사용할 수 있는 장점이 있으나, 구동력과 면적 효율(area efficiency)이 작은 문제점이 있다. 구동력은 구동전압의 증가로 어느 정도 보완이 가능하나, 면적효율의 경우, 기존에 제작된 MEMS 스테이지, 즉 플랫폼부와 이를 구동하는 액추에이터부가 동일 평면상에 위치하는 구조로는 그 면적효율의 증가를 기대하기 어렵다.

본 연구에서는 이러한 구조적 설계의 한계로 인한 문제점을 극복하기 위하여, 플랫폼부 아래에 액추에이터부를 두는 새로운 구조의 두 가지 형태의 대면적 플랫폼을 갖는 MEMS 스테이지를 고안하였으며, 이중 보다 설계 및 성능에서 장점을 갖는 스

테이지를 선정하여 설계하였다.

2. 스테이지의 구조 및 구동원리

2.1 스테이지의 구조

Fig. 1 과 2 는 본 연구에서 고안해 낸 대면적 플랫폼을 갖는 2 가지 새로운 형태의 2 축 정전형 MEMS 스테이지의 구조도이다. Fig. 1 의 스테이지 #1 의 플랫폼은 플랫폼 중앙부에 위치한 연결부(connection part)를 통하여 이 연결부와 동일 평면상에 사방에 배치되어 있는 콤 전극 및 빔 스프링에 연결되어 있다. 이 구조는 플랫폼이 중앙의 연결부를 통해 스테이지 전체를 커버하는 구조이므로 면적효율이 매우 높은 장점을 갖는다. 하지만, 2 축 운동간 기계적 간섭으로 인한 커플링이 발생하며, 콤 전극과 플랫폼에 의한 정전흡인력에 의해 z 축 처짐이 크게 발생하는 단점을 갖는다. Fig. 2 의 스테이지 #2 는 구동력을 발생시키는 콤 전극이 플랫폼 하부에 직접 부착된 형태로, 콤 전극으로부터의 구

동력을 연결부를 통하지 않고 플랫폼에 직접 전달하는 방식이다. 이로 인해 플랫폼(y) 외곽에 플랫폼(y)를 전부 감싸는 형태의 또 다른 플랫폼(x)를 두어 이 부분이 나머지 한 축(x)의 구동을 담당한다. 따라서, 스테이지#2는 #1에 비해 면적효율이 조금 떨어지기는 하나 x, y 축간의 구동이 서로 독립적으로 이루어져 기계적인 커플링을 완전히 배제시킬 수 있어 제어제가 매우 간단해질 뿐만 아니라, 플랫폼의 z축 처짐도 #1에 비해 훨씬 작게 발생한다. 또한, 액추에이터부와 플랫폼의 연결이 연결부를 통하지 않고 직접 연결되므로, 그로 인한 구동력 손실이 작다. 따라서 본 연구에서는 스테이지 #1에 비해 여러 장점을 갖는 #2를 설계 대상으로 선정하여 설계를 수행하였다. Fig. 3은 스테이지의 플랫폼 하부에 배치되는 액추에이터부의 구조도이다.

스테이지 #2는 크게 데이터가 기록되는 내/외부 플랫폼, 이들 하부에 직접 연결되는 콤 전극 고정

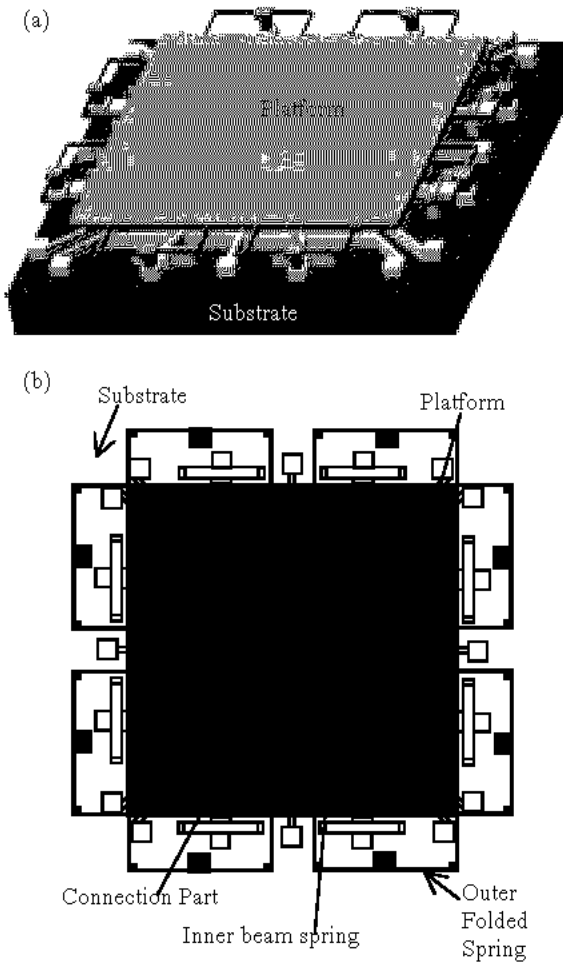


Fig 1. The structure of MEMS stage #1: (a) Overall view, (b) Top view

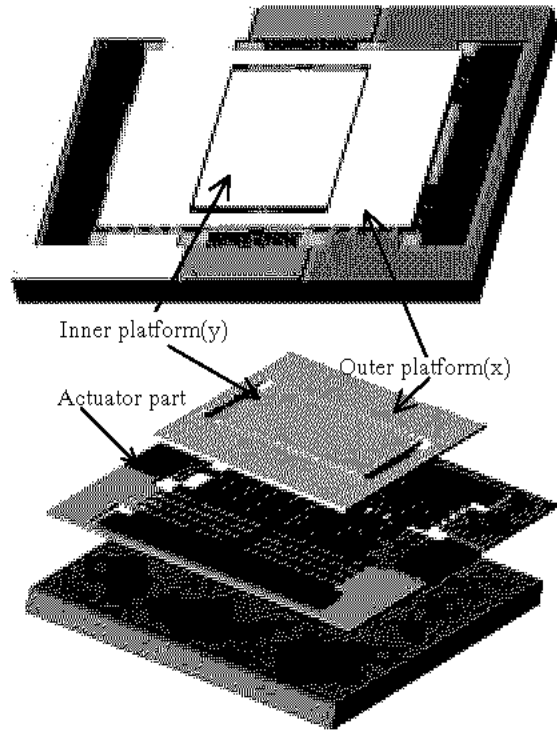


Fig. 2 The structure of MEMS stage #2

부와 구동력을 발생시키기 위한 콤 전극, 그리고 이들 전체를 지지하는 스프링부, 구동전압을 공급하기 위한 패드부로 구성된다. 액추에이터와 플랫폼의 부착을 위해, 이동자 전극의 일부 부착부는 고정자 전극보다 $10\mu\text{m}$ 높은 단차를 갖는다. 플랫폼의 면적효율을 좀 더 크게 하기 위하여 스프링은 다중 접힘 구조로 설계되어 배치공간을 최소화하였으며, 내/외부 접힘 스프링(inner/outer folded spring)은 Deep RIE(Reactive Ion Etching)공정에서 발생하는 풋팅(footing)현상에 의한 강성약화를 방지하기 위하여 각각 두 개씩 한 조로 하여 설계하였다. 내부 접힘 스프링은 내부 플랫폼의 y 축 구동에, 외부 접힘 스프링은 내/외부 플랫폼 전체의 x 축 구동에 관계되며, 지지 스프링(supporting spring)은 전체 구조물의 z축 처짐을 보상한다.

2.2 스테이지의 구동원리 및 구동력

Fig. 4는 스테이지의 구동원리를 나타낸다. 플랫폼을 $+x$ 방향으로 이동시키려면, E_{x+} 에 전압을 인가하여 $+x$ 방향의 구동력을 발생시키고, $-x$ 축으로 이동시키려면, 전극 E_{x-} 에 전압을 인가한다. 이와 마찬가지로, 플랫폼을 $+y(-y)$ 방향으로 이동시키려면

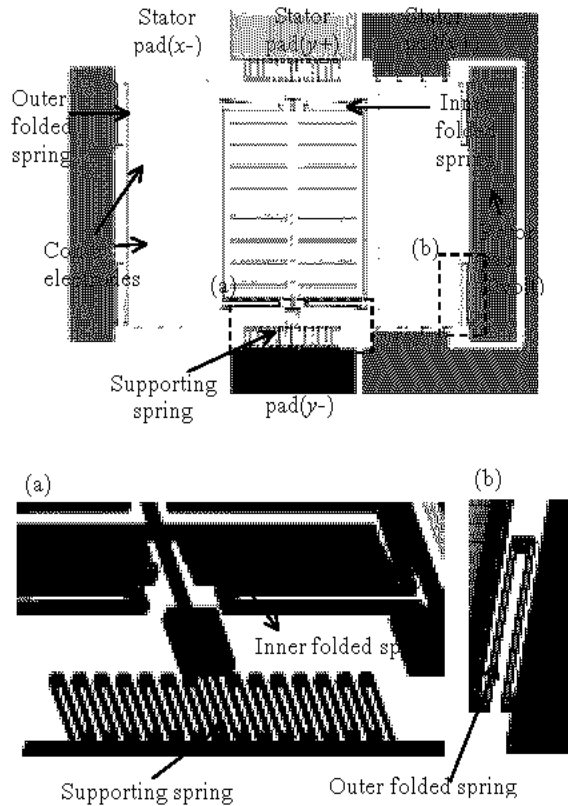


Fig. 3 The structure of the actuator part.

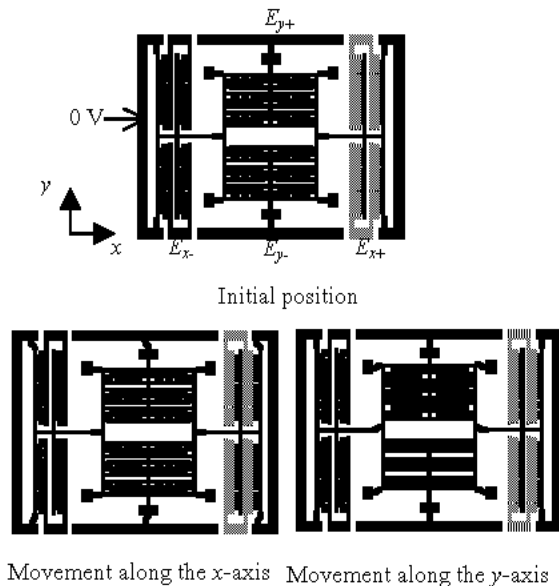


Fig. 4 The driving principle

E_{y+} , E_{y-} 에 전압을 인가하면 된다. 실제 스테이지의 구동에 있어서는 구동전압과 구동력간의 선형적인 관계를 유지하기 위해 차동 구동방식(differential

driving method)이 많이 사용된다. 이 구동방식에 있어서 플랫폼의 하부에 연결된 이동자 전극에는 0V를, 플랫폼 좌우 고정자 전극에는 바이어스 전압을 인가하고, 여기에 구동전압을 반대방향으로 차분적으로 더하여 구동력을 발생시킨다. 차동 구동방식에 있어서 x 축 구동의 예를 들어 플랫폼의 좌, 우 측 전극들에 의한 전기장 에너지 U_{x+} , U_{x-} 는

$$U_{x+} = \frac{1}{2} \epsilon \frac{2Nh(x+x_0)}{g} (V+v)^2 \quad (1)$$

$$U_{x-} = \frac{1}{2} \epsilon \frac{2Nh(x+x_0)}{g} (V-v)^2 \quad (2)$$

와 같다. 여기서, ϵ , V , v , x , x_0 는 각각 유전율, 구동전압, 바이어스 전압, 구동변위, 콤 전극이 초기에서로 겹쳐져 있는 길이이고, h , N , g 는 각각 콤 전극의 깊이, 콤 전극의 개수, 콤 전극간의 간격이다. 식(1), (2)의 전기장 에너지로부터 구동력 F_{x+} , F_{x-} , 그리고 이로부터 총구동력을 F_x 를 구하면 다음과 같다.

$$F_{x+} = \frac{\partial U_{x+}}{\partial x} = \frac{\epsilon Nh}{g} (V+v)^2 \quad (3)$$

$$F_{x-} = \frac{\partial U_{x-}}{\partial x} = \frac{\epsilon Nh}{g} (V-v)^2 \quad (4)$$

$$F_x = F_{x+} + F_{x-} = 4 \frac{\epsilon Nh}{g} Vv \quad (5)$$

상기 식으로부터 구동력은 콤의 종횡비, 콤 간극, 구동전압으로부터 구해진다. 스테이지의 구동력을 증가시키기 위해서는 콤의 종횡비를 크게 하는 것이 바람직하나, 실제 콤의 최대 종횡비는 공정 및 장비에 의해 결정된다. 전자력(electromagnetic force) 형에 비해 그 힘이 매우 미약한 정전형의 경우 콤의 종횡비만으로 목표하는 구동범위에 필요한 구동

Table 1 Specification and dimension of MEMS stage

Parameter	Spec. and Dimension
Moving axis	2-axis
Natural frequency	400Hz
Area efficiency	55%
Applied voltage	60 V (Driving and bias voltage)
Comb size($w \times t \times l$)	$5 \times 50 \times 180 \mu\text{m}^3$
Gap between combs	5 μm
Platform size	$5600 \times 4200 \mu\text{m}^2$
Total size	$7200 \times 5800 \mu\text{m}^2$
Inner folded spring	$6 \times 50 \times 900 \mu\text{m}^3$
Outer folded spring	$6 \times 50 \times 280 \mu\text{m}^3$
Supporting spring	$6 \times 50 \times 1000 \mu\text{m}^3$

력을 얻는다는 것은 실제 스테이지 설계에 있어서 많은 제약 조건을 따르게 하므로, 본 논문에서는 구동전압을 최대 60V, 바이어스 전압을 60V 하여 설계의 제약 조건을 배제시켰다.

Table 2 Definition of the design parameters

Design parameters	
p_x, p_y	Width and height of the platform
e_x, e_y	Width and height of electrode pad
o_x, o_y	Width and height of spring parts
v	Driving voltage applied to the stator
V	Bias voltage applied to the stator
ϵ	Dielectric constant in air
g	Gap between comb electrodes
N_{comb}	Number of comb electrodes
L	Length of the rib
t	Height of the rib
E	Young's modulus
z	Gap between adjacent ribs
b, h, l	Width, depth and length of spring
N	Number of springs
n	Folded number of spring
f_x, f_y	Natural frequencies
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$	Displacements
m	Mass

3. 스테이지의 설계

3.1 목적 함수

일반적으로 스테이지 설계에 있어 가장 대표적인 설계 변수는 액추에이터의 크기, 면적효율, 스텝 시스템의 스프링 상수, 구동범위, 구동력, 고유 진

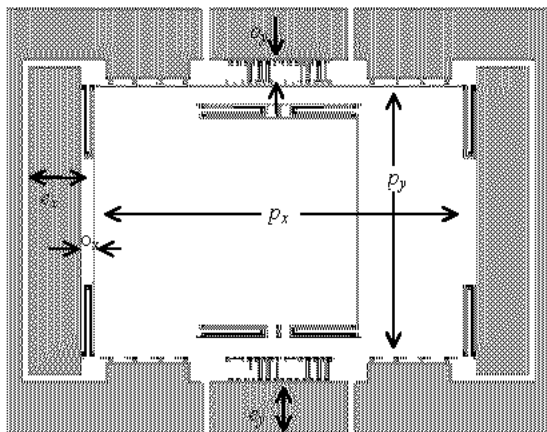


Fig. 5 Definition of symbols for object function

동수 등이 있다. 본 연구에서 설계한 MEMS 스테이지는 대면적 플랫폼을 갖기 위한 일련의 설계절차가 이루어져야 하므로, 면적효율을 가장 핵심적인 설계 변수로 선택하여 그 설계과정을 진행하였다. Table 1 은 스테이지 설계의 성능사양 및 각 구성요소의 최종 설계 치수이며, Table 2 는 설계변수들의 정의를 나타내고 있다.

Fig. 5 는 플랫폼부와 구동전압 공급을 위한 패드부, 그리고 스프링의 배치공간을 나타낸다. Fig. 5 의 패드 부는 wiring bonding 공정을 위한 최소 면적으로 설정된다. 면적효율과 전극부의 면적은 이미 정해진 설계 변수이므로, 스테이지의 면적을 초기변수로 한다면, 스프링의 배치 가능한 면적이 정해진다. 면적효율을 목적함수로 나타내면

$$\eta(\%) = \frac{p_x \times p_y}{(p_x + 2o_x + 2e_x)(p_y + 2o_y + 2e_y)} \quad (6)$$

와 같다. 여기서 정해진 플랫폼의 면적은 최대 배치 가능한 콤의 개수와 비례한다. 즉, 콤 전극이 내/외부 플랫폼의 하부에 배치되므로, 콤의 깊이와 폭, 콤 간극, 콤이 고정되는 지지단의 폭, 그리고 이전식 (6)에서 구한 플랫폼의 면적에 의한 관계로부터 콤의 개수가 결정된다. 이렇게 구해진 전체 콤의 개수는 스테이지 구동력 계산에 이용되며, 이 구동력을 최초 설계한 구동범위로 나누어 스프링 상수를 정한다. 위와 같이 계산된 스프링 상수와 식 (6)에서 구해진 스프링 배치 면적에 따라 각각의 스프링은 적절한 형상과 스프링 상수 값을 갖게 된다. 위의 일련의 절차에서 알 수 있듯이, 스테이지 설계는 최초 가장 핵심적인 설계 변수와 이와 관련된 변수들로서 목적함수를 구성하고, 목표한 설계 변수들에 부합되는 구속조건에 따라 그 설계과정이 이루어진다.

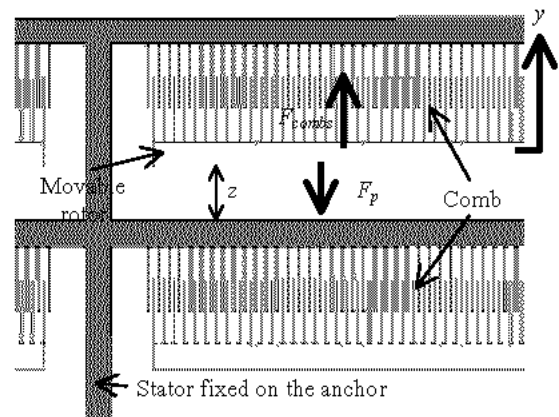


Fig. 6 Electrostatic forces produced by combs: F_{comb} is produced by comb electrodes, F_p is produced between the ribs-for-stator and rotor

3.2 구속조건

본 연구에서 설계된 스테이지는 x, y 축의 구동이 서로 독립적으로 이루어지므로, 먼저 전체 플랫폼을 외부 플랫폼과 내부 플랫폼으로 나눈 뒤, 내/외부 플랫폼의 순서로 최적 설계한다. 여기서 나누어진 내부 플랫폼의 면적에 따라 배치 가능한 콤의 개수는 정해지며 그에 따른 구동력은

$$F_y = 4 \frac{\varepsilon N_{comb}}{g} V_V \quad (7)$$

$$F_{dirve_y} = 4 \frac{\varepsilon N_{comb}}{g} V_V - \frac{\varepsilon L t}{2z^2} V^2 \quad (8)$$

와 같다. 콤 전극부의 구성은 플랫폼에 연결되는 이동자(rotor) 전극과 고정단(anchor)에 고정되는 고정자(stator) 전극으로 이루어지며, 이 때, Fig. 6에서 보는 바와 같이 이동자 전극이 이동되는 방향과 반대방향에 위치한 고정자 전극간에도 정전기력이 발생함을 알 수 있다. 이 정전기력은 구동방향과 반대되는 힘으로써, 가능한 한 구동력에 영향을 미치지 않도록 설계되어야 한다.

콤 전극 설계 후, 내부 플랫폼의 z 축 처짐을 최소화 하고, 구동 방향에 유연한 내부 접힘 스프링을 설계한다. 내부 접힘 스프링의 y 축 및 z 축 스프링 상수는

$$\Delta z_{inner} = \frac{m_{inner}}{k_{inner_z}} \quad (9)$$

$$k_{inner_y} = \frac{Ehb^3}{l_{inner}^3} \times \frac{N_{outer}}{n_{inner}} \quad (10)$$

$$k_{inner_y} = \frac{F_y}{\Delta y}, \Delta y \geq 50\mu m \quad (11)$$

와 같다. 만약 식 (9), (10), (11)을 만족시킬 수 있는 적절한 내부 접힘 스프링의 상수를 구할 수 없

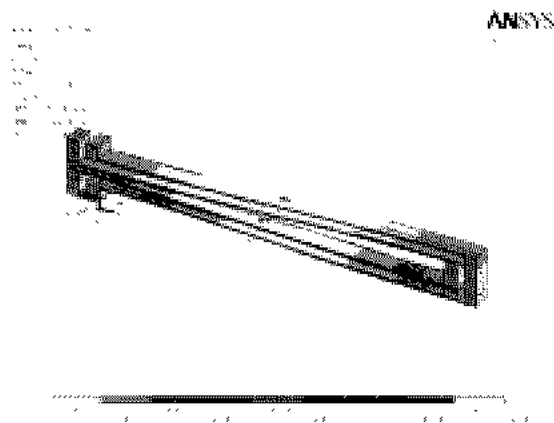


Fig. 7 The inner spring displaced by $50\mu m$ along the y -axis

다면, 내부 플랫폼의 면적을 달리 하여, 배치 가능한 콤의 개수를 조절해야 한다.

테이터의 빠른 기록/재생을 위해서는 스테이지의 구동 축에 대한 고유 진동수를 높여야 하며, 이를 위해서는 질량부는 작게 강성부는 크게 설계해야 한다. 하지만, 스프링 강성은 이미 이전 설계에서 대부분 정해지므로, 고유진동수 증대를 위한 설계의 폭은 그다지 자유롭지 못하다. 하지만, 구동전압을 높게 설정하여 구동력을 크게 한다면, 스프링 강성의 증대가 가능하며, 따라서 고유진동수를 어느 정도 크게 설정할 수 있다. 구동축에 대한 고유진동수는

$$f_y = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{inner_y}}{m_{ibber}}} \geq 400 \text{ Hz} \quad (12)$$

와 같다. 전술한 절차를 반복하며 내부 플랫폼부의 설계를 최적화시킨 뒤, 외부 플랫폼의 설계를 하게 된다. 외부 플랫폼 또한 내부 플랫폼 설계와 유사한 설계 절차를 갖게 되며, 만약 외부 플랫폼의 설계 중, 후술하는 구속 조건을 만족시킬 수 없다면, 식 (6)을 이용하여 전체 플랫폼의 면적을 재설정해야 한다. 식 (13), (14), (15), (16), (17), (18), (19)는 외부 플랫폼 설계에 필요한 구속조건을 나타낸다.

$$k_{total_x} = \frac{F_x}{\Delta x}, \Delta x \geq 50\mu m \quad (13)$$

$$k_{total_x} = k_{outer_x} + k_{supporting_x} \quad (14)$$

$$k_{outer_x} = \frac{Ehb^3}{l_{outer}^3} \times \frac{N_{outer}}{n_{outer}} \quad (15)$$

$$k_{supporting_x} = \frac{Ehb^3}{l_{supporting}^3} \times \frac{N_{outer}}{n_{outer}} \quad (16)$$

$$\Delta z_{outer} = \frac{m_{outer}}{k_{outer_z}} \quad (17)$$

$$\Delta z_{total} = \Delta z_{inner} + \Delta z_{outer} \leq 100nm \quad (18)$$

$$f_x \cong f_y \quad (19)$$

4. 스테이지의 구조해석 및 모드해석

본 논문에서 설계한 스테이지의 해석을 위하여 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 사용하였다. Fig. 7 은 구동력과 스프링 변위에 대한 시뮬레이션 결과이다. 내부 접힘 스프링이 이중 접힘 구조로 설계되었으므로, 구동 변위 내에서 기계적인 간섭을 일으킬 수 있다. 따라서, 이러한 점을 고려하여 두 스프링간의 적정 읍셋 거리를 설정하기 위하여 시뮬레이션하였다.

Fig. 8 은 스테이지의 z 축 처짐을 시뮬레이션 한 결과이며, $230nm$ 처짐이 발생하였다. 스테이지의 z

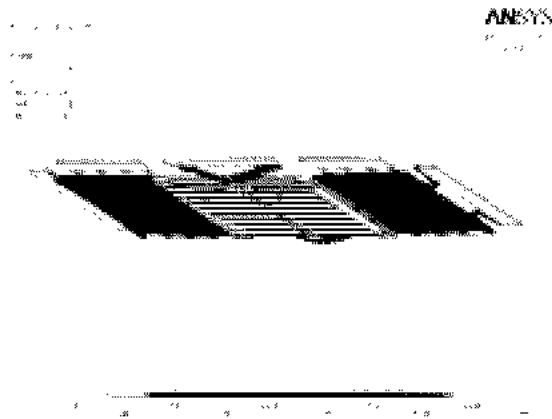


Fig. 8 Downward sagging by gravity

축 처짐은 스테이지 내부 플랫폼의 처짐과 내부 플랫폼을 포함한 외부 플랫폼 처짐의 합으로 계산된다. 실제 설계한 목표보다 z 축 처짐이 큰 것은 한 쌍을 이루는 고정자와 이동자 전극간에 움푹거리가 비교적 크게 설계됨에 따라, 배치 가능한 콤의 개수가 감소되었으며, 따라서 그로 인한 구동력이 작게 산출되어 스프링이 비교적 유연하게 설계된 결과이다. 이동자가 z 축으로 처짐에 따라 이동자와 고정자간에 어긋난 량은 정전기력에 의해 어느 정도 보상될 수 있으며 그에 따라 플랫폼부의 처짐은 충분히 보상 가능하다.

Fig. 10 은 스테이지의 모드해석을 수행한 결과이다. 1 차 및 2 차는 각각 x, y 축 병진운동, 3 차는 z 축 병진운동, 4 차는 x 축 회전운동에 대한 고유 진동수이다. 2 축 스테이지 구동에 있어서 구동에 관계된 1 차 및 2 차 고유진동수는 가능한 한 동일한 것이 바람직하고 구동에 관계없는 진동수는 1 차, 2 차보다 가능한 한 높게 나타나야 한다. 본 논문에서 설계한 스테이지는 x 축(1 차)과 y 축(2 차)의 구조가 서로 상이하여 서로 다른 동특성을 가지기 쉬우나

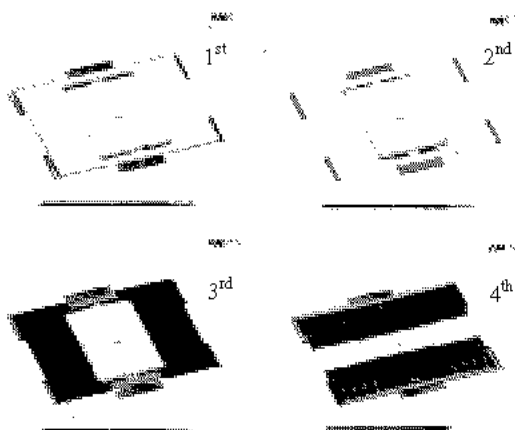


Fig. 9 Modal analysis (1st:458.Hz, 2nd:479Hz, 3rd:1133Hz, 4th:1745Hz)

그림에서 알 수 있듯이 모드 해석결과 1, 2 차 고유진동수는 유사하게 나타났다. z 축 및 회전 고유진동수는 1, 2 차에 비해 약 2~3 배 가량 크게 나타났다.

5. 결론

본 논문에서는 대면적 플랫폼을 갖는 정전형 2 축 MEMS 스테이지를 고안, 설계하였다. 본 스테이지는 구동전압 60V, 바이어스 전압 60V 에서 50 μ m 의 구동범위를 갖으며, 55%의 면적효율을 갖도록 설계하였다. 유한요소 해석을 통한 시뮬레이션 결과, z 축 처짐은 230nm, 구동축 x, y 축에 대한 고유진동수는 각각 458, 479 Hz이었다. 본 연구에서 고안해낸 MEMS 스테이지는 대면적 플랫폼을 갖기 위한 기본 구조로서 여러가지 형태로 응용개발되어 다양한 산업분야에 활용될 수 있다.

후 기

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

참고문헌

1. Vettiger, P., et al., "The "Millipede"-Nanotechnology Entering Data Storage," IEEE Trans. on Nanotechnology, Vol. 1, No. 1, pp. 39-55, March 2002.
2. Rothuizen, H., et al., "Compact Copper/epoxy-Based Electromagnetic Scanner for Scanning Probe Applications," Proc. 15th IEEE Int. Conf. MEMS, Las Vegas, pp. 582 - 585, Jan. 20-24, 2002.
3. Cho, J.-W., et al., "Development of a low voltage type electromagnetic actuator for probe-based data storage", Proc. 6th Korean MEMS Conf., KAL Hotel, Korea, pp. 411-416, April 8-10, 2004.
4. United States Patent US6411589B1, Hewlett-Packard Co., Jun. 25, 2002.
5. Alfaro, J. F., and Fedder, G. K., "Actuation for Probe-Based Mass Data Storage," from CMU website, 2003.
6. Kim, C.-H., et al., "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, Aug. 2003.