

플렉서 구조의 병렬형 선형 안내기구를 이용한 2 축 초정밀 스테이지

최기봉[#]

A Two-Axis Ultra-precision Stage Using Flexure-type Parallel Linear Guide Mechanism

Kee-Bong Choi[#]

ABSTRACT

In this study, a two-axis ultra-precision stage driven by piezoelectric elements is presented. The stage has a flexure-type parallel linear guide mechanism consisting of quad-symmetric simple parallel linear springs and quad-symmetric double compound linear springs. While the simple parallel linear springs guide the linear motion of a moving plate in the stage, the double compound linear springs follow the motion of the simple parallel linear spring as well as compensate the parasitic motions caused by the simple parallel linear springs. The linear springs are designed by rectangular beam type flexures that are deformed by bending deflection rather than axial extension, because the axial extension is smaller than the bending deflection at the same force. The designed guide mechanism is analyzed by finite element method(FEM). Then two-axis parallel linear stage is implemented by the linear guide mechanism combined with piezoelectric elements and capacitance type displacement sensors. It is shown that the manufactured ultra-precision stage achieves 3 nm of resolution in x- and y-axis within 30 μm of operating range.

Key Words : Linear guide mechanism(선형 안내기구), Nano positioning (나노 위치결정), Simple parallel linear spring(단순병렬선형스프링), Double compound linear spring(이중복합선형스프링), Flexure(플렉서)

1. 서론

수 나노미터의 분해능과 수십 마이크로미터의 구동영역을 갖는 나노구동용 스테이지는 조미동 위치결정기구, 초정밀 공작기계 및 AFM의 스캐닝 장비에서 중요한 역할을 하고 있다. 나노구동용 스테이지는 주로 피에조 소자에 의한 구동을 플렉서(Flexure)에 의해 안내하는 구조로 되어있다. 따라

서 나노구동용 스테이지에서는 플렉서에 의한 안내기구의 구조가 안내하는 운동의 정밀도를 결정하기 때문에 안내기구의 구조와 설계에 많은 관심이 집중되고 있다.

기존의 2 축 나노 구동용 안내기구는 직렬형 안내기구, 병렬형 안내기구 및 혼합형 안내기구로 구분할 수 있다. 직렬형 안내기구는 1 축의 안내기구의 이동부에 또 다른 1 축의 안내기구가 부착된

접수일: 2004년 8월 4일; 게재승인일: 2005년 11월 10일

[#] 한국기계연구원 지능기계연구센터

E-mail kbchoi@kimm.re.kr Tel. (042) 868-7132

구조로서 각 축의 동특성이 다르고, 기저축에서 발생한 위치오차가 최종축에 적층되는 단점이 있다. 직렬형 안내기구는 단순병렬선형스프링¹ 및 이중복합선형스프링²을 이용한 것이 발표되고 있다.

병렬형 안내기구는 L 자형 플렉서를 이동부의 네 꼭지점에 부착한 구조와 복합형 플렉서가 이동부의 네 면에 부착된 형태로 구분된다. L 자형 플렉서로 구성된 병렬형 안내기구는 병진과 회전의 평면 3 자유도를 가지고 있다.³ 따라서 L 자형 플렉서로 구성된 병렬형 안내기구를 병진안내기구로만 사용하기 위해서는 회전축을 구속할 필요가 있다. PI 사의 2 축 선형 스테이지는 이동부의 네 면에 피에조 소자를 설치하고 서로 마주보는 면의 피에조 소자를 한 쌍으로 한 축을 구동하여 회전축을 구속하고 있다.⁴ MEMS 구조물에서 사용하고 있는 병렬형 2 축 안내기구^{5,6,7}는 2 축 선형운동을 목적으로 플렉서형 안내기구가 설계되었다. 비록 병진운동시 기생운동으로 인한 회전이 발생하지만, 회전운동 모드의 주파수가 선형운동 모드의 주파수보다 2 배 이상 크고, 회전모드에 의해 발생하는 변위는 매우 작아 회전운동을 무시할 수 있다. 그러나 기존의 플렉서형 병렬 2 축 안내기구의 일부분에서, 굽힘보다는 인장에 의해 변형되도록 플렉서 메커니즘을 설계했다. 인장변형은 굽힘변형에 비해 변형량이 작아 운동의 변위량이 제한되는 단점이 있기 때문에, 가능한한 플렉서는 인장보다는 굽힘에 의해 변형되도록 구조를 설계해야 한다.

병렬형과 직렬형이 혼합된 형태의 2 축 선형 스테이지⁸는 병렬형과 비슷한 구조의 안내기구를 가지고 있으나, 한 축 구동에 의한 운동으로 인하여 타 축의 구동기가 이동부와 함께 운동을 하는 직렬형의 특징을 지니고 있다. 이것은 직렬형과 병렬형의 단점을 동시에 가지고 있다.

본 연구에서는 플렉서에 인장보다는 굽힘변형이 발생하도록 하는 새로운 구조의 병렬형 2 축 선형 안내기구를 제안하고, 이것을 이용하여 2 축 초정밀 선형 스테이지에 적용한다. 제안하고자 하는 병렬형 2 축 안내기구는 기존의 병렬형 스테이지에서 보였던 잉여구동을 제거한 형태의 2 축 구동용 안내기구로서, 이동평판의 네 면에 각각 2 개의 플렉서에 의한 단순병렬선형스프링(Parallel linear spring)과 각 단순병렬선형스프링에 이중복합선형스프링(Double compound linear spring)을 연결하여 2 축 병렬형 선형운동을 구현한다. 본 논문에서

제시한 안내기구는 웨이퍼 칩을 탑재한 고속 AFM 용 스테이지에 응용을 위한 것이다.

2. 병렬형 2 축 선형 안내기구

Fig. 1 은 본 연구에서 제시하는 2 축 병렬형 선형 안내기구이다. 이 기구는 이동평판, 4 개의 단순병렬선형스프링 및 4 개의 이중복합선형스프링으로 구성된다. 여기서 각각의 단순병렬선형스프링은 서로 평행하게 이동평판과 이중복합선형스프링에 연결된 한 쌍의 플렉서로 구성된다. 한 쌍의 단순병렬선형스프링은 한 축 방향의 운동을 안내하며 또한 타 축 방향에 힘을 이중복합선형스프링에 전달하는 역할을 한다. 이중복합선형스프링은 내측평판, 2 개의 외측평판 및 4 쌍의 플렉서로 구성된다. 2 쌍의 플렉서는 내측평판을 외측평판에 연결하고, 나머지 2 쌍은 외측평판과 고정프레임을 연결한다. 여기에 사용된 플렉서는 좁은 폭과 긴 길이를 갖는 사각보 형태이다.

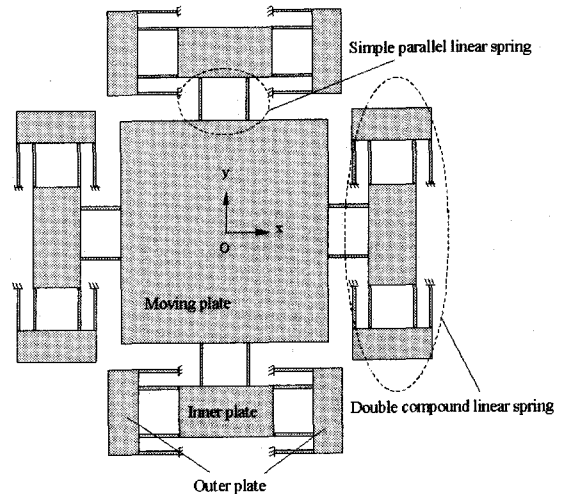


Fig. 1 Schematic diagram of 2-axis parallel linear guide mechanism

Fig. 2 와 같이 이동평판에 1 쌍의 플렉서가 평행하게 연결된 단순병렬선형스프링을 고려하자. 이동평판에 힘 F_x 가 작용할 때 플렉서는 x 방향으로 Δx 의 처짐 변위가 발생하며 y 방향으로 Δe_y 의 기생오차가 발행한다. 여기서 기생오차와 처짐 변위와의 관계는 다음과 같다.⁹

$$\Delta e_y = \frac{3\Delta x^2}{5l} \quad (1)$$

여기서 기생오차는 본질적으로 발생하는 것이기 때문에 제거할 수 없으나 플렉서의 길이를 길게 하거나 이동변위를 짧게 함에 의해 줄일 수 있다.

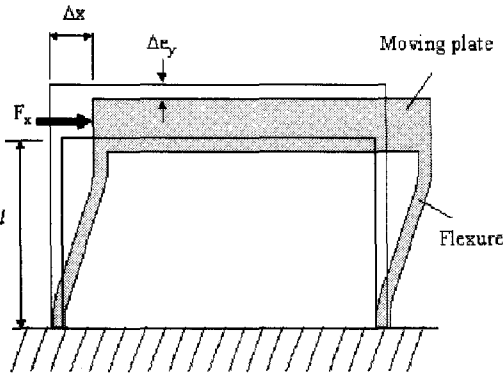
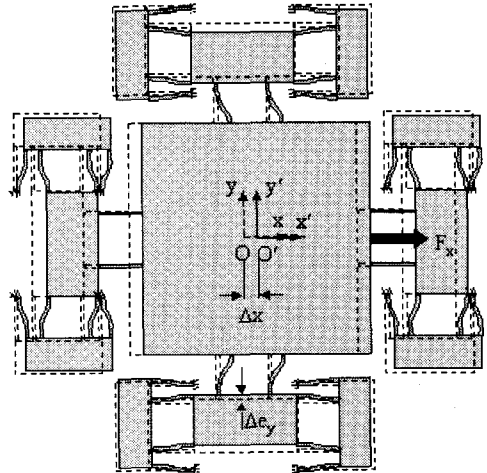


Fig. 2 Simple parallel linear spring

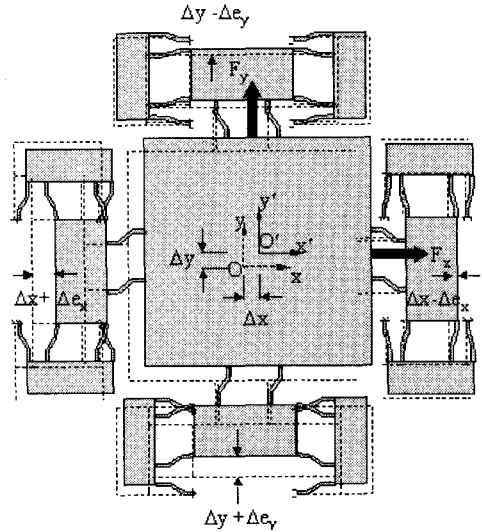
2 축 병렬형 선형 안내기구의 이동평판에 힘이 작용할 때 안내기구의 동작상태를 Fig. 3 과 같다. 이동평판에 힘 F_x 가 작용할 때 이동평판은 Fig. 3 (a)와 같이 병진변위 Δx 가 발생한다. 이 때 한 쌍의 x 방향 단순병렬선형스프링은 한 쌍의 x 방향 이중복합선형스프링에 힘을 전달하며, 이 전달된 힘에 의해 이중복합선형스프링의 내측평판은 병진 변위 Δx 만큼 단순병렬선형스프링의 운동을 따라 병진이동한다. 또한 외측평판은 $\Delta x/2$ 만큼 병진이동한다. 한편 한 쌍의 y 방향 단순병렬선형스프링은 이동평판의 x 방향 운동을 안내한다. 이것은 단순 병렬선형스프링에 병진변위 Δx 및 기생오차 Δe_y 를 야기한다. 이 때 발생한 기생오차는 이중복합선형스프링의 운동에 의해 보상되기 때문에 이동평판에는 영향을 끼치지 않는다.

이동평판이 Fig. 3 (b)와 같이 두 힘 F_x 및 F_y 에 의해 작용된다고 가정하자. 이 때 한 쌍의 x 방향 단순병렬선형스프링은 한 쌍의 x 방향 이중복합선형스프링에 힘 F_x 를 전달하며 동시에 y 방향 운동을 안내한다. 또한 한 쌍의 y 방향 단순병렬선형스프링은 한 쌍의 y 방향 이중복합선형스프링에 힘 F_y 를 전달하며 동시에 x 방향 운동을 안내한다. 이동평판이 이 힘에 의해 변위 Δx 및 Δy 만큼 병진 이동한다면 한 쌍의 x 방향 단순병렬선형스프링은 y 방향으로 변위 Δy 가 발생하며 x 방향으로는 기

생오차 Δe_x 가 발생한다. 또한 한 쌍의 y 방향 단순병렬선형스프링은 x 방향으로 변위 Δx 가 발생하며 y 방향으로는 기생오차 Δe_y 가 발생한다.



(a) One-axis motion of moving plate



(b) Two-axis motion of moving plate

Fig. 3 Operation of parallel linear guide mechanism

단순병렬선형스프링의 변위는 이중복합선형스프링의 내측 및 외측 평판의 변위를 야기한다. 여기서 내측평판의 변위는 x 방향 이중복합선형스프링에서 $\Delta x \pm \Delta e_x$ 이며, y 방향 이중복합선형스프링에서는 $\Delta y \pm \Delta e_y$ 이다. 각 외측평판은 각 내측평판 변위의 반만큼 병진이동한다.

3. 초정밀 위치결정용 2 축 병렬형 선형 스테이지

3.1.2 축 병렬형 선형 안내기구의 설계

이동평판, 이중복합선형스프링의 내측평판 및 외측평판은 회전을 하지 않으며, 플렉서의 길이방향 변위는 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하자. 또한 x 방향의 운동은 y 방향의 운동과는 독립적이라고 가정하자. q 가 x 및 y 를 나타낸다면 선형 스테이지의 운동방정식은 다음과 같다.

$$(m_1 + 2m_{21} + m_{22})\ddot{q} + 4(k_1 + k_2)q = F_q \quad (2)$$

여기서 m_1 은 이동평판의 질량, m_{21} 및 m_{22} 는 복합선형스프링의 내측평판의 질량 및 외측평판의 질량이고, k_1 은 단순병렬선형스프링의 플렉서 강성, k_2 는 복합선형스프링의 플렉서 강성, 그리고 F_q 는 안내기구의 q 축에 가해지는 구동력을 나타낸다.

각 플렉서의 한쪽 단을 고정시키고 다른 한쪽 단에 플렉서의 횡방향 힘과 모멘트를 가해 회전변위가 생기지 않는 처짐을 발생시키면, 플렉서의 강성은 다음 식으로 표현된다.

$$k_i = \frac{12EI_i}{l_i^3} \quad (3)$$

여기서 $i=1, 2$ 이며, E 는 강성계수, I_i 및 I_{3i} 는 아래첨자 i 에 해당하는 플렉서의 면적관성모멘트, 그리고 l_i 는 아래첨자 i 에 해당하는 플렉서의 길이를 의미한다.

안내기구의 고유진동수 f 는 식 (2)와 (3)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3E}{m_1 + 2m_{21} + m_{22}} \left(\frac{I_1}{l_1^3} + \frac{I_2}{l_2^3} \right)} \quad (4)$$

최대응력은 이동평판이 최대변위로 이동했을 때 플렉서 양단의 상하면에서 발생한다. 이 때 발생하는 최대응력 σ_{max} 은 다음과 같다.

$$\sigma_{max} = \text{Max}(\sigma_{1,max}, \sigma_{2,max}) \quad (5)$$

여기서 각 플렉서의 양단에서 발생하는 최대응력 $\sigma_{i,max}$ 은

$$\sigma_{i,max} = 3K_i E \frac{w_i}{l_i^2} \delta_{max} \quad (6)$$

이며, K_i 는 응력집중계수, w_i 는 아래첨자 i 에 해당하는 플렉서의 폭, σ_Y 는 항복응력, 그리고 δ_{max} 은 플렉서의 횡방향 최대변위이다.

안내기구의 고유진동수와 최대응력이 다음과 같은 조건을 만족하도록 설계하고자 한다.

$$f \geq 200 \text{ Hz} \quad (7)$$

$$\sigma_{max} \leq \frac{\sigma_Y}{S_f} \quad (8)$$

여기서 σ_Y 는 재료의 항복응력이고, S_f 는 안전계수이다.

병렬형 선형 안내기구의 설계를 위하여 우선 안내기구의 개략적인 형태와 크기를 결정한 후 플렉서의 치수를 구했다. 이때 모든 플렉서의 치수는 동일하다고 가정하여 문제를 간단화시켰다. 모든 플렉서의 치수가 동일하기 때문에 최대응력은 단순병렬선형스프링의 양단에서 발생한다. 계산에 필요한 계수 및 미리 결정된 설계상수는 Table 1 과 같다.

Table 1 Predefined constants and coefficients

Parameter	Description	Value
$L_1 \times L_2$	Size of stage	340 mm × 303 mm
E	Elastic modulus	72 GPa
m_1	Mass of moving plate	0.466 kg
m_{21}	Mass of inner plate	0.120 kg
m_{22}	Mass of outer plate	0.039 kg
I_1	Area moment of inertia of flexure for simple parallel linear spring	1.67 mm ⁴
I_2	Area moment of inertia of flexure for double compound linear spring	1.67 mm ⁴
K_i	Stress concentration factor	1.5
S_f	Safety factor	10

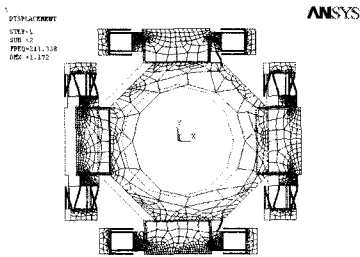
플렉서의 치수를 변화시켜가며 설계조건 (7)과 (8)을 만족하는 값을 구했다. 이 때 이동평판은 최대 80 μm 를 변위한다고 가정했다. Table 2 는 설계조건 (7) 및 (8)을 만족하는 값 중 병렬형 선형 안내기구에 이용하기 위해 선정된 값이다.

Table 2 Dimensions of flexures

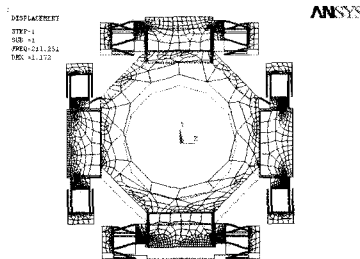
Parameter	Description	Value
l_1	Length of flexure for simple parallel linear spring	20 mm
w_1	Width of flexure for simple parallel linear spring	1 mm
l_2	Length of flexure for double compound linear spring	20 mm
w_2	Width of flexure for double compound linear spring	1 mm
t	Thickness of flexures	20 μ m

3.2 2 축 병렬형 선형 안내기구의 해석

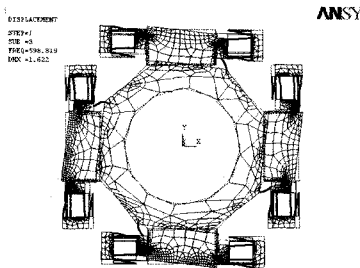
설계된 병렬형 선형 안내기구는 ANSYS 를 이용하여 모드해석 및 정해석이 수행되었다.



(a) Translation mode, x axis: 211 Hz



(b) Translation mode, y axis: 211 Hz



(c) Rotation mode: 599 Hz

Fig. 5 Modal analyses

Fig. 5 는 이 메커니즘의 모드해석 결과이다. Fig. 5 (a)와 (b)는 x 축과 y 축 방향의 병진모드이다. 두 축이 동일한 구조로 설계되었기 때문에 동일한 고유진동수를 가지며, 이 때의 주파수는 211 Hz 이다. Fig. 5 (c)는 이동평판 및 내외측평판이 함께 회전하는 모드로서, 이 때의 진동수는 599 Hz 이다. 그 이상의 고주파 모드는 플렉서의 진동모드이다.

운동방정식 (2)에서는 이동평판과 내측 및 외측 평판이 회전하지 않는다는 가정 하에 병진모드만 유도되었으나, FEM 해석 결과 회전모드가 발생함을 알 수 있다. 발생된 회전모드는 병진모드에 비해 2.8 배 이상 큰 모드로서 동작 주파수보다 크기 때문에 실제 선형 스테이지를 구동할 때에는 영향을 미치지 않는다. 해석된 병진모드의 고유진동수는 설계조건 (7)을 만족한다.

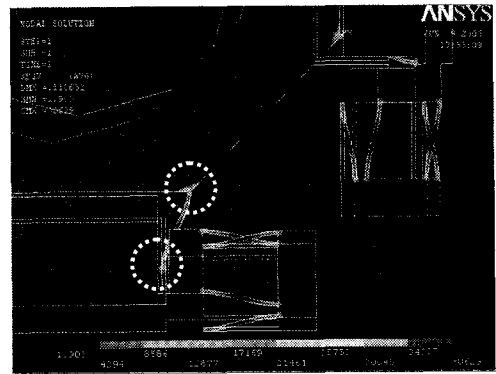


Fig. 6 Stress analysis

병렬형 선형 안내기구의 정해석 결과는 Fig. 6 과 같다. 이동평판의 x 와 y 축에 각각 100 N 의 힘을 인가할 때 각 축의 방향으로 80.7 μ m 가 변위했다. 이 때의 최대응력은 단순병렬선형스프링용 플렉서의 양단에서 발생했으며 38.6 MPa 이다. 이 값은 선형 안내기구 재료의 항복응력 ($\sigma_y=505$ Mpa) 보다 1/10 이하의 값으로 설계조건 (8)을 만족한다

3.3 2 축 병렬형 초정밀 선형 스테이지의 제작

위에서 제안한 병렬형 선형 안내기구를 초정밀 위치결정용 2 축 병렬형 선형 스테이지에 Fig. 7 (a) 와 같이 적용한다. 두 축의 구동은 적층형 피에조를 이용하여 이동평판의 측면에 힘을 인가한다.

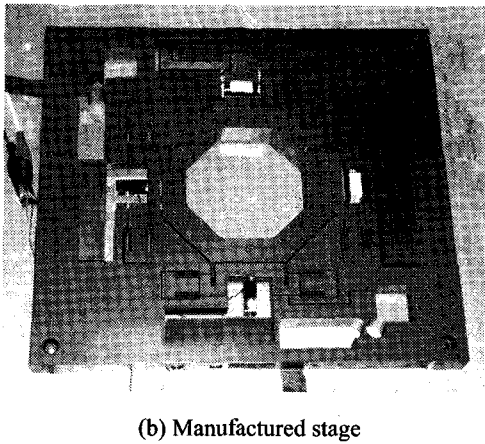
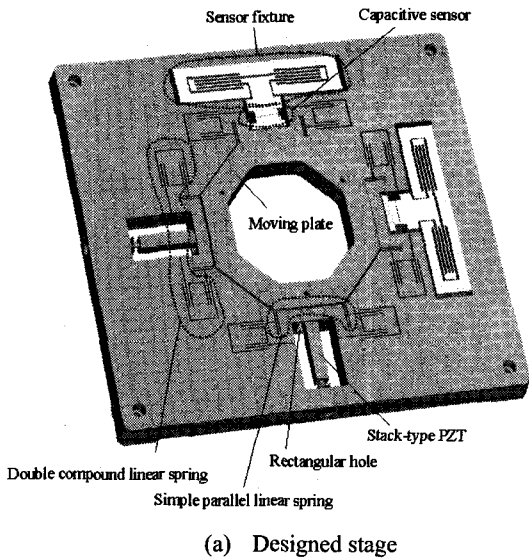


Fig. 7 Two-axis parallel linear stage for ultra-precision positioning

피에조를 이동평판의 측면에 접촉시키기 위해 이중복합선형스프링의 내측평면 측면에 사각형상의 구멍을 가공한 후 그 사이에 피에조를 통과시킨다. 이동평판의 운동은 용량형 초정밀 변위센서를 이용한다. 한 쌍의 용량형 초정밀 변위센서는 고정부와 프로브의 2 개 부품으로 이루어지는데, 고정부는 센서 고정용 치구에 부착시키고, 프로브는 이동평판에 고정시킨다. 이동평판에 프로브를 고정시키기 위해서, 피에조 고정방법과 동일한 방법으로 이중복합선형스프링의 내측평판 측면에 사각형상의

구멍을 가공한 후 그 사이에 프로브를 부착한 부재를 통과시켜 고정한다. 센서 고정용 치구는 센서 고정부와 프로브의 초기 위치를 조정하기 위한 것이다. 이것은 플렉서로 구성되어 있으며, 볼트를 회전시켜 센서 고정부를 조절함으로써 고정부와 프로브 사이의 초기 위치를 조절한다. Fig. 7 (b)는 제작된 초정밀 위치결정용 2 축 병렬형 선형 스테이지이다. 단순병렬선형스프링과 이중복합선형스프링은 와이어 EDM 으로 가공하였다. 스테이지를 구동하기 위한 피에조 소자는 10 mm × 10 mm × 36 mm 의 Piezomechanik 사의 적층형 피에조 소자이며, 센서는 PI 사의 50 μm 측정용 용량형 변위센서를 사용하였다.

4. 실험

피에조 소자와 센서를 장착하여 개발한 병렬형 선형 스테이지의 구동범위를 Fig. 8 과 같이 측정하였다.

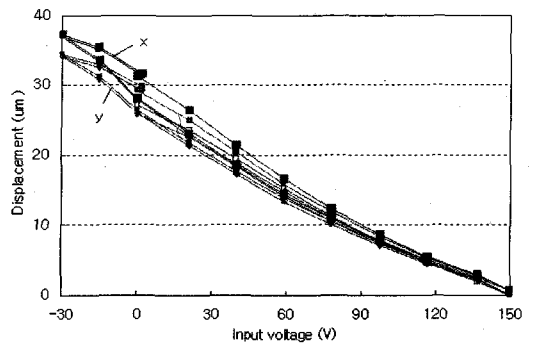


Fig. 8 Operational range

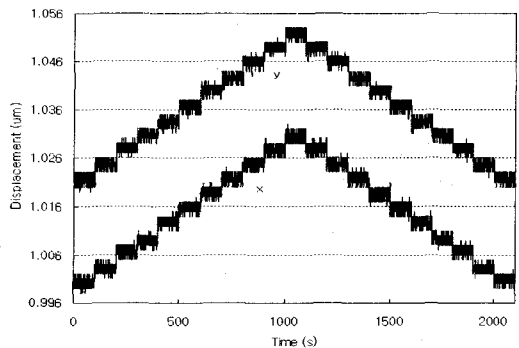


Fig. 9 Stepwise responses

개회로 상태에서 피에조 소자에 -30 V~150 V의 전압을 인가할 때 병렬형 선형 스테이지의 두 축에서 각각 30 μm 이상의 구동변위와 함께 히스테리시스가 발생하였다.

Fig. 9는 PID 제어에 의해 측정된 분해능 실험 결과이다. 실험결과 스테이지의 두 축에서 3 nm의 분해능이 달성되었다.

5. 결론

나노 분해능을 갖는 피에조 구동형 초정밀 2축 선형 스테이지를 위하여 새로운 구조의 2축 병렬형 선형 안내기구를 제안하고 이를 이용하여 2축 병렬형 선형 스테이지를 설계 및 제작하였다. 새로운 2축 병렬형 선형 안내기구는 기존의 L자형 플렉서에 의한 선형 안내기구와는 달리 순수 2축 구동을 위한 것으로, 4개의 단순병렬선형스프링과 4개의 이중복합선형스프링에 의해 선형운동을 안내한다. 제안된 병렬형 선형 안내기구는 피에조 소자에 의해 구동을 하며, 커패시터 센서에 의해 운동을 측정하는 2축 나노구동 스테이지에 적용되었다. 2축 나노구동 스테이지의 성능을 측정한 결과 약 30 μm 이상의 구동범위에서 3 nm의 분해능을 보였다. 제시한 2축 선형 스테이지는 웨이퍼 칩을 탑재한 고속 AFM용 스테이지에 응용될 예정이다.

참고문헌

1. Choi, K.-B., Ryu, S. H. and Han, C. S., "Design and Analysis of Nano-positioning Stage Driven by Piezoelectric Elements," ASPE 2003 Annual Meeting, pp.123 -126, 2003 .
2. Shim, J. Y., "A Precision XYZ-Stage for AFM Scanner: Design, Analysis and Control," M. S. thesis, KAIST, 1997.
3. Kang, J.-O., Seo, M.-H., Han, C.-S. and Hong, S.-W., "Development of 3-axis Fine Positioning Stage: Part 1. Analysis and Design," J. of KSPE, Vol. 21, No. 3, pp. 147-154, 2004.
4. MicroPositioning, NanoPositioning, NanoAutomation, PI Catalogue, 2001.
5. Schlosser, S. W., Griffin, J. L., Nagle, D. F. and Ganger, G. R., "Filling the Memory Access Gap: A Case for On-Chip Magnetic Storage," Carnegie

- Mellon University Technical Report, CMU-CS-99-174, 1999.
6. Alfaro, J. F. and Fedder, G. K., "Actuation for Probe-Based Mass Data Storage," Nanotech 2002 Vol. 1, Technical Proceedings of the 2002 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems, pp.202-205, 2002.
7. Choi, J.-J., Park, H., Kim, K. Y. and Jeon, J. U., "Electromagnetic Micro x-y Stage for Probe-Based Data Storage," Journal of Semiconductor Technology and Science, Vol. 1, No. 1, pp. 84-93, 2001.
8. Chang, S. H., Tseng, C. K. and Chien, H. C., "An Ultra-Precision XY θ_z Piezo-Micropositioner, Part I: Design and Analysis," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 46, No.4, pp.897-905, 1999.
9. Smith, S. T., "Flexures-Elements of Elastic Mechanisms," Gordon and Breach Science Publishers, p.176, 2000.