

Min-Max 알고리즘을 이용한 피에조 구동형 스테이지의 최적설계 및 성능평가

최기봉[#], 한창수^{*}

Optimal Design and Performance Evaluation of PZT-driven Stage Using Min-Max Algorithm

Kee-Bong Choi[#] and Chang Soo Han^{*}

ABSTRACT

This paper presents an optimal design and the performance evaluation of two-axis nano positioning stage with round notched flexure hinges. A flexure hinge mechanism with round notched flexure hinges is to guide the linear motions of a moving plate in the nano positioning stage. A Min-Max algorithm is applied to the design of the flexure hinge mechanism for nano positioning stage. In the design process, the structure of the flexure hinge mechanism is fixed, then the radius of a round hole and the width of two round holes are chosen as design variables, and finally the design variables are calculated by the Min-Max algorithm. The machined flexure hinge mechanism, stack type PZTs for actuation and capacitance type displacement sensors for position measurement are assembled into the nano positioning stage. The experimental results of the manufactured nano positioning stage show the first modal resonance frequency of 197 Hz, the operating range of 40 μm , and the resolution of 3 nm.

Key Words : Flexure hinge (플렉서 힌지), Round notch (원형 노치), Nano positioning stage (나노 위치결정용 스테이지), Min-Max algorithm (Min-Max 알고리즘)

1. 서론

최근, 수백 나노미터 이하의 매우 미세한 웨이퍼 상의 패턴에 대한 연구가 진행되면서 반도체 제조장비 및 스캐닝 장비도 수 나노미터 이하의 고 분해능이 요구되고 있다. 이러한 장비에 사용되는 위치결정기구로서 단일체로 구성된 플렉서 힌지를 이용한 안내기구와 피에조 소자에 의한 구동 방법이 대표적이다.

피에조 구동형 스테이지^{1,2}는 동작속도, 강성, 분해능 및 구동기의 출력 등이 전자기력 또는 정전기력 구동기에 비해 매우 좋은 장점을 가지고 있어 반도체 공정용 스테퍼, 초정밀 레이저 용접용 스테이지 및 AFM 용의 스캐너로 널리 이용되고 있다. 피에조 구동형 스테이지는 스테이지와 단일체로 구성된 플렉서 힌지에 의한 안내기구가 필수적으로 사용된다. 플렉서 힌지는 미소변형을 위한 것으로 한 물체 안에서 다른 부분에 비해서

^{1,2} 접수일: 2004 년 8 월 4 일; 게재승인일: 2005 년 8 월 9 일

[#] 교신저자: 한국기계연구원 지능기계연구센터

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

^{*} 한국기계연구원 나노공정장비연구센터

상대적으로 가는 부분을 지칭한다. 따라서 플렉서 힌지에 의한 안내기구는 재료의 탄성변형을 이용하여 운동하기 때문에 부드럽고 연속적인 운동을 제공하고, 구조적으로 안정하며, 마모가 없기 때문에 다른 안내기구에 비해 수명이 긴 장점이 있다.³ 또한 플렉서 힌지의 형상 및 크기는 스테이지의 정특성 및 동특성과 같은 스테이지의 성능을 결정하는 중요한 요인이 된다.

단일체 구조의 플렉서 힌지는 판스프링형과 노치형으로 크게 분류할 수 있다. 노치형은 노치의 형태에 따라 원형, 포물선형, 타원형 등으로 분류된다.⁴ 여기서 원형 노치 플렉서 힌지는 지그 보링에 의한 가공이 가능하기 때문에 타 노치형에 비해 가공상 오차를 작게 할 수 있는 장점이 있어 플렉서 힌지 메커니즘에 많이 적용되고 있다.

나노구동용 스테이지에서 플렉서 힌지에 의한 안내기구의 설계로는 유한요소법을 이용한 설계변수의 최적화¹ 및 수치적 계산에 의한 설계법^{5,6}이 제시되었다. 유한요소법을 이용한 설계법은 보다 정확한 해를 구하기 위해 플렉서 힌지 부분의 메쉬 크기를 매우 작게 해야 하며, 설계 변수가 변경될 때마다 유한요소법을 재 수행해야 하기 때문에 소요시간이 긴 단점이 있다. 따라서 설계 단계에서는 개략적인 안내기구의 구조 및 플렉서 힌지의 형상을 결정한 후, 수치적 계산에 의한 플렉서 힌지 각 부분의 크기를 결정하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 Min-Max 알고리즘⁷에 의한 원형 노치 플렉서 힌지를 갖는 안내기구의 최적설계법을 제안하고, 이 설계법을 2 축 나노 구동용 스테이지에 적용한다. 또한 최적설계된 스테이지를 제작하여, 제작된 스테이지의 성능을 평가하고자 한다.

2. 나노 위치결정용 2 축 스테이지

2.1 스테이지의 구조

본 논문에서 제시한 나노구동용 2 축 스테이지의 구조는 Fig. 1 과 같다. 제시한 스테이지는 고정 프레임, 외측 이동평판, 내측 이동평판, 원형 노치형 플렉서 힌지에 의한 각 방향 안내기구, 각 방향의 구동용 피에조 소자 및 각 방향의 변위를 측정하기 위한 용량형 변위센서로 구성된다. 외측 이동평판은 고정 프레임과 x 축 운동용 안내기구에 의해 구속되어 있고, 환형상의 외측 이동평판과 내측

이동평판은 y 축 운동용 안내기구에 의해 구속되어 있다. 각 방향의 안내기구는 2 개의 병렬 4 절 링크로 구성된 이중평행선형스프링(Double parallel linear spring)이며, 타 방향으로의 운동을 구속한 채 구동방향으로의 운동만을 안내한다. 병렬 4 절 링크의 힌지부분은 단일체로 가공된 원형 노치형 플렉서 힌지이며, 이 부분이 미소변형을 하여 이중평행선형스프링은 한 축 방향의 운동만을 안내할 수 있다.

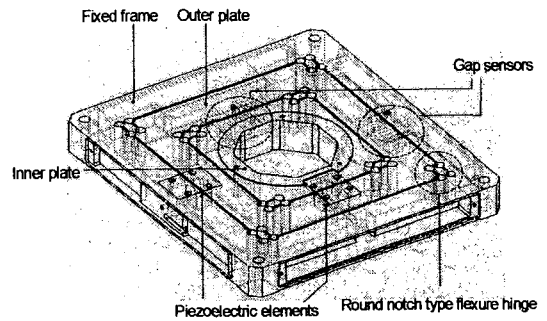


Fig. 1 Configuration of two-axis nano stage

2.2 운동방정식

Fig. 1 에서 플렉서 힌지의 축방향 변형은 무시하고, 회전운동만을 하는 회전스프링으로 가정하면, 스테이지의 운동을 수학적 모델링하기 위해 다음 Fig. 2 를 고려하자.

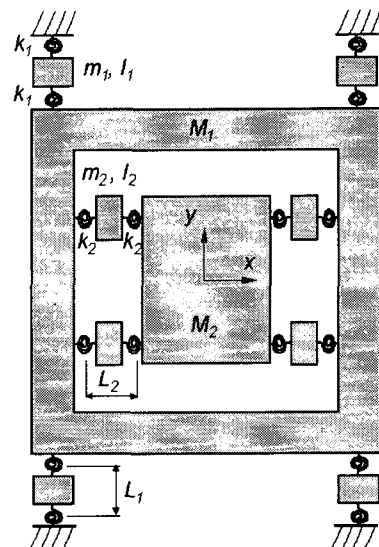


Fig. 2 Modeling of two-axis nano stage

외측과 내측 이동평판 및 플렉서 힌지 사이의 링크를 강체라 가정 한 후 이들의 질량을 각각 M_1 , M_2 라 하자. 또한 외측 이동평판과 고정 프레임 사이에 있는 링크의 질량, 관성모멘트, 플렉서 힌지의 회전강성 및 길이를 각각 m_1 , I_1 , k_1 및 L_1 이라 하고, 외측 이동평판과 내측 이동평판 사이에 있는 링크의 질량, 관성 모멘트, 플렉서 힌지의 회전강성 및 길이를 각각 m_2 , I_2 , k_2 및 L_2 라 하자. 이 때의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\left(M_1 + M_2 + m_1 + 4m_2 + 4\frac{I_1}{L_1^2} \right) \ddot{x} + 8\frac{k_1}{L_1^2} x = 0 \quad (1)$$

$$\left(M_2 + m_2 + 4\frac{I_2}{L_2^2} \right) \ddot{y} + 8\frac{k_2}{L_2^2} y = 0 \quad (2)$$

플렉서 힌지와 링크의 길이를 모두 동일하다고 가정하고, $m_1=m_2=m$, $L_1=L_2=L$, $I_1=I_2=I$ 및 $k_1=k_2=k_\theta$ 로 놓자. 이 때 회전강성 k_θ 는 다음과 같다.

$$k_\theta = \frac{2Ebt^{5/2}}{9\pi r^{1/2}} \quad (3)$$

여기서 E 는 재료의 탄성계수, b 는 플렉서 힌지의 두께, t 는 노치의 폭, r 은 원형 구멍의 반경이다.

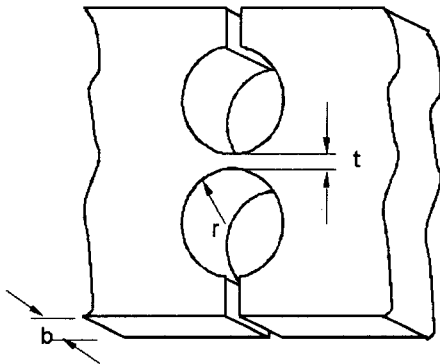


Fig. 3 Round notched flexure hinge

따라서 스테이지의 강성 K 는.

$$K = \frac{16Ebt^{5/2}}{9\pi L^2 r^{1/2}} \quad (4)$$

이고, 첫번째 고유진동수 f_1 는 다음과 같다.

$$f_1 = \frac{2}{3\pi} \sqrt{\frac{Ebt^{5/2}}{\pi r^{1/2} \left\{ (M_1 + M_2 + 5m)L^2 + 4I \right\}}} \quad (5)$$

3. 최적설계

Fig. 1 에 주어진 형상의 나노구동 스테이지는 AL-7075 의 재질을 가지며, 내외측 이동평판 및 링크의 형상과 크기 및 질량 등을 고정 한 채 다음과 같은 조건을 만족하도록 안내기구의 플렉서 힌지 반경 r 및 폭 t 를 구하는 문제로 간략화 시켰다.

$$180 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 220 \text{ Hz} \quad (6)$$

$$K \leq \frac{1}{20} k_{pzt} \quad (7)$$

$$\sigma_{\max} \leq \frac{1}{10} \sigma_Y \quad (8)$$

여기서 σ_{\max} , σ_Y 및 k_{pzt} 는 각각 최대응력, 항복응력 및 피에조 소자의 강성이다. 식 (6)의 첫번째 공진 주파수는 안내기구의 구동속도에 관한 조건이다. 가능한 한 이 값이 커야 스테이지가 빠르게 구동할 수 있다. 식 (7)의 안내기구의 강성은 피에조 소자에 의해 구동되는 각 축의 구동변위를 가능한 한 크게 하기 위한 조건이다. 안내기구의 강성이 커지면 구동변위가 작아지기 때문에, 구동변위를 크게 하기 위해서 강성이 작아져야 한다. 그러나 작은 강성은 안내기구의 공진주파수를 작게 하기 때문에 식 (6)과 식 (7)은 서로 상반된다. 따라서 두 식 사이에 적당한 타협이 필요하다. 식 (7)의 최대응력은 최대변위에서 플렉서 힌지 최소폭의 양 변에서 발생하며, 이 곳의 소성변형을 예방하기 위한 조건이다. 이 곳의 최대응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{\max} = K_t \frac{6k_\theta \delta_{\max}}{bt^2 L} \quad (9)$$

여기서 K_t 는 응력집중계수이고, δ_{\max} 는 각 축의 최대변위이다. 응력집중계수 K_t 는 다음과 같은 식으로 표현가능하다.⁸

$$K_t = \frac{2.7t + 5.4r}{8r + t} + 0.325 \quad (10)$$

설계 파라미터에 대한 구속조건은 다음과 같다.

$$1.0 \text{ mm} \leq r \leq 10.0 \text{ mm} \quad (11)$$

$$0.3 \text{ mm} \leq t \leq 4.0 \text{ mm} \quad (12)$$

본 연구에서는 Min-Max 알고리즘에 의해 설계

파라미터 r 및 t 를 최적화시킨다. Min-Max 알고리즘을 위한 성능지수 w_i 에서 w_5 를 다음과 같이 선정한다.

$$w_1 = |f_1 - f_d| \quad (13)$$

$$w_2 = \left| K - \frac{1}{20} k_{pzt} \right| \quad (14)$$

$$w_3 = \left| \sigma - \frac{1}{10} \sigma_Y \right| \quad (15)$$

$$w_4 = r \quad (16)$$

$$w_5 = t \quad (17)$$

여기서 식 (13)의 f_d 는 요구되는 고유진동수로 200 Hz 를 선정하였다. 성능지수 w_1 및 w_4 는 작은 값이 선호되고, w_2 , w_3 및 w_5 는 큰 값이 선호된다. 또한 식 (13)은 식 (6)의 구속조건에 의해 f_1 이 180 Hz 이하와 220 Hz 이상에서는 최대값으로 포화된다. 식 (14) 및 (15)는 식 (7) 및 (8)의 구속조건이 만족하지 않을 경우 최소값으로 포화된다.

설계 파라미터에 대한 구속조건 (11) 및 (12)의 영역에서 성능지수 w_i 에서 w_5 는 다음과 같이 정규화할 수 있다.

$$\bar{w}_i = \frac{w_{i,max} - w_i}{w_{i,max} - w_{i,min}} \quad (18)$$

$$\bar{w}_j = \frac{w_j - w_{j,min}}{w_{j,max} - w_{j,min}} \quad (19)$$

여기서 \bar{w}_i 및 \bar{w}_j 는 정규성능지수이고, 첨자 min 및 max 는 최소치 및 최대치를 의미한다. 또한 첨자 $i=1, 4$ 로서 작은 값을 요구하는 경우이며, 첨자 $j=2, 3, 5$ 로서 큰 값을 요구하는 경우이다.

정규성능지수에 임의의 가중치를 곱해서 다음과 같은 가중정규성능지수 \tilde{w}_i 를 정했다.

$$\tilde{w}_i = g_i(\bar{w}_i - 1) + 1 \quad (20)$$

여기서 g_i 는 가중치로서 다음과 같은 범위를 갖는다.

$$0 \leq g_i \leq 1 \quad (21)$$

가중성능지수를 이용하여 최적설계에 이용될 복합성능지수 W_c 는 다음과 같이 가중성능지수 들의 최소 퍼지집합에 의해 구해진다.

$$W_c = \tilde{w}_1 \wedge \tilde{w}_2 \wedge \tilde{w}_3 \wedge \tilde{w}_4 \wedge \tilde{w}_5 \quad (22)$$

여기서 \wedge 는 퍼지교집합을 의미한다. 이 때 최적설계변수는 복합성능지수의 최대값의 위치에 상당한다. 따라서 이들을 종합하면 최적화 문제는 다음과 같이 쓸 수 있다.

Find: (r, t)

Minimize: $\frac{1}{W_c}$

Subject to: 180 Hz $\leq f_1 \leq$ 220 Hz,

$$K \leq \frac{1}{20} k_{pzt},$$

$$\sigma_{max} \leq \frac{1}{10} \sigma_Y,$$

$$1.0 \text{ mm} \leq r \leq 10.0 \text{ mm},$$

$$0.3 \text{ mm} \leq t \leq 4.0 \text{ mm}.$$

Fig. 4 에서 (a)에서 (e)는 계산된 가중성능지수 \tilde{w}_i 이고, (f)는 Min-Max 알고리즘에 의한 복합성능지수를 보여준다. 여기에 이용된 가중치는 $g_1=1$, $g_2=0.5$, $g_3=0.5$, $g_4=0.8$ 및 $g_5=0.5$ 로 선정하였다. 최적설계된 설계 파라미터는 (f)의 복합성능지수의 최대값의 위치에 상당하는 값으로서 $r=5.9$ mm 및 $t=1.8$ mm 를 얻었다. 이 최적설계된 파라미터를 이용하여 계산된 안내기구의 물리적 성능은 Table 1 과 같다. 여기서 최대응력을 계산하기 위한 각축의 최대 변위는 50 μm 로 가정하였다.

Table 1 Calculated physical performances

Item	Desired value	Calculated value	Comment
f_1 (Hz)	200	191	-
K (N/ μm)	$\leq k_{pzt} / 20$	5.47	$k_{pzt} = 125$ N/ μm
σ_{max} (MPa)	$\leq \sigma_Y / 10$	45.3	$\sigma_Y = 505$ MPa

4. 성능실험

최적설계된 안내기구를 이용하여 Fig. 5 와 같이 나노구동 스테이지를 제작하였다. 원형 노치부분은 지그 보링을 이용하여 가공하였다. 구동부는 Piezomechanic 사의 10 mm \times 10 mm \times 36 mm 크기의 피에조 소자를 사용했으며, 센서부는 PI 사의 용량형 센서를 사용하였다.

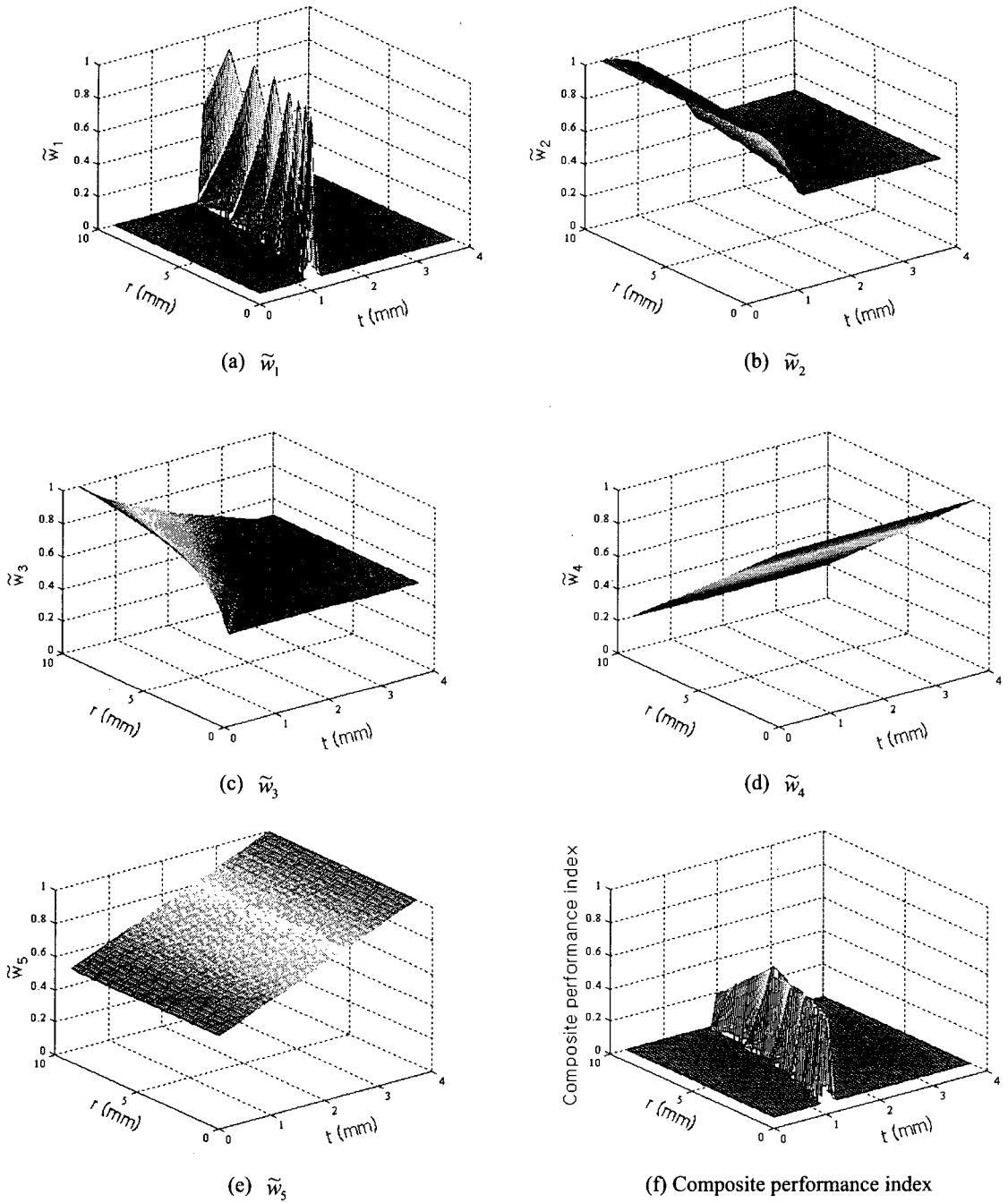


Fig. 4 Calculated weighting normal performance indices and composite performance index

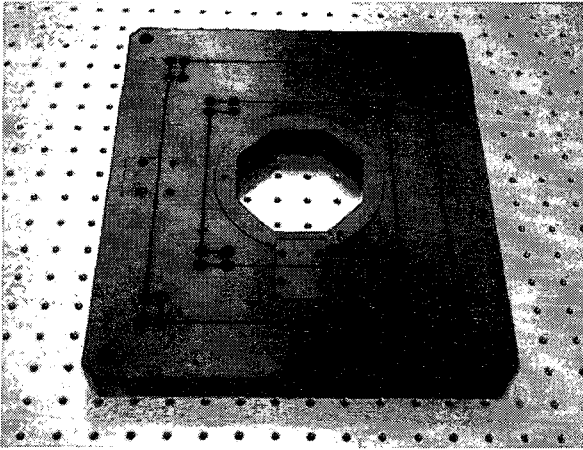


Fig. 5 Two-axis stage manufactured for nano motion

기구적 증폭을 하지 않았기 때문에 피에조 소자의 최대변위 만큼 각축의 변위를 구동할 수 있다.

스테이지에 피에조 소자를 장착하지 않은 상태에서 안내기구 만의 주파수 응답을 Fig. 6 과 같이 측정하였다. 60 Hz 의 주파수는 전원 노이즈이며, 스테이지의 첫번째 고유진동수는 197 Hz 로 측정되었다. 이것은 설계치에 약 5 %의 오차를 가지고 일치하는 것으로, 설계치에 근사하게 가공이 되었음을 알 수 있다.

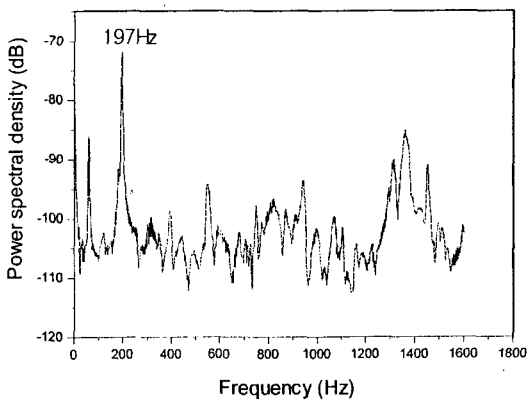


Fig. 6 Frequency response

스테이지의 구동영역을 알아보기 위해 피에조 소자에 -30 V~120 V 사이의 전압을 인가하여 개회

로 상태에서 각 축의 구동범위를 Fig. 7 과 같이 측정하였다. 각 축에서 히스테리시스가 발생하였으며, 조정밀 위치결정을 위해서는 위치제어에 의해 히스테리시스를 제거하여야 한다.

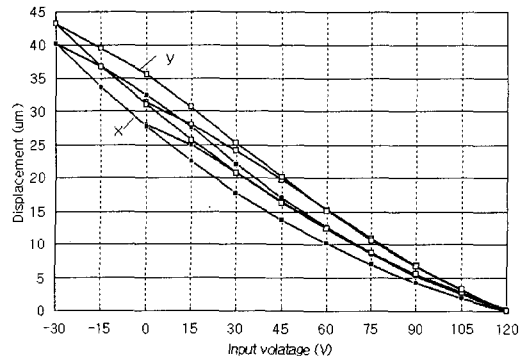


Fig. 7 Operating range

위치제어에 의한 스테이지의 분해능은 Fig. 8 과 같이 측정하였다. 측정에 사용된 센서는 50 µm 의 측정범위와 0.1 nm 분해능의 용량형 변위센서이며, 측정 결과 두 축에서 3 nm 의 분해능이 달성되었다.

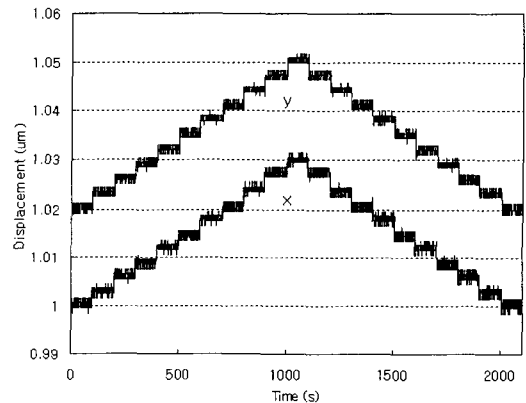


Fig. 8 Stepwise responses

5. 결론

본 논문에서는 원형 노치 플렉서 힌지를 갖는 나노구동용 2 축 스테이지의 최적설계 및 최적설계된 스테이지의 성능평가에 관한 연구를 수행하였다. 원형 노치 플렉서 힌지는 지그 보링에 의한

가공이 가능하기 때문에 타 노치형에 비해 가공상 오차를 작게 할 수 있는 장점이 있어 플렉서 힌지 메커니즘에 많이 적용되고 있다. 이러한 원형 노치 플렉서 힌지를 갖는 나노구동용 스테이지를 설계하기 위해 Min-Max 알고리즘에 의한 안내기구의 최적설계법을 제안하여 설계를 수행하였다. 설계 단계에서 스테이지의 개략적인 안내기구의 구조 및 플렉서 힌지의 형상을 결정한 후, 원형 노치의 반경 및 두 원형 구멍 사이의 폭을 설계변수로 하여 Min-Max 알고리즘에 의해 이 들을 결정하였다. 또한 최적설계된 나노구동용 스테이지를 제작하여 그 성능을 측정해 본 결과 고유진동수가 설계치의 약 5 %의 오차를 가지고 일치하였고, 40 μm 의 구동범위와 3 nm 의 분해능을 보였다. 제작된 스테이지는 AFM 용 웨이퍼 스캐너 및 초정밀 스테이지로 이용될 수 있을 것이다.

8. Tlusty, J., Smith, S. and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," *Annals of the CIRP*, Vol. 39, pp. 517 - 521, 1990.

참고문헌

1. Elmustafa, A. A. and Lagally, M. G., "Flexural-hinge guided motion nanopositioner stage for precision machining: finite element simulations," *Precision Engineering*, Vol.25, pp.77-81, 2001.
2. Rang, R., Jouaneh, M. and Schweizer, R., "Design and characterization of a low-profile micro-positioning stage," *Precision Engineering*, Vol.18, pp.20-29, 1996.
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. Lobontiu, N., *Compliant Mechanisms "Design of Flexure Hinges,"* CRC Press, 2003.
5. Rong, Y. and Zhu, Y., "Design and Analysis of Flexure-Hinge Mechanism Used in Micro-Positioning Stages," *Manufacturing Science and Engineering*, PED-Vol. 68-2, pp. 979-986, 1994.
6. Ryu, J. W., Gweon, D. G. and Moon, K. S., "Optimal Design of a Flexure Hinge Based XY \odot Wafer Stage," *J. of ASPE*, Vol. 21, pp. 18-28, 1997.
7. Choi, K.-B., "Kinematic Analysis and Optimal Design of 3-PPR Planar Parallel Manipulator," *KSME Int. J.*, Vol. 17, No. 4, pp. 528-537, 2003.