

나노포지셔너 개발을 위한 테스트벤치 제작

권지용^a, 박근제^a, 유원진^a, 이치범^{a*}

Manufacturing Test-bench for Developing Nanopositioner

Ji Yong Kwon^a, Geun Je Park^a, Won Jin Ryu^a, Chibum Lee^{a*}^a Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	1	April	2013
Revised	29	May	2013
Accepted	4	June	2013

Keywords:

Nanopositioner
Flexure stage
Test-bench
Piezo-actuator
Capacitance sensor
Linear encoder

ABSTRACT

In this study, a test-bench for developing and verifying a 1- or 2-axis nanopositioner was manufactured. Using this test-bench, a designed and manufactured flexure stage based on an analysis can configure nanopositioning systems. A breadboard and fixture were fabricated to be equipped with various types of mechanisms and sizes of stages. The test-bench has linear encoders for calibrating sensors and verifying the orthogonality and parasitic motion of 2-axis nested-type nanopositioners. The controller was developed using LabVIEW and a TI microcontroller. A case study that exemplified the test bench for developing a nanopositioner by senior undergraduate students is shown.

1. 서론

위치결정(positioning)은 정밀 측정 및 가공에 있어서 오랜 연구 과제였다^[1,2]. 정밀 포지셔닝 시스템은 분해능(resolution) 및 정밀도(precision)의 향상과 더불어 생산성과 연관되어 보다 빠른 이송 속도가 요구되어 왔다. 한편, 80년대 초 개발된 주사형 터널 현미경(scanning tunneling microscope)이나 원자 현미경(atomic force microscope)과 같은 주사 탐침 현미경(scanning probe microscope) 류는 나노 기술에 새로운 지평을 열었으며, 나노 기술의 급격한 발전을 불러왔다^[3]. 이에 따라, 기존의 위치 결정 기술을 넘어서는 새로운 나노포지셔닝 기술이 필요하게 되었다. 이미 나노미터(nm) 수준의 측정 및 가공이 재료공학, 전자공학, 생명공학 및 물리학 등 다양한 분야에서 연구되어지고 있고, 일부 가시적인 성과들은

상용화가 시작되고 있다. 다양한 첨단기술들의 급속한 발전과 상용화의 추진은 nm 또는 sub-nm 수준의 정밀도와 고속 동작 및 외부 환경의 변화에 둔감한 안정적인 포지셔닝을 요구한다.

나노포지셔닝 기술은 원자 현미경과 같은 초정밀 측정 분야^[4,5], 생명공학과 관련한 의료장비 및 기술 분야, 디스크 드라이브와 같은 초집적 정보저장기기 분야^[6], 초정밀 광학 분야^[7], 반도체 생산^[8,9]과 같은 첨단 정밀 제품 생산 분야, 바이오분야^[10], 전자항공기 및 우주산업 분야^[11]에서 핵심으로 요구되고 있다. 이러한 분야는 공통적으로 초정밀도의 위치결정을 필요로 하며, 초정밀 위치결정이 각 분야에서의 제품 성능에 핵심적인 역할을 할 뿐만 아니라 경쟁력을 배가시키는 역할을 맡고 있다. 이러한 관점에서 나노포지셔닝 기술은 첨단기술 분야의 경쟁력 확보 및 신기술 선점에 매우 중요하며, 나노기술의 상용화가 진행됨에 따라 그 요구가 더욱 확

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-9667

Fax: +82-2-974-8270

E-mail address: chibum@seoultech.ac.kr (Chibum Lee).

대될 것으로 기대되고 있다.

이미 나노포지셔너에 관한 많은 연구들이 있었다. 4절 링크구조를 응용하여 유연 힌지를 기반으로 스테이지를 제작한 연구^[12]에서는 단축의 직선 이송형 나노포지셔너의 기능적 특성을 고려하여 단축으로의 직선 이송시 이송방향 이외의 기생운동(parasitic motion)을 최소화하기 위하여 평행사변형 구조를 채택하였다. 또한 다른 연구^[5]에서는 원자현미경 스캐너에 사용할 수 있는 XYZ 스테이지를 탄성힌지구조와 압전소자를 이용하여 개발하였고, 스타일러스 프로파일러용 초정밀 선형 스테이지 설계에 관한 연구^[13]에서는 보이스 코일 모터를 구동기로 사용하였고, LVDT(linear variable differential transformer) 센서를 이용하여 2축 스테이지를 구성하였다.

본 연구에서는 1축이나 2축 내포형(nested type) XY 나노포지셔너를 개발하고 검증하기 위해서 필요한 테스트벤치를 구성하였으며, 이 테스트벤치의 1차적인 목적은 기계공학 전공 학부생들이 직접 설계, 개발한 유연 스테이지를 장착하여 나노포지셔닝 시스템을 구성할 수 있는 교육기자재의 개발이다. 본 장비를 이용하여 설계와 해석을 통해 검증된 제작된 유연 스테이지를 테스트벤치를 이용하여 나노포지셔닝 시스템을 구성해 볼 수 있으며, 교육 이외의 나노포지셔너의 개발 및 검증, 캘리브레이션 등에 사용될 수 있다.

본 논문의 2장에서는 테스트벤치의 구성요소인 센서, 브레드보드와 고정 장치, 고전압 증폭기, 디지털 신호처리 장치, 호스트 프로그램 등에 대하여 설명하고, 3장에서는 본 테스트벤치를 이용하여 4학년 학부 과정에서 나노포지셔너를 설계와 해석을 통해서 개발한 사례를 보여준다.

2. 테스트벤치의 구성요소

일반적으로 유연체 기반의 나노포지셔닝시스템은 Fig. 1과 같이 구성된다. 본 연구에서는 다양한 유연 스테이지(점선으로 표시)를 구성해 볼 수 있도록, 테스트벤치를 구성하였다.

유연 스테이지는 구동기를 내장하게 되므로, 그 이외의 전압 증폭기, 디지털신호처리장치와 호스트컴퓨터를 기본적으로 갖추었으

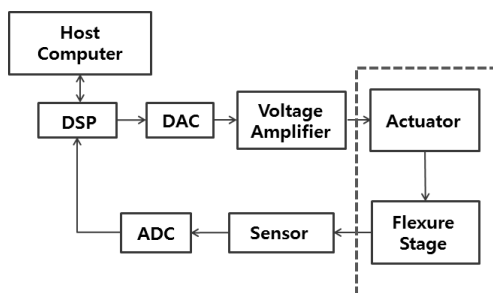


Fig. 1 System with host computer & stage

며, 필요에 따라 센서는 스테이지 내장형과 외장형을 사용할 수 있도록 하였으며, 센서의 캘리브레이션이나, 기생운동을 평가하기 위하여 별도의 보조 센서를 장착하였다.

2.1 센서

본 테스트벤치에는 용량형 변위 센서(capacitance sensor)와 리니어인코더(linear encoder)를 장착하였다. 용량형 변위 센서는 주로 센서를 내장하지 않은 스테이지의 입출력 관계를 외부에서 측정할 수 있도록 하였다. 용량형 변위 센서는 Micro Sense사의 4810 모듈과 2805 프로브(probe) 2개조를 이용하였다. 2805 프로브는 측정면의 지름이 5 mm에 불과하여 전류흐름여유 40%를 고려하더라도 두께 7 mm 이상의 모든 평면스테이지를 측정할 수 있다. 또한 단일 프로브 방식에서 전도성 물질로 제작된 스테이지의 변위를 쉽게 측정할 수 있다. 해당센서는 -250~+250 μm 의 측정범위와 0.04% 선형성 및 100 Hz 저주파 통과 필터 기준으로 약 11.3 nm 수준의 분해능을 가진다. 만약 센서 내장형 스테이지를 개발할 경우, 내장 센서의 특징을 용량형 변위 센서를 이용하여 캘리브레이션을 할 수도 있고, 리니어인코더를 이용할 수도 있다.

테스트벤치에 장착된 리니어인코더 2개는 각각 X축과 Y축에 대응되도록 스테이지 장착면 하단에 부착되어 있다. 각 축방향 변위를 스테이지 장착 센서와 다른 위치에서 측정하여 센서 캘리브레이션 용도로 사용할 수 있다. 또한 각 축의 상관 관계를 통하여 기생운동의 크기를 평가할 수 있다. 해당 캘리브레이션 용 리니어인코더로 MicroE Systems사의 5800Si 제품을 사용하였다. 정렬공차(alignment tolerance)가 2도로 장착이 용이하며, 인코더의 특성상 고속 측정이 가능하며, 최분해능이 1.22 nm이며, 테이프스케일을 사용시 오차가 5 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이내, 유리스케일을 사용시 오차가 1.5 $\mu\text{m}/\text{m}$ 이다.

2.2 브레드보드 및 고정 장치

테스트벤치는 다양한 타입의 기구(직립 기구와 병렬기구, 힌지구

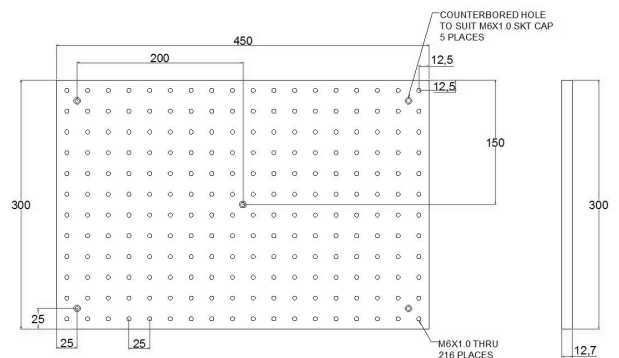


Fig. 2 Floor plan of bread board

조와 판형스프링 구조 등)와 크기를 지닌 스테이지의 장착이 자유로워야 한다. 따라서 교과과정이나 연구에서 설계 제작하는 스테이지를 부착할 수 있도록 Fig. 2의 구멍 간격 25 mm, M6 볼트 이용 규격 브레드보드(bread board)를 이용하였다. 브레드보드 크기인 300×450 mm에서 용량형 센서 부착 공간(리니어인코더만 사용시 이 공간은 불필요)만을 제외한 크기의 스테이지는 브레드보드에 바로 부착할 수 있도록 되어 있다. 본 테스트벤치를 이용하는 교과과정의 교과목 프로젝트에서는 편의상 1축 스테이지의 경우 60×60 mm로, 2축 스테이지의 경우 120×120 mm로 크기를 제한하였으며, 테스트벤치에 부착을 위하여 스테이지 고정하는 방법도 2가지로 규격화하였다.

먼저 60×60 mm 크기의 1축 스테이지의 경우, 주로 센서를 내장하지 않는 경우에 대해, Fig. 3에서 보는 바와 같이 광학포스트(optical post)를 이용하여 용량형 센서를 외부에 부착하도록 하였다. 소형 스테이지에서는 크기가 큰 볼트를 이용하기가 어려우므로, 작은 사이즈의 볼트(M2 또는 M3)를 이용하여 스테이지를 고정할 수 있도록 60×60 mm 사이즈의 부착면을 제공하였다. 또한, 외장 센서의 위치에 스테이지 측정면을 맞출 수 있도록 수동식 Z방향 수직 스테이지를 이용하여 고정 장치를 구성하였다.

120×120 mm 크기의 2축 스테이지의 경우, 센서의 내장여부와

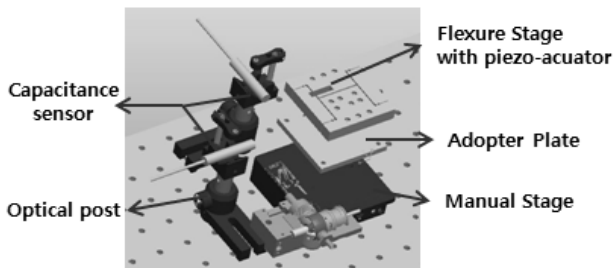


Fig. 3 Small size stage (60×60 mm) and test-bench fixture

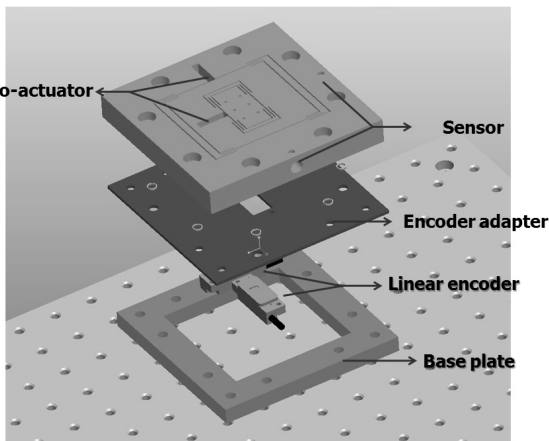


Fig. 4 Normal size stage (120×120 mm) and test-bench fixture including linear encoder sensors

상관없이 리니어인코더를 이용하여 캘리브레이션을 할 수 있도록 하였고, 필요할 경우 용량형 센서도 이용가능하도록 하였다. 리니어인코더는 운동 방향과 수직하게 장착하여야하고, 스테이지 하단면에 인덱스 스케일(index scale)을 부착하여야한다. 이에 따라 Fig. 4에 보이는 바와 같이, 120×120 mm 크기로 센서 고정부를 제작하여 브레드보드에 부착하였으며, 스테이지는 이 위에 인덱스 스케일과 센서가 1 mm를 유지하도록 위치하여야 하였다. 리니어인코더는 X축과 Y축 방향으로 90도로 이루어진 구멍에 인코더의 돌출부를 고정하였으며, 돌출부의 형태상 2 mm 내외의 얇은 판을 사용해야하므로, 강성을 고려하여 스테인레스(STS 303) 재질을 사용하였다. 현재 그림은 스테이지를 120×120 mm으로 제작하여 센서면 위에 바로 부착한 경우이며, 만약 이보다 더 큰 스테이지를 개발할 경우에는 스테이지 이동부가 센서 인코더 상단 1 mm에 위치하도록 브레드보드에 바로 고정하면 된다.

본 리니어 인코더의 측정 결과를 기반으로 스테이지에 부착된 센서 측정결과를 검증할 수 있으며, XY 방향의 인코더 측정값과 스테이지에 부착된 센서의 값을 비교하여 직각도나 기생운동에 대해서도 검증할 수 있다. 이러한 결과는 병렬기구의 경우에 보다 유용하게 사용될 수 있을 것으로 예상된다.

2.3 고전압 증폭기

압전소자를 구동하기 위하여는 고전압 증폭기(high voltage amplifier)가 필요한데, 본 테스트벤치에서는 PI사의 E-617을 사용하였다. E-617은 증폭비가 10배, 입력 전압 범위가 -2~12 V이며 출력전압이 -30~130 V이다. 리플노이즈가 30 mV_{rms} (100kHz 기준)이내이고, 대역폭이 3.5 kHz (1 μF 기준)으로 고정밀, 고속 작동이 가능하다.

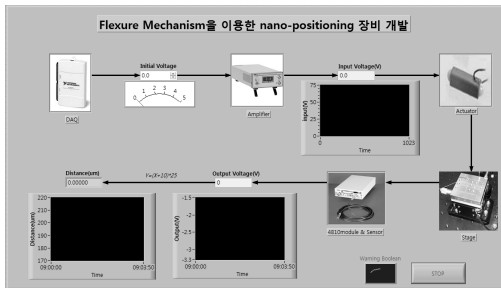
2.4 디지털 신호처리 장치

간단한 DAQ (data acquisition)장비를 이용하여 입력을 발생시키고, 이에 따른 센서 측정값을 읽어 들일 수 있도록 하였다. ADC (analog to digital converter)와 DAC (digital to analog converter)는 National Instrument사의 USB-6211을 이용하였으며, 이 경우 압전구동기와 용량형 변위 센서를 이용한 스테이지로 나노포지셔닝 시스템을 구성할 수 있다.

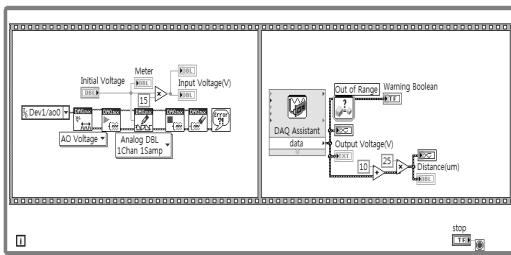
리니어 인코더의 신호를 읽어들이기 위해서는 카운터가 필요하고, 고속 제어 알고리즘을 적용하기 위해서는 별도의 신호처리장치가 필요하므로, 본 장비에서는 TI사 마이크로 컨트롤러인 TMS-320F28335을 사용하여 2축 고속제어기를 구성하였다.

2.5 호스트 프로그램

교육을 목적으로 스테이지의 거동을 시연할 수 있도록, National



(a) User interface panel



(b) LabVIEW VI program

Fig. 5 Host program with LabVIEW

Instrument사의 LabVIEW를 이용하여 간단한 호스트 프로그램을 구현하였다. Fig. 5은 LabVIEW를 이용한 제어를 프론트 패널과 블록 다이어그램으로 나타낸 모습이다. 입력신호는 증폭기에서 증폭되어 구동기로 전해지고 구동기가 스테이지를 움직이면 이 변위를 센서가 측정하여 출력값을 표시하는 방식으로 구성하였다.

3. 예제 : 4절링크 유연기구 개발

본 테스트베치를 이용한 예제로서, 학부 4학년 과정인 정밀기계 설계 교과목을 수강중인 학생들이 유연기구 개발 과제를 수행하였다. 본 테스트베치는 해당 교과목의 과제에 사용될 목적으로 개발되었으며, 본 교육과정에서 학생들은 사용할 수 있는 센서와 구동기를 제공받고, 이를 장착하도록 테스트베치의 제약조건을 고려하여 유연 스테이지를 설계하게 된다. 이 때, 나노포지셔너 개발에 가장 근간이 되는 설계와 유한요소 구조해석을 수행하여야 하며, 이 과정을 반복하여 설계를 완성한다. 본 예제에서는 4절 링크를 이용한 힌지 기구를 개발하였고, 이를 위해서 참고문헌^[13]을 참조하였다.

3.1 설계제약조건

본 과제에서는 60×60 mm 크기의 1축 소형 스테이지를 제작하였다. 제공된 압전구동기 사양은 Piezomechanik사의 PSt 150/3.5×3.5/20으로, 강성은 25 N/μm, 공진주파수는 35 kHz, 용량은 800 nF이다. 최대 구동 전압인 150 V 인가시 단극성 작동모드에서 최대구동력은 560 N이며, 최대 스트로크는 단극모드에서 20

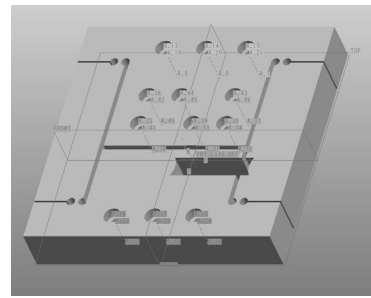


Fig. 6 Design of single axis four bar linkage stage

μm이다. 실제 크기는 너비와 폭이 세라믹 이의 외형으로 인하여 3.5 mm 보다 4 mm 기준으로 설계해야하며, 길이는 18 mm이다.

3.2 유연 스테이지의 설계

기생운동을 최소화 하기 위해서는 이중 복합선형 스프링 구조(double compound rectilinear spring type)를 이용하는 것이 가장 유리하지만, 본 과제에서는 소형으로 구현이 유리한 평형사변형 4절 링크구조를 이용하였다^[2]. 크랭크(crank) 링크의 아래 부분에 압전구동기를 위치하여 커플러(coupler) 링크가 회전 운동이 없이 수평방향으로 움직이도록 하였다. 4절 링크 구조 특성상 Y축 방향의 기생운동이 발생할 수 있다.

Fig. 6에 나타난 바와 같이 유연체 힌지를 이용하여 회전 조인트를 구현하였으며, 압전구동기가 커플러 링크 하단 1/5지점에 위치하여 약 4배의 변위 증폭비를 갖는다^[13].

3.3 유한요소법을 이용한 강성 및 변위 해석

본 과제에서 채택한 재료는 스테인레스(STS 303)로 물성치는 Table 1과 같다. ANSYS^[14]를 이용한 유한요소해석법을 통하여 제작한 스테이지의 고유 모드와 하중 조건에서의 발생 응력을 확인하였다. 해석 결과로부터 1차 고유진동수는 약 219.6 Hz이었으며, 1차 공진모드는 의도하는 작동방향과 일치함을 확인하였다. 따라서 1차 고유진동수에 의한 동특성이 작동에 직접적으로 영향을 미치게 되는 것을 알 수 있다. 1차부터 6차까지 고유진동 모드는 Fig. 7에 나타내었다. 2차 모드가 830.4 Hz에서 발생하므로, 저속 작동에서 2차이상의 모드의 영향이 크지 않을 것으로 예상된다.

스테이지의 강성을 계산하기 위하여 일정한 힘을 주고 이에 대한 스테이지의 변위를 계산하였다. 압전 구동기에 단계적으로 하중을

Table 1 Material properties of STS 303

	Young's Modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yield Stress (MPa)	Endurance limit (MPa)	Density (kg/m ³)
STS 303	193	0.25	240	240	8

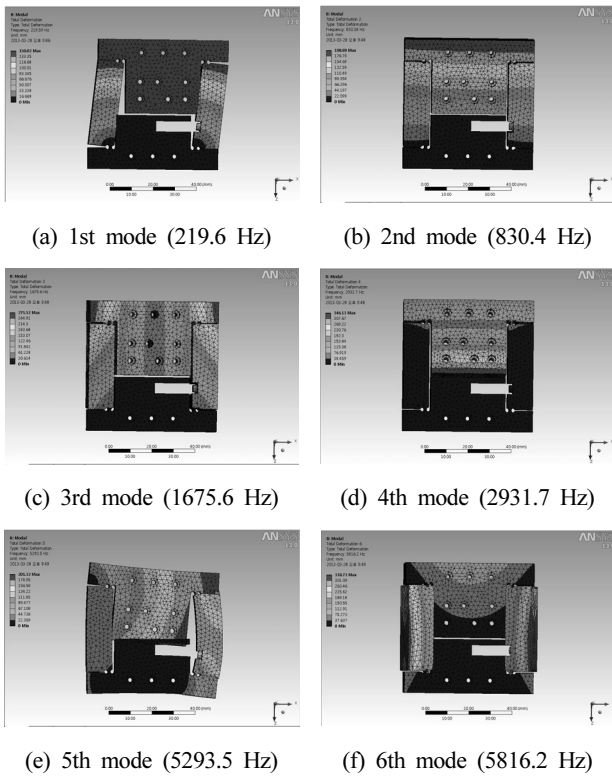


Fig. 7 Normal mode of four bar linkage stage

가하여 100 N까지 증가시켰을 때, 스테이지의 최대 변위는 이와 비례하여 증가하고, 최대하중 100 N에서 Fig. 8과 같이 스테이지 이동부 변위가 115 μm 로 나타났다. Fig. 9는 이때 발생한 von mises 등가 응력을 계산한 것으로, 최대 응력은 힌지부에서 196 MPa로 나타났으며, 이는 항복 응력의 약 80%이므로, 입력하중 100 N까지의 변형은 선형구간임을 알 수 있다. 따라서 본 스테이지의 강성은 $k = 0.8696 \text{ N}/\mu\text{m}$ 로 계산된다.

다음으로 스테이지 강성과 압전구동기 특성을 이용하여 최대 변위를 계산하였다. 본 스테이지는 테스트벤치의 설정에 따라 0-100 V에서 작동하도록 되어있다. 압전구동기의 최대구동력은 $F_p \text{ max} = 373.3 \text{ N}$ 이고, 최대변위는 $\delta_p \text{ max} = 13.3 \mu\text{m}$ 이며 압전구동기의

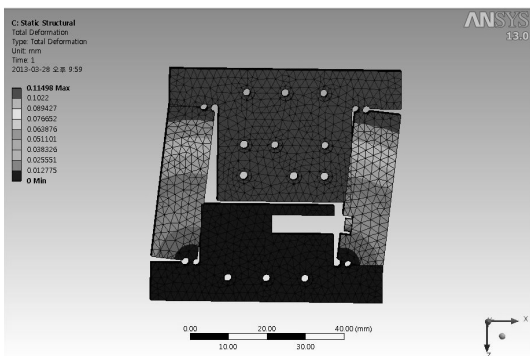


Fig. 8 Total displacement (100 N force input)

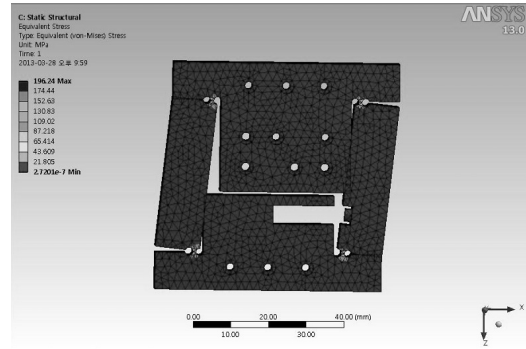


Fig. 9 Equivalent von-Mises stress

변위와 구동력은 식 (1)과 같이 주어진다.

$$\delta_p = -\frac{\delta_{p\text{max}}}{F_{p\text{max}}} F_p + \delta_{p\text{max}} \quad (1)$$

스테이지에 압전구동기를 장착할 때 예압이 작용하도록 스테이지 이동부의 예압길이를 $\delta_0 = 16 \mu\text{m}$ 로 정하면, 스테이지의 작용력과 변위 관계는 식 (2)와 같다.

$$F = \frac{k}{a} (\delta + \delta_0) \quad (2)$$

스테이지에서 압전구동기의 증폭비 $a = 4$ 이므로 $F_p = aF$, $\delta = a\delta_p$ 의 관계를 갖게 된다. 이를 그래프로 표현하면 Fig. 10과 같으며, 압전구동기에 100 V가 인가될 때 압전구동기의 작용력이 53.63 N, 최대변위 45.67 μm 가 발생한다. 약 100 V가 인가되었을 때, 등가 응력은 105 MPa 근방으로 피로한도의 43% 수준이다. 따라서 피로파괴는 발생하지 않을 것으로 예상된다.

3.4 스테이지의 제작

와이어 방전 가공을 통하여 제작한 스테이지를 테스트벤치에 장

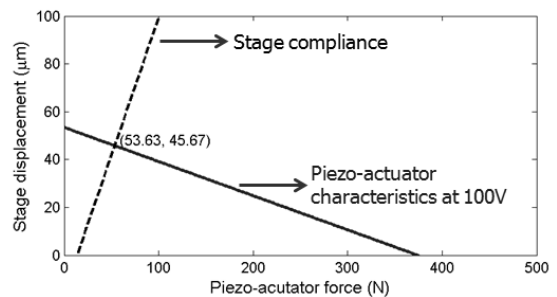


Fig. 10 Maximum stage displacement corresponding

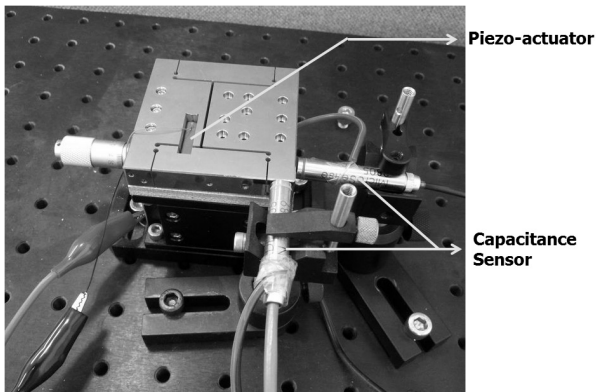
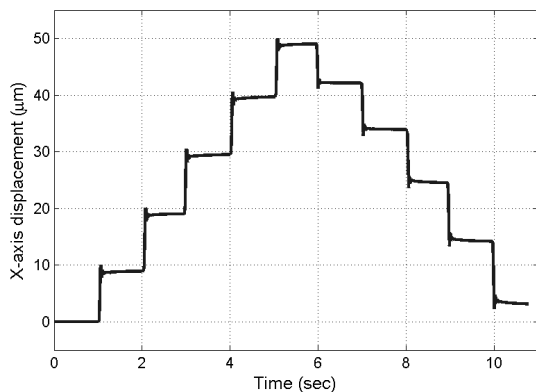


Fig. 11 Attachment of piezo-stage in test-bench

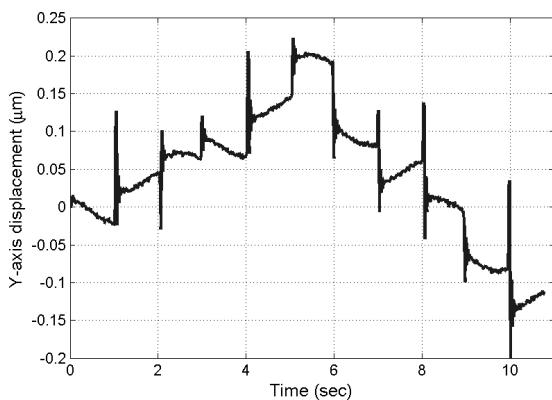
작하였다. Fig. 11은 압전 구동기를 포함한 유연 스테이지가 테스트벤치에 부착된 사진을 보여준다. 압전 구동기가 부착되는 위치를 실제보다 약 4 μm 작게 가공하여 탄성을 이용하여 끼워넣었으며, 센서는 광학 포스트를 이용하여 외부에 부착하였다.

3.5 실험

작성된 LabVIEW 프로그램을 이용하여, 입력과 출력을 비교하



(a) X-axis displacement of open loop response



(b) Y-axis displacement of open loop response

Fig. 12 Experiment result of open-loop operation

였다. Fig. 12에 나타난 결과는 압전구동기에 0부터 100 V까지 20 V 단위로 계단과 상승 후 다시 하강하는 입력을 주었을 경우 나타난 X축과 Y축의 출력 결과이다. 본 실험 결과는 개루프 방식으로 입력을 주고 출력을 측정하는 것이다. 본 결과에 따르면 100V가 인가되었을 때(5초~6초), X축의 평균 변위는 48.95 μm 로 설계 사양보다 약 7% 큰 결과를 보이지만, 크립(creep)이 발생하여 실험 결과가 정확하다고 할 수 없다. Fig. 12(b)를 살펴보면 기생운동으로 Y축 변위가 최대 0.2 μm 가 발생한 것을 알 수 있으며, 이는 X축과 비교할 때 약 0.4%의 기생 운동이 존재하는 것을 알 수 있다.

Fig. 12를 살펴보면, 초기 계단입력 후에 점점 변위가 줄어드는 크립 현상이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 입력값은 0 V로 돌아왔지만, 초기값과 최종값이 일치하지 않으므로 히스테리시스(hysteresis)가 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 비선형 효과를 없애기 위해서 페루프 제어가 필수적임을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 1축이나 2축 나노포지셔너를 개발하고 검증하기 위해서 필요한 테스트벤치를 제작하였다. 제작된 테스트벤치를 이용하면 해석을 기반으로 설계하고 제작된 유연 스테이지를 부착하여 나노포지셔닝 시스템을 구성할 수 있다. 다양한 타입의 기구와 크기를 지닌 스테이지가 장착될 수 있도록, 브레드보드와 고정 장치를 제작하였으며, 2축 내포형 XY나노포지셔너의 캘리브레이션과 직각도 검증을 위하여 보조 센서로서 리니어 인코더를 테스트벤치에 부착하였다. LabVIEW와 마이크로 컨트롤러를 이용하여 제어부를 구성하였다. 또한, 제작된 테스트벤치를 이용하여 4학년 학부 과정에서 나노포지셔너를 설계와 해석을 통해서 개발한 사례를 보여준다.

본 테스트벤치의 1차적인 목적은 기계공학 전공 학부생들이 직접 설계, 개발한 유연 스테이지를 장착하여 나노포지셔닝 시스템을 구성할 수 있는 교육기자재의 개발이며, 이외에도 나노포지셔너의 개발 및 검증, 캘리브레이션 등에 사용될 수 있다. 나아가 고성능 제어 알고리즘을 구현할 수 있는 고성능 DSP (digital signal processor)를 포함하고 있으므로, 스테이지에 적합한 제어를 직접 구현해 볼 수 있다.

후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 학부 졸업작품으로 수행 되었습니다. 또한, 예제의 설계 관련 자료를 제공해주신 한국산업기술대학교 정영훈 교수님께 감사드립니다.

References

- [1] Slocum, A. H., 1992, Precision Machine Design, Society of Manufacturing Engineers, USA.
- [2] Smith, S. T., Chetwynd, D. G., 1994, Ultra-Precision Mechanism Design, CRC Press, USA.
- [3] Bushan, B., 2010, Handbook of Micro/Nano Tribology, 2nd Ed., CRC Press, USA.
- [4] Shim, J. Y., 1997, A Precision XYZ-Stage for AFM Scanner Design, Analysis and Control, Master Thesis, KAIST, Korea.
- [5] Kim, Y. S., 2003, Development of the Ultra Precision XYZ stage using the Piezo Actuator and Elastic Hinge for AFM, Master Thesis, Seoul Nat'l Univ., Korea.
- [6] Sebastian, A., Pantazi, A., Cherubini, G., Eleftheriou, E., Lantz, M., Pozidis, H., 2005, Nanopositioning for probe storage, Proc. Amer. Control Conf., 4181-4186.
- [7] Vettiger, P., Staufer, U., Kern, D. P., 1996, Special Issue on Nanotechnology, Microelectron. J. Eng., 32, 1-4.
- [8] Verma, S., Kim, W. J., Shakir, H., 2005, Multi-axis Maglev nanopositioner for precision manufacturing and manipulation application, IEEE Trans. Ind. Appl., 41:5 1159-1167.
- [9] Choi, K. B., Lee, J. J., Lim, H. J., Kim, G. H., 2011, A Piezo-driven Ultra-precision Stage for Alignment Process of a Contact-type Lithography, Journal of the KSMTE., 20:6 756-770.
- [10] Meldrum, D. R., Pence, W. H., Moody, S. E., Cunningham, D. L., Holl, M., Wiktor, P. J., Saini, M., Moore, M. P., Jang, L. S., Kidd, M., Fisher, C., Cookson, A., 2001, Automated, integrated modules for fluid handling, thermal cycling and purification of DNA samples for high throughput sequencing and analysis, Proc. IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatron., 1211-1219.
- [11] Fasik, J. C., 1998, An inchworm actuator for the next generation space telescope, Burleigh Instruments, Inc., Fishers, USA.
- [12] Jeong, Y. H., Chae, K. W., Bae, J. H., 2011, Modularized Flexure-Hinge Nanopositioner Based on Four-Bar-Link-Mechanism, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 28:7 851-858.
- [13] Jung, H. S., 2007, A Study on the Ultraprecision Linear Stage for Stylus Profiler, Master Thesis, Ajou Univ. Korea.
- [14] ANSYS, 2005, ANSYS User's Manual Version, ANSYS Inc.